UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Efectos de Armónicos en Rectificadores para Telecomunicaciones

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico Electricista
Área Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

Javier Velázquez Arteaga

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Francisco Rodríguez Ramírez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2007

Agradecimientos

General

Se muy bien que ha pasado mucho tiempo y que quizá muchos de ustedes familiares y amigos llegaron incluso a pensar que nunca iba llegar éste día, por mi parte siempre lo tuve en la mente en ningún momento olvidé ni dejé de pensar en éste día, era el objetivo primero de mi vida personal y profesional; y así había sido desde entonces, desde el primer día que pisé las aulas de mi amada facultad.

Fueron varios intentos fallidos, trabajo desperdiciado horas y horas de investigación, en fin, resulta por demás contar lo que ha pasado, pues de hecho es eso pasado, pero nunca dejé de pensar en éste día, trabajé incluso usurpando lugares que seguramente estaban destinados a personas tituladas, anduve por varios lados del mundo en mi amada América latina porque la educación que recibí me dio esa oportunidad.

Y por ello; Gracias:

Al Señor todopodersoso; al Señor Jesús

Gracias a mi Dios por haberme dado toda la educación que llevo en mi persona, por darme hoy ésta oportunidad nueva que ha fructificado, por haberme enseñado a ejercer la Fe con inteligencia y con coraje, la Fe que da fruto; Gracias Dios mío porque a ti te debo todo, gracias; por haberme dado la familia que tengo porque me dio una madre a quien le debo sin duda mucho, demasiado, porque ella siempre estuvo y ha estado conmigo, en buenas y en malas, en opulencia y en carencia, porque en todo momento me enseñó, quién tu eres Dios. Gracias Señor porque mediante ésta conquista que me has dado oportunidad de obtener he de honrrar tu santo y bendito nombre. Honrra y Gloria a tu nombre Señor en el nombre del señor Jesús.

A mi Madre

Gracias Mamá porque siempre has estado conmigo, porque siempre me apoyaste y lo sigues haciendo porque tuviste una familia grandiosa llena de bendiciones, porque llevo tu sangre y lo digo con orgullo, hoy te entrego en tu mano sin duda alguna un logro, requirió esfuerzo, pero principalmente esfuerzo tuyo de toda una vida porque gracias a ti soy y he sido. Gracias Mamá de verdad muchas gracias.

A mis hermanos

Gracias a ustedes hemanos porque cada uno me ha dado de si lo mejor y por ello lo he logrado, a ustedes, mi familia se los debía y ahora se los entrego lleno de placer, lleno de gozo, el placer que da el lograr una conquista, porque ésta conquista no es mía sino de todos y cada uno de ustedes, así quiero que la vivan, porque somos de la misma sangre y lo que conquista tu sangre es tu propio orgullo.

María Olivia, Lino Jesús, Hector y Beatriz es una conquista de todos, de verdad se los digo, vívanla de esa forma, sientanla, y recibanla principalmente en sus corazones, que queden llenos del gozo de la victoria.

A mi Universidad y Facultad

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme acogido como uno más de los orgullosos profesionales que de ella han emanado. A mi facultad por la por haberme dado cada uno de los conocimientos que tengo que me ha dado para haber estado ya en mi amada América latina trabajando y colocándo el nombre de mi facultad de mi

universidad, de mi país, de mis hermanos mexicanos, el nombre de mi familia y de mi madre muy en alto, y de la misma forma la presencia del Señor en mi vida.

A mi asesor de tesis, Francisco J. Rodríguez Ramírez.

Quien a pesar de altas y bajas siempre creyó en mi y no dejó que las adversidades y los tropiezos me vencieran, porque de él he obtenido mucho conocimiento pues durante mucho tiempo nos hemos conocido y me ha dado conocimientos importantes no solo de académia sino también de la vida; y a pesar de la demora que fue larga hoy ha estado conmigo, gracias Paco (así le gusta que le llamemos sus alumnos).

A Adrián del Rio Saldivar (mi amigo, mi hermano de toda la vida).

Sin embargo como cualquier hombre tiene un amigo de toda la vida, el mio ha sido Adrián, se que tu también siempre has estado cerca lo mismo en la victoria que en la lucha, por el simple hecho de que crees en mí y me has obsequiado tu corazón, sabes que no iba a desistir hasta lorgrarlo, gracias porque siempre has creido en mí.

A mis amigos

Nunca sin olvidarme de cada uno de ustedes, sin importar de donde hemos sido amigos (vecinos, preparatoria, Facultad de Ingeniería, en mis trabajos, La Salle, Otis, Marconi, CSC o Getronics / DSM) también amigos mios que han estado de mi lado en cada etapa diferente de la vida personal y profesional, algunos muy cerca otros un poco mas a distancia, quizá sería muy extenso hablar de cada uno de ustedes porque son muchos, gracias a Dios, pues agradesco al Señor haberme dado sus corazones, porque cada uno de ustedes es y ha sido especial, porque se bien que nunca dejaron de creer en mí, aún cuando nunca se explicaron el porqué de la demora, ni yo mismo lo sabía con certeza, y hoy, hoy les entrego la primera etapa concluida. Porque no es la última eso tenganlo por seguro, me conocen. Saben muy bien que no he de parar aquí.

Pero en la historia de todo hombre siempre hay mujeres que no se olvidan nunca.

A una hermosa tabasqueña que me motivó a cambiar mis preceptos personales aún cuando desvó mi mirada del objetivo personal de irme a otro país en su momento, y siempre en todo momento me ehortó a no darme por vencido, siempre me exhortó a luchar hasta lograrlo. En parte ella es tan importante como para vivir éste peldaño escalado.

Efectos

De Armónicos

En Rectificadores

Para Telecomunicaciones

Indice Temático

i. Presentación
i.i. Antecedentes
i.ii Planteamiento y formulación del problema
i.iii Justificación y relevancia
i.iv Contexto
i.v Alcance y objetivo
i.vi Conexión con otros temas
i.vii Metodos y procedimientos de solución
i.viii Resultados esperados
i.ix Descripción y organización del trabajo

1.Suministro de tensión comercial en alterna (ac)
1.1 Descripción de un sitio de telecomunicaciones
1.2 Tensiones y corrientes utilizados en las aplicaciones de telecomunicaciones
1.3 Fuentes de suministro de tensión
1.4 Calidad de energía

2.Sistema de fuerza
2.1 Rectificador
2.2 Batería
2.3 Distribución
2.4 Barra(s) colectora(s) de retorno de batería o de tierra común - batery return bus -
2.5 Control del sistema y supervisión
2.6 Contactor de desconexión por baja tensión
2.7 Celda contraelectromotriz
2.8 Compensación de temperatura de batería
2.9 Sistema de convertidores dc-dc.
2.10. Sistema de inversores dc-ac o Unidades de potencia ininterrumpida UPS
2.11 Integración del sistema de potencia de dc.

3.Dimensionamiento de un sistema de fuerza
3.1 Cálculos
3.2 Fórmulas
3.3 Ejemplo de diseño de un sistema de fuerza

4.Tecnología de rectificadores

4.1 General
4.2 Principios de rectificación regulada por amplificador magnético
4.3 Principios de rectificación regulada por diodos y thystores
4.4 Principios de rectificación por ferroresonancia y control ferroresonante
4.5 Comparación entre rectificación regulada por thrystores y por control ferroresonante
4.6 Rectificación basada en alta frecuencia
4.7 Operación de un rectificador de alta frecuencia por bloques
4.8 Características de equipos rectificadores comerciales

5.Armónicos
5.1 General
5.2 Generación de armónicos
5.3 Características de respuesta del sistema

6.Efectos de los armónicos
6.1 General
6.2 Motores y Generadores
6.3 Transformadores
6.4 Cables de suministro de potencia
6.5 Capacitores
6.6 Equípo electrónico
6.7 Equipo de medición
6.8 Relevadores e Interruptores
6.9 Interferencia telefónica
6.10 Convertidores Estáticos de potencia

7.Control de armónicos y compensación de potencia reactiva
7.1 Factor de potencia de convertidor
7.2 Compensación de potencia reactiva
7.3 Control de corrientes armónicas

8.Análisis de armónicos
8.1 Cálculo de corrientes armónicas
8.2 Cálculo de respuesta en frecuencia del sistema
8.3 Diectrices del modelo para análisis de armónicos
8.4 Interferencia telefónica
8.5 Cálculos de ranuramiento de la línea - line notching -
8.6 Distorsión armónica total

8.7 Cálculos de sistema (baja tensión, debajo de 1000V)
8.8 Cálculo de mejoramiento del desplazamiento del factor de potencia

9.Medición e instrumentación para armónicos
9.1 General
9.2 Equipo básico utilizado para análisis de corrientes y tensiones no senoidales
9.3 Requerimientos para instrumentar la respuesta
9.4 Presentación de datos de armónicos
9.5 Transductores para medición de armónicos

10.Directrices recomendadas para efectos prácticos y aplicaciones
10.1 General
10.2 Para servicios de distribución
10.3 Para consumidores individuales

11.Problema práctico
11.1 Introducción
11.2 Planteamiento
11.3 Estudio del problema

12.Conclusiones
12.1 Consecuencias de la utilización de cargas no lineales
12.2 Efectos en equipos de rectificación
12.3 Trabajo conjunto de áreas responsables
12.4 Evaluación de fuentes armónicas adicionales a un sistema
12.5 Alarmas
12.6 Corrección del factor de potencia

13.Conceptos, definiciones y bibliografía
13.1 Conceptos y definiciones
13.2 Tabla de Símbolos / Simbología
13.3 Bibliografía

i. Presentación

i.i Antecedentes

Cuando una interrupción de servico se presenta en algún tipo de sitio de telecomunicaciones, sea telefonía convencional, telefonía celular, enlaces, microondas , etc.., se generan problemas tanto para la firma que proporciona el servicio (de telefonía o de enlaces) como con sus clientes, dichos problemas, en ocaciones son demasiado costosos puesto que la interrrupción del servicio a fin de cuentas se traduce o significa no poder cobrar a los clientes por simplemente estar conectados a su red o por la utilización del servicio (lo cual no siempre es cierto), o puede significar no amarrar un negocio por no tener enlace y por el simple hecho de no tener correo electrónico.

Actualmente existe un mercado demasiado competido y las firmas de telecomunicaciones en sus concursos (licitaciones) para establecer que firmas serán los suministradores de los equipos (ganadores de un contrato de compra de infraestructura) con los que se conformarán los sitios procuran la obtención de ciertas y muchas ventajas, ventajas que en ocaciones resultan no solamente en grandes descuentos y precios realmente muy bajos (a mercado mexicano, el cual en realidad es bastante alto), algunas de ellas son:

1. Periodos de garantía extendidos, es decir que, consiguen mayores periodos de garantía a los tradicionales (de 1 o 2 años; que son los periodos de soporte tradicionales) llegando a ser de hasta 5 años, incluso mayores.
2. Refaccionamiento para los talleres que las propias firmas de telecomunicaciones tienen prácticamente sin pago por las mismas, es decir, sufragados por la propia firma vendedora.
3. Responsabilidad de respuesta los 365 días las 24 hrs en cualquier punto geográfico del país por remoto que sea en un plazo no mayor de un par de horas luego de la realización de una llamada sin importar el rango del reportante y sin importar las condiciones de operación reales del mismo.

A consecuencia de ello las firmas fabricantes de equipos y comercializadoras se ven en problemas que van más allá de lo convencional, puesto que no existen esos niveles reales de compromiso (auténtico ; 12 / 12.2 y 12.3) sobre los equipos vendidos ni sobre el personal que presta en servicio, de ésta forma surgió el problema objeto de estudio en el presente trabajo, que en primera instancia dio a pensar en la firma de telecomunicaciones que tenía que realizar un reclamo a la firma fabricante y

comercializadora de los equipos de fuerza que había comprado en un proyecto grande de expansión de sitios y de sustitución de equipos ya existentes (aproximadamente 1500 sistemas de alimentación o plantas de fuerza); eximiendose la firma usuaria o compradora de su propia responsabilidad [12 / 12.2 y 12.3].

Prácticamente todos los equipos de telecomunicaciones como conmutadores telefónicos, transmisores de microondas, transmisores de fibra óptica, radios móviles, enlaces celulares y otros tantos que están en el mercado operan con alimentación de tensión y corriente de directa (dc), sin embargo por otra parte la transmisión y distribución de potencia eléctrica es realizada en alterna (ac) casi en todo el mundo dado que es la mejor forma de transmisión en cuanto a los costos que representa en general para las economías nacionales y por tanto para los beneficios económicos de la población, por ese motivo, es necesario que para alimentar los equipos de enlace y transmisión (telecomunicaciones) sea realizada una conversión de energía de ac a dc, se requiere por tanto de equipos convertidores de energía (rectificadores), si comparamos las fuentes de suministro entre dc y ac; una fuente de dc tiene el beneficio de una alta realizabilidad comparada con una fuente de suministro de ac porque usa una batería que a menudo es utilizada como respaldo, a diferencia de que un inversor (convertidor de energía de dc a ac) que es conectado como una etapa intermedia el cual puede fallar y romper el suministro de potencia a una carga.

Los equipos de trasformación de energía para aplicaciones de telecomunicaciones tienen ya un largo tiempo de estar siendo aplicados, lógicamente han tenido una evolución pues no eran como lo son actualmente; tecnológicamente hablando podemos mencionar las últimas tecnologías de transformación de energía que han sido usadas; ferroresonancia magnética, rectificadores de potencia controlada SCR´s y alta frecuencia, no sin mencionar que se han tenido beneficios al aplicar también en combinación la tecnología de arquitectura de sistemas digitales basados en microprocesador. Al ser los convertidores de energía equipos que dentro de su naturaleza llevan conmutación por un primer lado son elementos que introducen perturbaciones a la línea de suministro de potencia, como consecuencia inherente a su trabajo, pero por un segundo lado pueden ser susceptibles a un alto contenido de perturbaciones en la propia línea, básicamente consideran una señal senoidal pura en su alimentación; aunque existen equipos que anuncian tener rango extendido de alimentación y filtros para diferentes tipos de perturbaciones.

i.ii Planteamiento y formulación del problema

i.ii.i Planteamiento

Resulta obvio que los equipos presenten problemas luego de tener ya un tiempo funcionando, ya sea por degradación natural de componentes y ensambles o por falla, sin embargo cuando se presentan problemas en un corto plazo lógicamente los usuarios y compradores generan reclamaciones a los comercializadores y fabricantes, por otro lado los sistemas de alimentación de energía en corriente alterna en general siempre tienen crecimiento, es decir siempre se van conectando más equipos a un sistema, llega un momento en que ya no es posible crecer en términos de potencia, sin embargo hay ocaciones que los elementos que se van conectándo a los sistemas van introduciendo perturbaciones a la señal de alimentación y en términos de perturbaciones en la señal de alterna llegan a presentarse problemas tales que requieren de especial atención.

Entonces resulta común que después de tener ya un tiempo en operación los equipos en general tienden a presentar malos funcionamientos o fallas lo que puede llegar a ser un problema por desgaste natural de componentes; es natural que todas las firmas de comercialización tenga periodos de garantía de diferente duración, pues depende del proyecto y de las condiciones de contrato.

Cuando dentro de ese periodo de compromiso de reparación y / o reposición sin costo para la empresa usuaria o compradora existen malos funcionamientos, resulta obvio que habrá reclamaciones

Al cabo de entre nueve y diez meses de estar ya en operación una planta de fuerza en un sitio celular en la cuidad de México, fue recibida la notificación de un problema en el departamento de servicio y soporte de la firma fabricante, en el que según el reporte realizado por los ingenieros de operaciones de la empresa de telecomunicaciones celulares usuaria, los rectificadores (llamados por la tecnología comprada unidades de conversión de potencia PCU) de la planta de fuerza del sitio (primero) se salían de operación y necesitaban apagarlos y sacarlos de la planta de fuerza para reestablecerles en su funcionamiento y volver a rehubicarles en su posición respectiva en la planta de fuerza (haciendoles un reset), lo anterior sucedía solamente a dos rectificadores de la planta de fuerza y con una frecuencia llamemos menor (dos veces cada dos semanas) al inicio de las observaciones y notas al respecto de la firma usuaria.

Al paso del tiempo la frecuencia del fenómeno fue en aumento (llamemos mediano) a tres o cuatro veces a cada tres semanas y de igual manera en una cantidad mayor de rectificadores (PCUs), llegó el momento en que se presentó ya con una frecuencia (

llamemos mayor) de cinco o seis veces en las mismas tres o cuatro semanas, obviamente el problema se presentaba ya ante los ojos del usuario como un tema grave (recuerdo que había comprado aproximadamente 1500 plantas), dentro de las observaciones realizadas al respecto del problema, el fenómeno de falla coincidía con el periodo de lluvias y de la misma forma el aumento en frecuencia coincidía con el aumento del caudal de las mismas así como la intensidad de los fenómenos de descargas atmosféricas.

De la misma forma (como es lógico en un área de soporte de una firma de sumistro) se recibieron reportes de fallas encontradas en otros sitios de la misma empresa de telecomunicaciones celulares (como resulta lógico de una empresa con más de 2 mil sitios operando), dos sitios más en la ciudad de México y otros dos ya en el interior del país, uno en una zona de altas lluvias pero el otro en una zona de lluvias moderada, al realizar las recepciones de los datos de los lugares se observó que cuatro de ellos se encontraban dentro de edificios de Teléfonos de México y uno en un edificio de tienda Sanborns (5 sitios). La localización de los sitios celulares en cuanto a su ubicación causó un tema de controversia porque la pregunta que surge en los responsables de servicio de la firma suministradora del equipo de fuerza en primer término es *¿ que parámetros están variando de manera coincidente entre los lugares en relación a los fenómenos naturales, para tener ése comportamiento de `falla`(resalto así porque en las condicones establecidas era necesario clasificar si lo era o no)*

i.ii.ii Planteamiento del problema

La firma de telecomunicaciones celulares buscaba la explicación así como la solución del problema de forma inmediata, la firma de fabricación más que nunca buscaba la razón del fenómeno pues aparte de los casos citados obviamente tenía otros casos de plantas de fuerza con reportes de falla (pues son equipos operando sin interrupción) pero que no correspondían con la falla citada que de forma obvia el usuario no deja de asociar con la falla citada hasta que no se pruebe lo contrario por parte de la firma fabricante y comercializadora, para ambas firmas el problema potencialmente era muy delicado pues la cantidad de plantas de fuerza del mismo tipo que ya se encontraban en operación a lo largo y ancho del país pues en ése momento ya era bastante considerable, cerca de mil doscientas cincuenta, y la empresa celular había comprado en los últimos tres años cerca de mil quinientas plantas de fuerza del mismo tipo.

La firma fabricante pensó en la presencia de los fenómenos atmosféricos como la causa del problema (de hecho era la principal sospecha de forma inicial y al mismo tiempo,

pensaba, la de mayor probabilidad) y contrató los servicios de renta de equipo de estudio para el comportamiento de la energía en cuanto al sumistro de las plantas de fuerza, eligiendo obviamente las plantas que tenía más cerca, en la ciudad de México, de manera que colocó al mismo tiempo prácticamente dos equipos de estudio para un periodo de tiempo de entre tres a cinco semanas de monitoreo ininterrumpido.

La idea de la firma fabricante era la de presentar como prueba del comportamiento de los equipos la aparición de transitorios de tensión a consecuencia de descargas atmosféricas, que aparentemente eran la causa del problema, de manera que presentando así el problema la firma fabricante se exoneraba de cierta manera de la responsabilidad sobre los equipos y tomaba así una nueva bandera para presentar un proyecto nuevo de venta de equipos de protección contra transitorios a la empresa celular, representando ahora una oportunidad de vender más dolares, la renta de los equipos de estudio por el periodo de tiempo citado, aún cuando era un problema de mucha fuerza potencial, no fue sino después de dos semanas de la aparición de los reportes (en el periodo de gravedad) de los fenómenos de falla que se instalaron los equipos de prueba.

Para el tiempo en que se instalaron los equipos en los sitios los fenómenos meteorológicos ya habían disminuido demasiado en su frecuencia en la cuidad de México, lo que daba como opción pensar en el colocar equipos de estudio en las otras dos plazas que se tenía conocimiento del problema, resulta obvio hablar de que no se instalaron equipos de monitoreo en dichas plazas (pues, si tardaron 2 semanas en decidir colocar las primeras).

i.iii Justificación y Relevancia

En muchas aplicaciones de potencia en corriente directa (dc) son preferidos los rectificadores de control de fase dada su simplicidad y su relativo bajo costo, sin embargo la tensión de salida que presentan contiene aparte de la corriente directa dc un cierto contenido armónico [Ref 1]. El empleo de cargas no lineales trae consigo el hecho de conectar las mimas a los sistemas de suministro de energía de alimentación en corriente alterna, esas cargas pueden ser convertidores estáticos de energía (static power converters), equipos o dispositivos de descarga, dispositivos o equipos de saturación magnética y en menor grado máquinas rotativas. Los convertidores estáticos de energía son los equipos no lineales más utilizados prácticamente tanto en la industria como para una gran variedad de aplicaciones y propósitos tales como fuentes de alimentación electroquímicas, controladores de velocidad para motores, fuentes de alimentación de cd (

power systems) para aplicaciones de telecomunicaciones y por tanto los más usuales porque pueden convertir energía de ac a dc, de dc a dc (cambio de nivel) y de dc a ac

Las cargas no lineales cambian la naturaleza senoidal de la energía bajando el nivel e introduciendo armónicos tanto de tensión como de corriente los cuales fluyen hacia la ac; eso puede causar problemas en los sistemas de telecomunicaciones así como en otros tipos de equipos. [Ref 2]. De esa forma se percibe que los armónicos son elementos indeseables pero de alguna forma inevitables en cuanto a su presencia se refiere en los sistemas eléctricos – electrónicos, en los sistemas de suministro de energía y potencia se tiene su presencia, de su comprensión y estudio depende el diseño, el funcionamiento correcto y el alto desempeño de muchos equipos de tecnología electrónica, su presencia en altos niveles perjudica el desempeño e incluso la vida útil de muchos equipos de electrónicos. [Ref 3].

Específicamente son altamente perjudiciales en sistemas donde existen equipos de telecomunicaciones. Su presencia en ese tipo de aplicación fue de especial interés en el desarrollo del presente trabajo. Porque un tipo de equipo de rectificación y suministro de energía para aplicaciones de telecomunicaciones en sitios celulares (sites) considerados de alta tecnología, de tecnología de punta de manufactura americana y de una marca altamente competitiva (Lorain) en los E.U. y América Latina, cuya presencia en cuanto a capacidad instalada en ése mercado es de un número bastante importante de unidades, fue altamente perjudicado por la presencia de armónicos, un equipo que aparentemente no debería haber sido perjudicado por ellos, por ese motivo dado que es un problema de interés particular se ha realizado la presente investigación como un caso de estudio presentado en el presente trabajo los sucesos y sus consecuencias. Aún cuando no fue de una presencia en una cantidad considerable de equipos dentro del contexto de ese universo de los mismos instalados a lo largo del país.

La falla aparente del mismo ante un alto contenido de armónicos tanto de tensión como de corriente en su momento disparó un aviso de alarma encaminado al reclamo de las unidades compradas totales.

i.iv El contexto

El contexto referido es sobre un equipo de tecnología de conversión de energía por medio de alta frecuencia, de una marca alterante competitiva [Lorain] pues su presencia en el país es muy alta con alrededor de 75% de los sitios de telecomunicaciones ya sea de telefonía o de infraestructura celular tienen equipo de esa marca. Sobre un marco de

presión en el ámbito comercial entre empresa usuaria y empresa comercializadora porque el fenómeno sucede en una etapa en un proyecto de expansión cuando las revisiones entre las secciones comerciales son de gran importancia para los futuros proyectos.

Dentro del contexto se revisa bajo un esquema básico un concepto muy importánte, la calidad de energía, pues la calidad de energía básicamente podemos describirla como la detección y corrección de los diferentes disturbios que se pueden presentar en un sistema de alimentación eléctrica en el lado del usuario y la corrección de fallas del lado de las compañías suministradoras para lograr un sunministro de energía con calidad y sin interrupciones en el lado de las compañías de suministro del servicio eléctrico.

En si resulta muy amplio hablar de calidad de energía pero podemos resumirlo en la frase suministro de energía en alimentación de ac sin interrupciones sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de tensión suministrado al usuario, también concierne a la estabilidad de tensión, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

Actualmente la calidad de la energía es el resultado de una atención continua. Recientemente, esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas eléctricos, las cuales, por sí solas resultan ser una causa de degradación en la calidad de la energía eléctrica.

Debido a la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida, la cual es usada en la iluminación, en la operación de diversos equipos, vídeo, aire acondicionado y sistemas de cómputo, así como en procesos industriales como de servicio, es importante contar con una buena calidad de energía. La energía eléctrica además se ha empleado en la fabricación de la mayoría de las cosas que utilizamos. Por consiguiente los disturbios y variaciones de tensión que se producen en la red eléctrica afectan directamente al usuario. [Ref 4].

i.v Alcances y objetivos

El objetivo central o primordial del presente trabajo de investigación es: detectar, investigar, informar y enunciar las estrategias sugeridas a seguir para la corrección de un problema causado en equipos de transformación de energía de corriente alterna a corriente directa (rectificadores) por medio de tecnología de alta frecuencia, para por medio de él alcanzar el grado de ingeniero.

Los objetivos que se plantean en el presente trabajo son los siguientes:

1. Mostrar que a consecuencia de la utilización de cargas no lineales en los sistemas de alimentación de energía eléctrica en alterna, la energía se ve afectada en su pureza, obteniendo en consecuencia perturbaciones y deformaciones en la forma de onda [senoidal]. [12 / 12.1]
2. Mostrar los efectos que un alto contenido de armónicos genera en un tipo de sistema de suministro de energía, que realiza transformación basada en tecnología de alta frecuencia en aplicaciones de suministro de fuerza en telecomunicaciones. [12 / 12.2]
3. Mostrar como afecta en términos operativos principalmente y comerciales, un problema como es que se ha planteado. [12 / 12.2]
4. Pretende mostrar bajo un marco teórico cuales son las fuentes que contribuyen con la generación de elementos armónicos de manera general. [6 / 6.1 – 6.10]
5. Enunciar diversas técnicas para su disminución haciendo comentarios sobre los costos en que se puede incurrir o implicar [importante ver alcances punto i.v] .
6. Destacar hasta donde puede llegar un mal trabajo entre los departamentos correspondientes, en lo que respecta a la empresa fabricante y comercializadora; ventas - ingeniería – desarrollo – servicio y en la parte usuaria – compradora, compras – ingeniería – infraestructura – instalación y servicio. [12 / 12.3]
7. De igual forma los problemas que puede ocasionar el hecho de no tener infraestructura adecuada instalada en sitios que son rentados a otras compañías (aún siendo hermanas de corporación) así como cuidado ni presencia en decisiones. [12 / 12.2]
8. Destacar que no existen en verdad aún en grandes marcas como Emerson Network Power, Argus, Meisa, Emeisa, Ericsson entre otras un trabajo conjunto de los correspondientes departamentos de ingeniería antes y durante los proyectos aún siendo millonarios y cabe aclarar que no en todos los casos sucede así. Pero que por desgracia para los fines tecnológicos los aspectos económicos son determinantes para encontrar los equipos a utilizar en las aplicaciones. [12 / 12.3]
9. Destacar dos aspectos el primero; que muchas de las personas responsables de Servicio y Soporte en diversas firmas son elegidas para gerenciar y dirigir porque tienen un buen nivel de facturación, es decir generan ganancias buenas sin embargo llegan a ser tan poco intuitivos, mesquinos e irresponsables tecnológicamente hablando ya que por ahorrar unos miles de pesos, colocan en riesgo incluso relaciones comerciales futuras. [12 / 12.2 y 12.3]
10. Mencionar el proceso de evaluación de fuentes de armónicos adicionales a las ya existentes dentro de un sistema; planteamiento de una forma de estudio y

evaluación de condiciones de operación futuras, es decir extrapolar hacia condiciones potenciales de opoeración visualizando el comportamiento del sistema. [12 / 12.6]

En cuanto a los alcances del trabajo.

1. Se mantiene en claro que no se es dueño ni de la marca ni del proceso de ensamble y manufactura, de la misma forma que no existe relación de desarrollo e investigación sobre el producto, mucho menos del desarrollo de ingeniería, por lo que se mantiene claramente que el alcance del trabajo está limitado a mostrar de acuerdo con los estudios realizados los acontecimientos sus mediciones y sus efectos.
2. No es por tanto necesario aclarar que no se realizó reingeniería, es decir reprocesos, rediseños, retrabajos en pro de la mejora del diseño de los equipos, así como enunciar para dejar claro que al no ser dueño de los procesos el alcance se ve com pletamente limitado y delimitado a ser un escaparate de un acontecimiento.
3. Por desgracia al ser una entidad disociada de los procesos de fabricación y ensamble, y de la misma forma al no ser una persona física de comercialización de equipo, tecnología y servicio solo se puede hacer comentarios sobre los costos en que se puede incurrir o implicar la aplicación de las diversas tecnologías de mejoramiento planteadas e lo largo del trabajo, sin llegar a la parametrización real de precios y costos.
4. En cuanto a Servicio y soporte plantea la capacitación en diversos equipos que se encuentran en el mercado para los ingenieros de campo de las firmas usuarias sin llegar a ningún plande acción porque no se es dueño ni responsable de ninguna de ese tipo de áreas.

i.vi Conexión con otros temas

El tema en sí es de relevancia porque los armónicos están presentes en todos los sistemas en que hay energía eléctrica, prácticamente se relaciona con sistemas de distribución y suministro de energía en alterna, dado que hoy día los sistemas de procesamiento digital de datos están presentes prácticamente en casi todas las actividades tecnológicas, económicas y administrativas, se conecta con los temas de Electrónica y Sistemas Digitales en el sentido establecer un juicio sobre las fallas en los equipos de rectificación de energía los cuales de hecho son híbridos por lo que tiene que relacionarse con temas de Circuitos Eléctricos en sus fundamentos, Dinámica de Sistemas en el estudio de las afectaciones en los componentes.

i.vii Métodos y procedimientos de solución

El trabajo en sí en el capítulo correspondiente a Armónicos en General expone las técnicas existentes de solución para disminuir el contenido armónico en los sistemas, En la sección de conclusiones se establece cuales de ellas se definen como solución del problema que se plantea. Por situación económica y por implicaciones comerciales entre las firmas se procedió de una forma alternativa y paliativa (paleativa) no siendo en la realidad la mejor solución tecnológica, sin embargo en su momento se estableció (de mi parte) la solución, la cual contempló el cambio del trasformador de suministro de la sección de alimentación del equipo de fuerza del sitio celular de cada edificio en cuestión como la más barata y de mayor acceso, sugerí el diseño de filtros de armónicos para montaje en la sección de conexión de energía de alimentación de los equipos.

i.viii Resultados esperados

El alcance trazado en el presente trabajo como se puede apreciar es limitado dado que no se es dueño de ninguna parte del proceso de diseño y fabricación de los equipos, por lo que el trabajo cumple con establecer algunas estrategias y métodos a seguir para la detección y corrección del problema tanto para los sitios en que se presenta un alto contenido de armónicos (infraestructura de la red operativa celular) como para las áreas de ingeniería de producto de la firma fabricante – comercializadora. La esperanza real es que sean establecidas las presentes estrategias y métodos aplicados en la firma que fabrica los equipos así como de poner al alcance de las firmas de su competencia la investigación para la mejora de sus procesos de ensamble y fabricación.

i.ix Descripción y organización del trabajo

El contenido del presente trabajo de investigación se encuentra organizado de la siguinte forma:

° Contiene en el último capítulo unas tablas que compendian las definiciones y símbolos utilizados dentro del desarrollo de la información, de manera que la complementan y contiene la bibliografía

° Presentación la cual da un panorama general del contenido, alcances y organización del trabajo

° Los capítulos primeros del 1 al 3 contienen la información preliminar sobre los sistemas de alimentación de alterna y calidad de energía; sistemas de fuerza que son utilizados en aplicaciones para telecomunicaciones, comenzando con los sistemas de alimentación en diferentes partes del mundo en alterna, luego se presenta una descripción general de los sistemas de alimentación o sistemas de fuerza y sus elementos en cuanto a su organización, características y su funcionamiento tanto general como su en conjunto, dando final mente los conceptos básicos de dimensionamiento de un sistema de alimentación o sistema de fuerza en general

° Los capítulos 4 y 5 presentan los principios básicos de transformación de energía, la organización que tienen y el funcionamiento en conjunto de los circuitos básicos en un rectificador [convertidor de energía] que utiliza alta frecuencia como tecnología de conversión de energía, presentan los conceptos, definiciones básicas y teoría sobre armónicos, las principales fuentes de emisión de armónicos así como características de respuesta de los sistemas

° En los capítulos 6 y 7 presentan información sobre cuales son los efectos que presentan los armónicos en diferentes clases de equipos, se presentan metodos de control de armónicos y de corrección de factor de potencia

° En los capítulos 8, 9 y 10 se presenta todos los elementos básicos de la teoría sobre armónicos, los principios básicos de sus cálculos así como requerimientos y elementos de detección y medición y por último cuales son las recomendaciones sobre su contenido en sistemas de energía eléctrica

° En la parte final capítulos 11 y 12 se ha estudiado un caso práctico que viene a ser la parte central del presente trabajo en él se presenta ya de manera práctica como se presentan los armónicos en un sistema, y se establecen las conclusiones de todos los temas expuestos en el presente trabajo

Referencias para la presente sección

1. A new metod of camping harmonic resonante at the dc link in large-capacity rectifier-inverter systems using a novel regenerating scheme; Introduction; Toshihiko Tanaka; 0039-9994/02 .

2. IEEE recomendad prectices and requirements for harmonic control in electrical power systems, guide IEEE 519, Introduction

3. Distortion factor the new problem of power factor; Abstract; Lorain Products and Effects of switch mode power supply harmonic currents on building power systems and stand-by engine alternators; John E. Mitchel;

4. Instituto tecnológico de Morelia depot de ing eléctrica; Armónicos http://elec.itmorelia.edu.mx/armonico/

5. Efects of switch mode power supply harmonic currents on building power systems and stand-by engine alternators; Lorain Porducts; Robert Plow

Capítulo 1 Suministro de tensión comercial en alterna (ac)

1 Introducción

1 Introducción

Muchos equipos de telecomunicaciones como conmutadores telefónicos, transmisores de microondas, transmisores de fibra óptica, radios móviles, enlaces celulares y otros tantos están diseñados para operar con alimentación de tensión y corriente de directa (dc), sin embargo la transmisión y distribución de potencia eléctrica es realizada en alterna (ac) porque es la mejor forma de transmisión en cuanto a los costos que representa en general para las economías nacionales, por ese motivo, es necesario que para alimentar los equipos de enlace y transmisión (telecomunicaciones) sea realizada una conversión de energía de ac a dc, se requiere por tanto de equipos convertidores de energía (rectificadores), una fuente de dc tiene el beneficio de una alta realizabilidad si es comparada con una fuente de suministro de ac porque usa una batería que a menudo es utilizada como respaldo se conecta directamente como una carga más, a diferencia de un inversor (convertidor de energía de dc a ac) que es conectado como una etapa intermedia el cual puede fallar y romper el suministro de potencia a una carga. Un sistema de fuerza básico está formado por un rectificador y una batería a partir de ambos elementos se considéran todos los demás que conforman el sistema de fuerza.

1.1 Descripción de un sitio de telecomunicaciones

En un sistema de telecomunicaciones el hecho de tener un sistema ininterrumpido de suministro de energía es vitalmente importante porque de hecho lo que las empresas de telecomunicaciones venden a sus clientes es enlace en todo momento y en todo lugar en que se encuentren con su cobertura. Por ese motivo requieren de sistemas de potencia que garanticen un suministro de energía en todo momento, en ciertas ocaciones por motivos de operación se requiere que despachos u oficinas con equipo de oficina que se mantenga trabajando de igual forma de manera ininterrumpida.

Un sistema de telecomunicaciones está conformado básicamente de elementos de conversión de energía de ac-dc (rectificador(es)), un elemento de respaldo de energía en dc (batería o banco de baterías), si el sitio o sala contiene trabajando equipos que requieren de un suministro de energía de diferente nivel de tensión de dc que el principal entonces necesita elementos de conversión de energía dc-dc (convertidor(es)), si es requerible o necesario mantener equipos de oficina trabajando en forma alternativa al sitio o sala se requiere de elementos que inviertan la energía de dc a ac (inversor(es)). Todos los elementos en conjunto conforman un sistema de suministro de potencia ininterrumpido para un sitio o sala de telecomunicaciones.

Un sitio de telecomunicaciones (o sala) es un espacio físico que conjunta en su interior a los equipos de telecomunicaciones los cuales son alimentados por la planta de fuerza que como respaldo (para cuando la alterna de alimentación falla) cuentan con una batería para suministrar potencia a los mismos dado que en todos los sistemas de distribución de potencia eléctrica comercial (alimentación) presentan fallas por un espacio de tiempo no determinado, si es necesario, porque se tenga que alimentar a dos niveles de tensión de dc los equipos de telecomunicaciones es requerible tener convertidores y si es necesario también tener inversores para suministrar ac para equipos de oficina. Para optimizar y mantener los equipos electrónicos funcionando de forma eficiente se deben tener equipos de aire acondicionado para refrigeración.

1.2 Tensiones y corrientes utilizados en las aplicaciones de telecomunicaciones

1.2.1 Requerimientos típicos de tensión y corriente de dc

Las dos tensiones más comunes de suministro para equipos de telecomunicaciones son + 24 V y – 48 V, el empleo de – 48 V es el predominante así como la tensión de trabajo más segura de acuerdo con el Código Nacional Eléctrico (NEC National Electric Code) de los Estados Unidos y con el Código Eléctrico Canadiense (CEC Canadian Electric Code) sin pesentar requerimientos de límite de corriente. Esa tensión reduce los requerimientos de corriente haciendo a los interruptores, fusibles de protección y cables de menor calibre (sección transversal).

+ 24 V envuelve a la industria de radio móvil y telefonía celular donde el equipo está diseñado para operar en dos modos uno automotivo en + 12 V y en sistema de carga + 24 V.

- 48 V corresponde al mundo de la telefonía en que fueron elegidos - 48 V dado que es el máxima tensión considerada como seguro para realizar conexiones en vivo (crecimiento, trabajos de mantenimiento y cambios), la polaridad negativa (tierra positivo) es elegida para reducir al mínimo posible la corrosión sufrida el cobre de los cables. La tabla 1.1 muestra las tensiones típicas de trabajo de diferentes tipos de equipos de telecomunicaciones comerciales.

Application	Voltage	Current	Notes
Mobile Radio Base Station	+12 VDC	<50 Amps	
Analog Cellular Base Station	+24 VDC	200-800 Amps	
Microwave transmission station	+24 VDC	<400 Amps	
Mobile Radio Base Station	+24 VDC	<50 Amps	
Digital Cellular Base Station	+24 VDC	100-600 Amps	
Digital Cellular Base Station	-48 VDC	100-400 Amps	
Microwave transmission station	-48 VDC	<600 Amps	
Fiber optic transmission station	-48 VDC	<100 Amps	
Telephone switching center (pedestal)	-48 VDC	20-100 Amps	
Telephone switching center (remote)	-48 VDC	50-200 Amps	
Telephone switching center (large)	-48 VDC	200-10 000 Amps	
PBX	-48 VDC	<100 Amps	
Pay phone coin control	+/- 130 VDC	< 5 amps	History
Fiber in the loop (FITL)	+ 130 VDC	100 VA per circuit	
Microwave transmission traveling wave tubes, etc	-12, +130 & + 250 VDC	various	History

Tabla 1.1
Tensión y corriente típicamente requerida por diferentes equipos de telecomunicaciones

Luego de dar un vistazo a dicha tabla se puede observar que dependiendo de los diferentes equipos a combinar en un sitio de telecomunicaciones determinado se realizará el dimensionamiento y selección de los equipos que conformarán el sistema de fuerza y así será la corriente total a suministrar por el sistema de fuerza.

1.3 Fuentes de suministro de tensión (alterna)

En 1883 después del invento del generador eléctrico se logró elevar la tensión en forma eficiente y económica utilizando corriente alterna, por ese motivo fue adoptado internacionalmente el sistema de corriente alterna para la generación y transmisión de energía eléctrica pues permite transmisión de grandes cantidades de energía a grandes distancias con el menor costo, por ello fue adoptado que en la distribución a los usuarios finales de energía eléctrica (consumidores) fuera también generalizado utilizar energía en alterna, además el motor de corriente alterna es superior en utilización al de corriente contínua que solo es utilizado en aplicaciones de tracción, donde se hace la conversión de alterna a contínua para alimentarlo en las aplicaciones que lo requiere.

Resulta obvio decir que los primeros sistemas alterna fueron monofásicos figura 1.1, en 1883 Tesla inventó las corrientes polifásicas, en 1887 patentó en los Estados Unidos un sistema de transmisión trifásico figura 1.2, aún cuando la primera línea de transimisión trifásica se realizó en Alemania en 1891 con 180 Km de longitud y 12000 Vac. El sistema de transmisión trifásico presenta la ventaja de que la potencia total suministrada es constante, siempre que el sistema esté equilibrado, mientras que en un sistema monofásico la potencia suministrada es pulsante, además de que, para una misma potencia a transmitir un generador monofásico (si se contruyera) es más grande y por lo tanto más caro que el trifásico correspondiente.

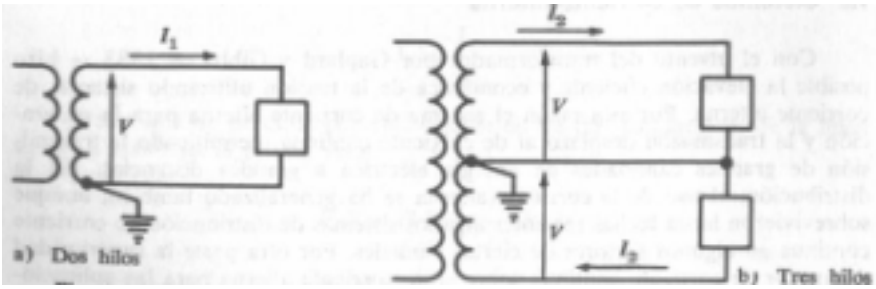


Figura 1.1
Sistemas monofásicos

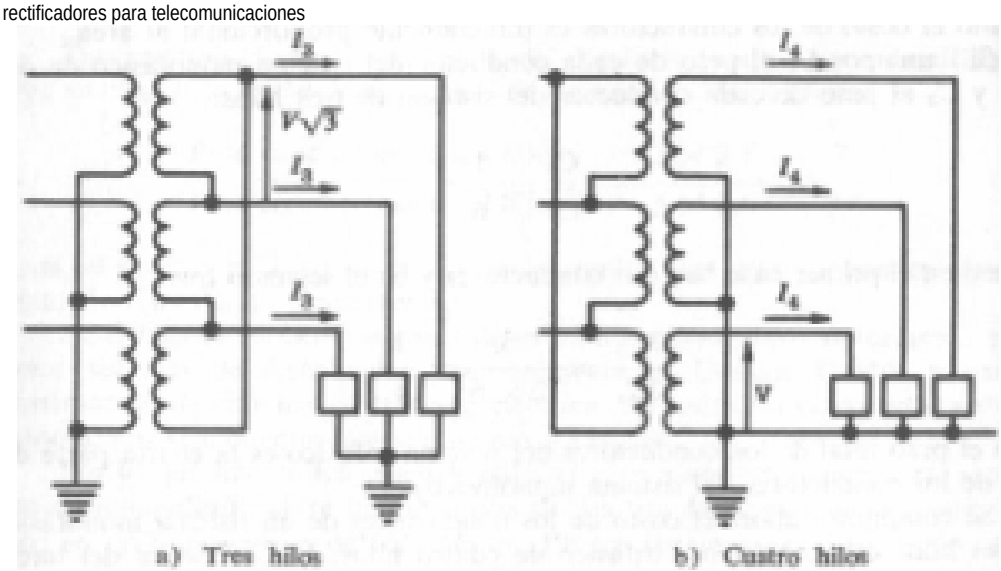


Figura 1.2
Sistemas trifásicos

Si comparamos un sistema monofásico de dos hilos con un sistema trifásico de tres hilos y a su vez con un sistema trifásico de cuatro hilos figuras 1.1 y 1.2, para efectuar la transmisión de la misma potencia para la misma distancia con las mismas pérdidas y con la misma tensión a tierra, pensando que es un sistema equilibrado y que todos tienen el mismo factor de potencia, para la misma longitud y la misma resistividad el área de la sección transversal de los conductores es inversamente proporcional a la resistencia y el peso, por tanto el costo de los conductores es directamente proporcional al área. El peso total de los conductores del sistema trifásico es la cuarta parte del peso de los conductores del sistema monofásico.

El sistema trifásico de cuatro hilos es más económico que el de tres hilos figura 1.2; actualmente solo se utilizan algunos sistemas monofásicos de distribución, la mayor parte de ellos alimentados desde sistemas trifásicos. En sistemas trifásicos; son de tres hilos siempre que el desequilibrio de las fases sea pequeño tendiendo a ser nulo, lo cual sucede en los sistemas de transmisión figura 1.3, pero en los sistemas de distribución la mayor parte de las veces son de cuatro hilos, especialmente en baja tensión.

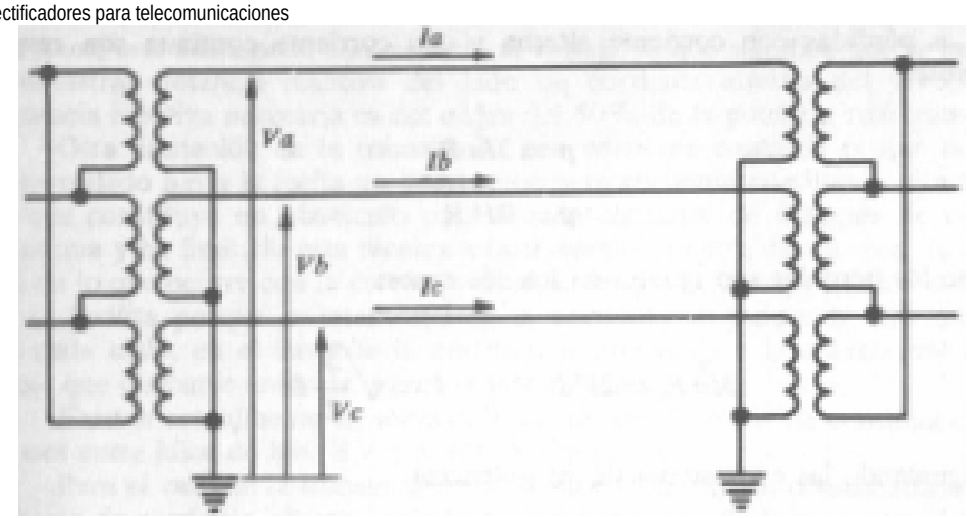


Figura 1.3
Sistema de transmisión trifásico de corriente alterna básico

Respecto a la frecuencia utilizada en un inicio se prefirieron frecuencias bajas para disminuir las reactancias inductivas de las líneas y por razones de diseño de los motores de tracción, comenzaron siendo de 25 Hz luego se usaron de 50 Hz y al final de 60 Hz debido a que a una frecuencia mayor permite utilizar circuitos magnéticos de menor sección para una potencia dada lo que da como resultado aparatos de menor tamaño y de menor costo. La figura 1.4 muestra una red de transmisión de potencia.

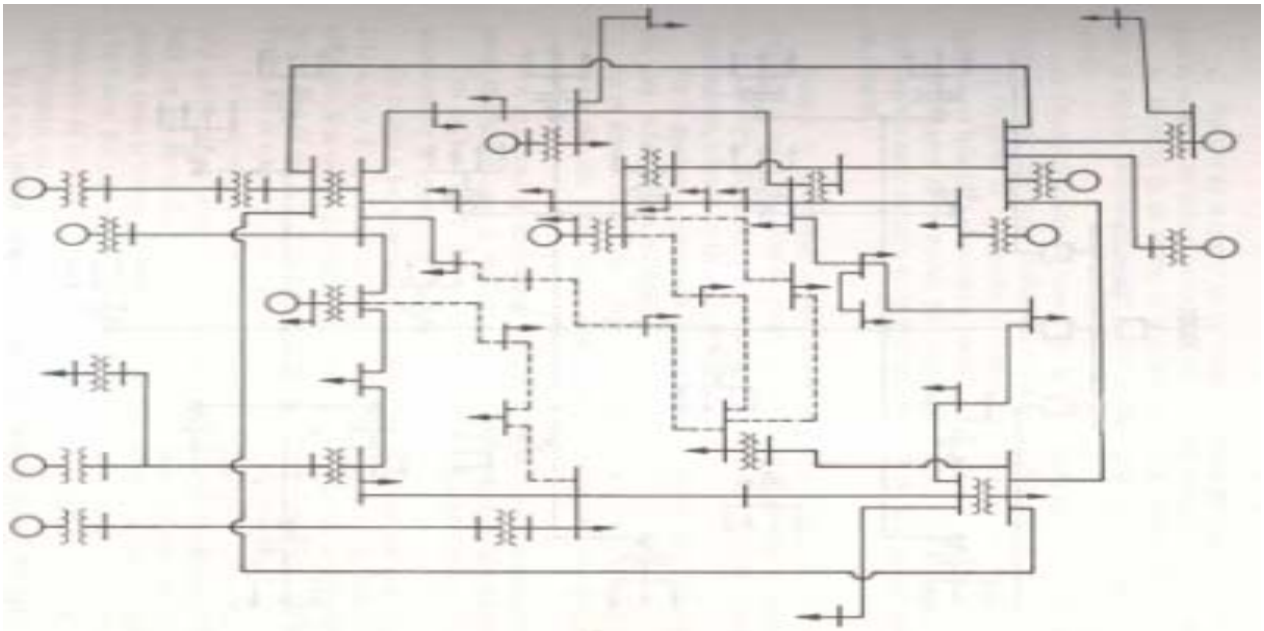


Figura 1.4
Sistema de transmisión de potencia eléctrica

Las fuentes de tensión para alimentación alrededor del mundo son diferentes, porque son variables de acuerdo a la posición geográfica del país donde se está trabajando o

proyectando e instalando que combinación de tensión y fases se dispone, de todas ellas se presentan algunas combinaciones de las mismas en la tabla 1.2.

Service	Configuration	L–L Volts	L-N Volts	Were used?	Notes
120/240V 1 PH 3W	Single Phase	240 VAC	120 VAC	USA, Canada	
120/208V 3PH 4W	Three Phase Wye	208 VAC	120 VAC	USA, Canada	
277/480V 3PH 4W	Three Phase Wye	480 VAC	277 VAC	USA	
347/600V 3PH 4W	Three Phase Wye	600 VAC	347 VAC	Canada	
208 V 3PH 3W	Three Phase Delta	208 VAC	N/A	USA, Canada	
480 V 3 PH 3W	Three Phase Delta	480 VAC	N/A	USA	
220/380 V 3PH 4W	Three Phase Wye	380 VAC	220 VAC	Europe Asia South America	

Tabla 1.2

Tensiones de alimentación y arreglos típicos (distribución en el lado del consumidor)

1.4 Calidad de energía

Definir la calidad de energía resulta una muy amplia concepción. Pero se puede decir que se define como la ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de tensión suministrado al usuario. Con especial atención en la estabilidad de tensión, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Actualmente la calidad de la energía es el resultado de una atención continua. En años recientes, esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas eléctricos, las cuales, por sí solas resultan ser una causa de degradación en la calidad de la energía eléctrica

Dada la importancia que representa la energía eléctrica en nuestra vida, la cual es usada en muchos campos de la vida cotidiana como la iluminación, la operación de diversos equipos, vídeo, aire acondicionado y sistemas de computo, así como en procesos industriales como de servicio, por ello es muy importante contar con una buena calidad de energía. La energía eléctrica además se ha empleado en la fabricación de la mayoría de las cosas que utilizamos. Por consiguiente los disturbios y variaciones de tensión que se producen en la red eléctrica afectan directamente al usuario.

Por citar un ejemplo, las depresiones de tensión por tan sólo cinco milisegundos son capaces de hacer que una computadora pierda su información o causar errores, es por esto que el incremento en el equipo de procesamiento de datos (computadoras) en la vida actual ha marcado al problema de la calidad de la energía como un problema muy serio.

Los disturbios no sólo afectan al equipo de los consumidores, sino que también perjudica la operación de la red de suministro. Los disturbios mencionados causan problemas como los que se citan a continuación:

a) Operación incorrecta de controles remotos.
b) Sobrecalentamiento de cables.
c) Incremento de las pérdidas reactivas de los transformadores y motores.
d) Errores en medición.
e) operación incorrecta de sistemas de protección.
entre otros

Debido a éstos problemas, algún componente de cualquier equipo puede sufrir un daño considerable al presentarse algún transitorio que rebase su nivel de aislamiento. Otro ejemplo, un rectificador puede llegar a fallar si es expuesto a una tensión transitorio arriba de cierto nivel.

Se puede decir, que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar técnicas, métodos y caminos efectivos para corregir los disturbios y variaciones de tensión en el lado del usuario, y de la misma forma, proponer soluciones para corregir las fallas que se presentan en el lado del sistema de la compañías suministradoras de energía eléctrica, para lograr con ello un suministro de energía eléctrica con calidad

1.4.1 Perspectivas

El problema de la calidad de la energía puede ser visto desde tres perspectivas diferentes:

- La primera de ellas, es la que corresponde al lado de los consumidores después del medidor, y es el impacto de los disturbios en los equipos.

- La segunda, también del lado de los consumidores, es que los fabricantes de equipos deben conocer los niveles de éstos disturbios y la frecuencia con que ocurren, para así determinar una tolerancia razonable para sus equipos.

- La tercera que concierne a ambos lados del medidor, es cómo los disturbios ocasionados por un consumidor afectan a otros consumidores que están conectados a la misma red de suministro

La compañía de suministro de potencia no puede darse el lujo de suponer que provee una excelente calidad de energía, ya que algunos de los disturbios quedan fuera del control de la empresa. Entre otros no puede tener el control de que una descarga atmosférica no caiga sobre ni en las cercanías de una línea de transmisión, o no puede evitar que algún desperfecto en algún equipo genere una interrupción de energía

Los fabricantes deben diseñar y construir equipos que puedan resistir niveles razonables de disturbios siempre basados en el conocimiento de diseño y en el área eléctrica. Los usuarios de equipo sensible a los disturbios pueden escoger entre dos opciones para eliminarlos, o al menos reducirlos: una es hacer un buen diseño del circuito de distribución y otra es utilizar equipo de acondicionamiento.

Algunos tipos de consumidores que requieren forzosamente equipos de acondicionamiento para mantener un buen nivel de calidad de energía eléctrica:

a) Sistemas de información que utilizan equipo de computo.
b) Departamentos de paramédicos y bomberos.
c) Empresas públicas (Gas, agua, energía eléctrica).
d) Aeropuertos.
e) Instituciones financieras.
f) Departamento de policía, entidades gubernamentales, etc.

Los términos usados para describir los disturbios frecuentemente tienen diferente significado para diferentes usuarios. Pero muchos atributos de calidad de energía son comúnmente reconocidos. A continuación se menciona una breve descripción de algunos de los disturbios más comunes.

Pico de tensión (spikes)

Es un incremento en el nivel de tensión que dura microsegundos. Es debido principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas y switcheo de grandes cargas. Fig 1.5

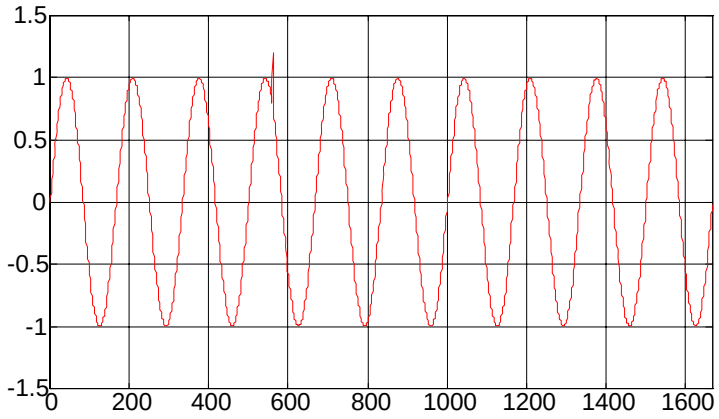


Figura 1.5. Pico de tensión

Depresión de tensión (sags)

Es un decremento momentáneo (varios ciclos de duración) en el nivel de tensión. Es debido a la conexión de grandes cargas, descargas atmosféricas y fallas en la red eléctrica. Fig 1.6

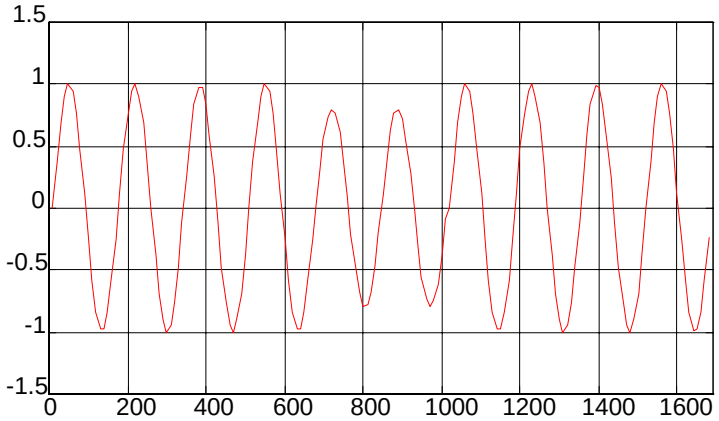


Figura 1.6. Depresión de Tensión

Dilatación de tensión (swell)

Es un incremento de la tensión de varios ciclos de duración. Es ocasionado por la desconexión de cargas grandes y no llega a ser un sobretensión. Fig 1.7

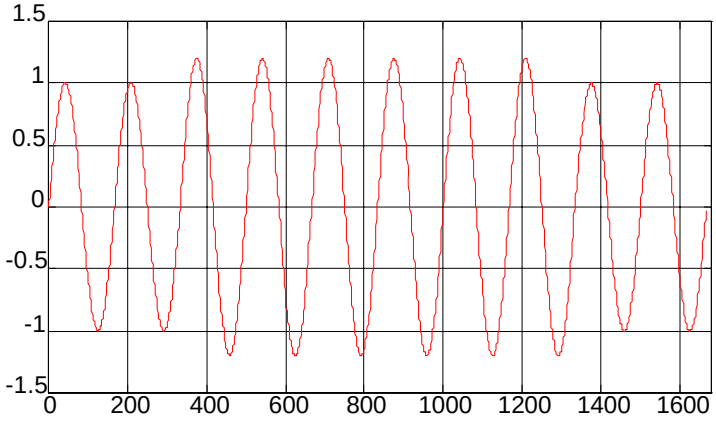


Figura 1.7. Dilatación de Tensión.

Sobretensión (power surge)

Es una condición de tensión elevada (arriba del valor nominal) que a diferencia del swell de tensión, dura mucho más tiempo. Es causado por una pobre regulación de tensión. Fig 1.8

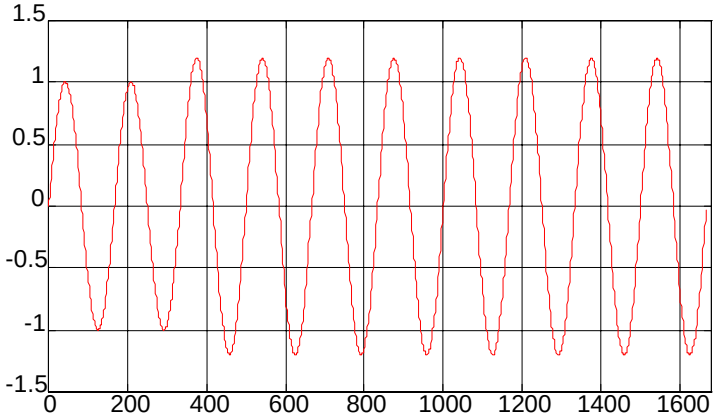


Figura 1.8. Sobretensión.

Parpadeo / centelleo (flicker)

Se refiere a las fluctuaciones en el nivel de tensión. Estas son debidas a la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos o por oscilaciones subarmónicas (subarmónicas se refiere a señales de frecuencia menor a la fundamental). Por lo general este efecto se observa fácilmente en el cambio de intensidad bajo y alto de lámparas y ruido acelerado y desacelerado de motores. Fig 1.9

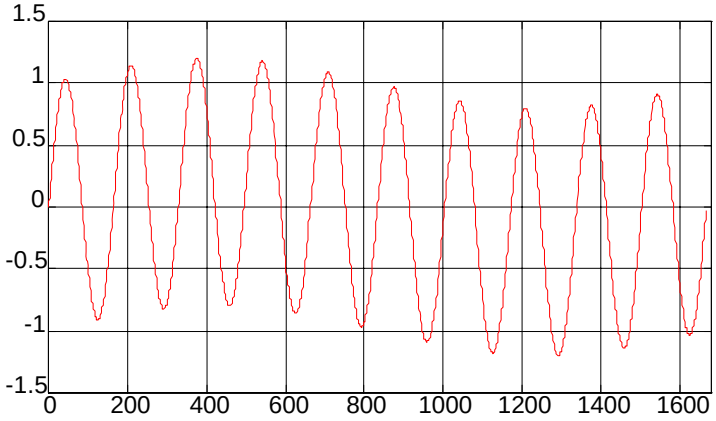


Figura 1.9. Parpadeo.

Interrupciones de energía (blackouts)

Es la pérdida total de potencia. Por lo general se considera interrupción cuando la tensión ha decrecido a un 15 % del valor nominal o menos. Este es debido a aperturas de líneas, daño de transformadores, operación de fusibles o equipos de protección de la red, entre otras posibilidades. También se consideran interrupciones de energía aquellas que duran milisegundos. Fig 1.10

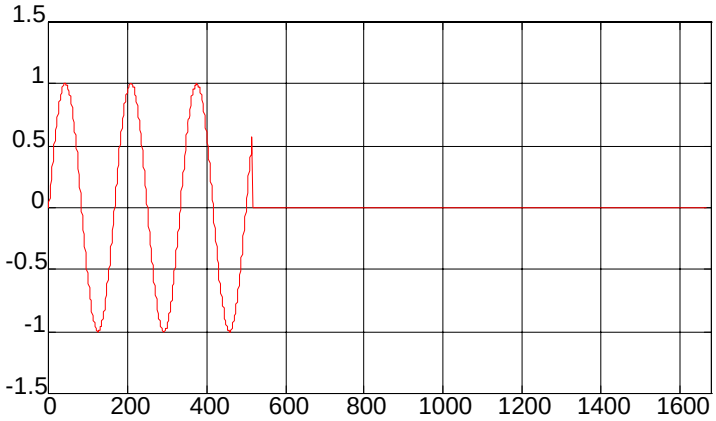


Figura 1.10. Interrupción de energía.

Ruido eléctrico

Es la distorsión (no necesariamente periódica) de la forma senoidal de tensión. Este es debido a switcheo, transmisores de radio y equipo industrial de arco eléctrico. Fig 1.11

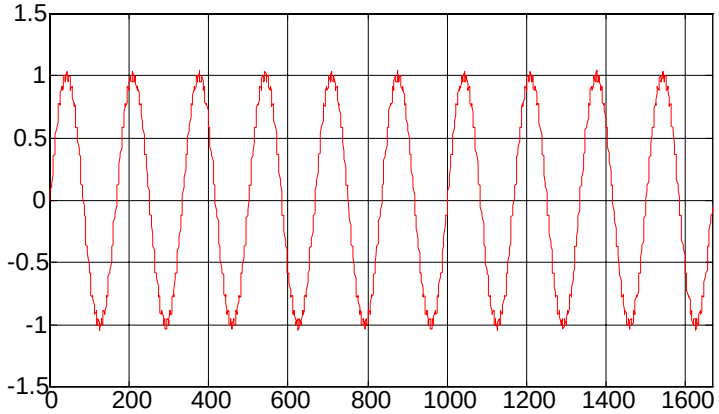


Figura 1.11. Ruido eléctrico.

Distorsión armónica

Es la distorsión (periódica) de la forma de onda senoidal de tensión o corriente. Esta es causada por la operación de equipos no lineales como lo son rectificadores y hornos de arco eléctrico. Este es un fenómeno en estado estable. Fig 1.12

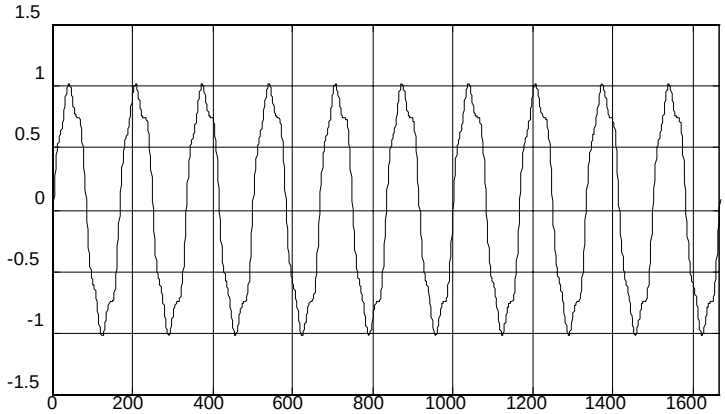


Figura 1.12. Distorsión armónica

Como se puede observar unos de los problemas más conocidos y que producen una gran cantidad de problemas por el efecto que produce son las armónicas, las cuales se tratarán en el presente trabajo.

Capítulo 2 Sistema de fuerza

2 Sistema de fuerza

2 Sistema de Fuerza

Como ya fue mencionado en un sistema de telecomunicaciones el hecho de tener un sistema ininterrumpido de suministro de energía es de vital importancia por ello se requieren de sistemas de fuerza que garanticen suministro de energía en todo momento, pensando que, en algunos casos por operación del cliente final, se requiere que oficinas adjuntas a sitios de comunicaciones que cuentan con equipos de oficina se mantengan trabajando también de forma ininterrumpida.

Un sistema de fuerza para aplicaciones de telecomunicaciones está conformado básicamente de:

- Rectificador(es); Elemento(s) de conversión de energía de ac-dc
- Batería; Elemento de respaldo de energía en dc (puede ser uno o mas bancos de baterías)
- Convertidor(es); Elemento(s) de conversión de energía dc-dc (no siempre).
- Inversor(es); Elementos que inviertan la energía de dc a ac (no siempre).
- Distribución; Elementos de protección distribuidos y organizados para suministro de energía a los equipos de telecomunicaciones
- Elementos de control que se encarguen de revisar y controlar los eventos (que sea posible) en el sistema de fuerza
- Equipo de monitoreo; elementos que mantengan al exterior información del estado de trabajo y valores de magnitudes de variables de operación del sistema de fuerza
- Desconexión de batería; Elementos para abrir el circuito ante una condición de operación programada

2.1 Rectificador

El rectificador o rectificadores son equipos de conversión de energía que cambian energía de ac que hay en su alimentación a dc para su aplicación como suministro de energía

para los equipos de telecomunicaciones y para mantener la batería cargada o en caso necesario suministrar carga a la batería, el esquema básico se puede observar en la figura 2.1.

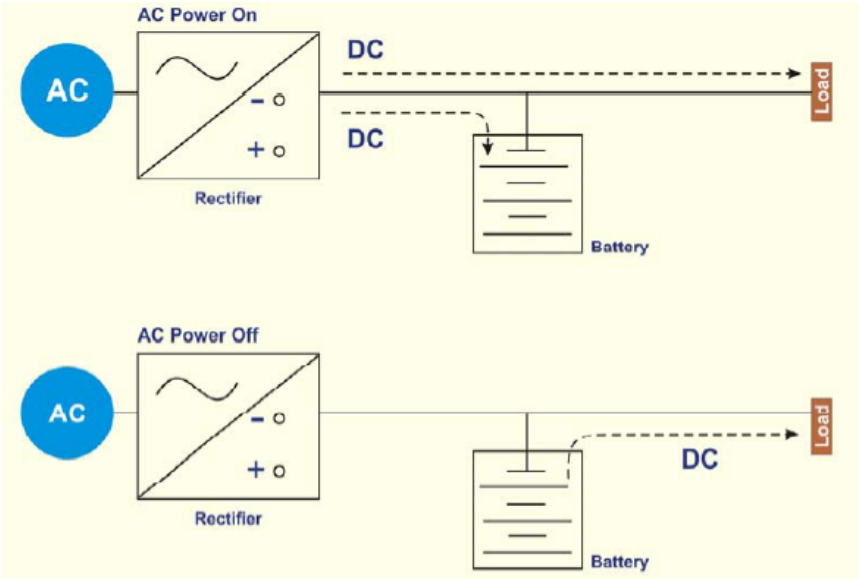


Figura 2.1
Operación básica de un rectificador (sistema de fuerza básico)

2.1.1 Conexión

La salida del rectificador(es) se conecta en paralelo tanto a la carga (por medio de la distribución) a los equipos de telecomunicaciones como a la(s) batería(s) (por medio de un contactor), los rectificadores tienen la facultad de poderse conectar en paralelo entre sí en una barra colectora de fuerza (bus; formada por una o varias barras de cobre o por cables) solo es necesario respetar su polaridad.

2.1.2 Operación en modo de flotación

Los rectificadores son ajustados de acuerdo con los requerimientos de tensión en nivel de flotación que requiere la batería así como para compartir suministro de tensión a la carga, al mismo tiempo teniendo otros rectificadores conectados en paralelo. Supongamos los siguentes tres eventos:

- Alterna disponible; el(os) rectificador(es) suministran corriente a las cargas y proveen una carga contínua de baja razón a las baterías para mantenerla(s) cargada(s) y disponible(s) para suministrar energía.

- Alterna no disponible; no hay equipos de rectificación disponibles, la batería suministra corriente a las cargas hasta que se considera como batería descargada de acuerdo a un nivel predeterminado (considerado dañino) por el fabricante de baterías (tensión final).
- Alterna disponible después de falla de alterna; nuevamente el rectificador suministra corriente a la carga pero ahora requiere suministrar una cantidad considerable de carga a la batería para que se recargue, allí debe considerar funcionar a nivel la tensión de igualación.

2.1.3 Dimensionamiento

Los rectificadores son dimensionados y seleccionados de acuerdo con la satisfacción, eficiencia, costo y efectividad de los requerimientos totales de capacidad; suma total de corriente requerida por las cargas que suministrará el sistema a tensión principal de operación (equipos de telecomunicaciones a través de la distribución), adicionarle la corriente de suministro que requerirá la batería en el punto que se considere descargada y sumándole también si necesario la carga que representa el sistema de inversores.

Redundancia; la redundancia es un concepto que determina la existencia de uno o más rectificadores de respaldo para que en caso de tener un(os) rectificador(es) averiado(s) el sistema tenga reserva para suministrar carga a los equipos que conforman el sistema de telecomunicaciones, a la batería y otras cargas, normalmente se considera como clásico tener un rectificador como reserva por lo que la redundancia clásica es de N+1 (N rectificadores dimensionados). Es un factor determinante el factor económico.

La tensión de salida de dc principal de acuerdo con los equipos de telecomunicaciones a alimentar puede ser - 48 V con positivo a tierra o + 24 V con negativo a tierra, el potencial aterrizado está conectado al punto común y el vivo es conectado por medio de elementos de protección (interruptores o fusíbles) a las barras del sistema de fuerza.

2.2 Batería

Es un conjunto de elementos electroquímicos (que se puede considerar como un solo elemento) que almacena energía de forma que cuando se interrumpe la alimentación en la sección de rectificación o cuando la corriente disponible desde los rectificadores es insuficiente para alimentar la carga en la distribución (equipo de telecomunicaciones) la batería suministra la corriente a la carga, puede ser utilizada en conjunto con un

generador para proveer respaldo al sistema durante tiempos prolongados, una batería consiste de una conexión en serie de varios elementos individuales llamados celdas hasta completar el nivel de tensión de diseño requerido por la carga. Regularmente el nivel de tensión nominal de una celda es de 2 V, así se tienen baterías formadas por 24 o 12 celdas según sea el sistema.

2.2.1 Conexión

La batería se conecta en paralelo a la sección de rectificadores y a la carga. Sin embargo cabe aclarar que el sistema de fuerza cuenta con dispositivos de desconexión de batería (desconexión por baja tensión LVD, interruptores o fusíbles) para protegerla de ser descargada en demasía y terminar dañada.

2.2.2 Operación

La batería en sí funciona como un elemento de reserva para suministro de energía a la carga y sistemas tanto de convertidores como de inversores (si están disponibles en el sistema de fuerza), tiene dos niveles de tensión asociados que de acuerdo con su tipo de fabricación y sustancia conformadora sirven de guía para su correcta carga, descarga, desconexión, mantenimiento y conservación de su vida útil.

La carga en flotación es la tensión recomendada por su fabricante el cual es dependiente de la temperatura (función de) para garantizar que la batería mantiene su carga disponible para entrar a suministrar corriente a la carga (cuando sea necesario), de manera que los químicos que la conforman se mantienen en nivel (eléctrico). La carga en igualación es la tensión recomendada (tambien dependiente de la temperatura) que es requerido para restablecerse luego de un periodo de suministro prolongado de corriente a la carga o desde nueva (dado el periodo de almacenamiento del distribuidor) para garantizar que la batería se recarga en un nivel aceptable. Regularmente se consideran periodos de recarga (igualación) típicos de 6, 12 o 24 horas, 6 horas no es común, siendo el dato anterior muy importante para la selección de rectificadores del sistema de fuerza. Ver tabla 2.1.

2.2.3 Dimensionamiento

Los elementos que conforman las baterías (celdas) no tienen un comportamiento lineal, existen funciones que tipifican el mismo pero que para fines prácticos resultan de difícil

manejo motivo por el cual los fabricantes de las mismas proporcionan tablas y/o gráficas que tipifican su comportamiento para que los diseñadores y proyectistas puedan manejar los datos con facilidad y logren dimensionar de acuerdo con los requerimientos establecidos por sus necesidades. Sin embargo se pueden considerar los siguientes puntos para dimensionar y seleccionar las opciones:

Parameter	Valve Regulated Lead Acid Battery (VRLA)			Flooded or Vented Battery		
	One Cell	24 V System	48 V System	One Cell	24 V System	48 V System
Nom. V	2	24	48	2	24	48
Float V	2.25	27	54	2.20	26.4	52.8
Equalize V	2.30	27.6	55.2	2.30	27.6	55.2
End V	1.75	21	42	1.75	21	42
Op. Win. V	1.75-2.30	21-27.6	42-55.2	1.75-2.30	21-27.6	42-55.2
# cells	1	12	24	1	12	24

Tabla 2.1
Parámetros típicos de operación de baterías

1. Determinar el perfil de carga, el respaldo (lo que corresponde a los amper/hora), seleccionando conforme las tablas disponibles, de acuerdo a los fabricantes, el modelo y tipo de batería; siguiendo los criterios de:

   - Temperatura de referencia, de acuerdo con los estándares a cubrir americano 25°C o europeo 20°C.
   - Tensión final; es el nivel de tensión al que se considera que los elementos (celdas) están ya en su límite y es el mínimo a considerar sin daño de los mismos, entre más conservador sea, la expectativa de vida de la batería se mantiene. Tabla 2.2

     Es necesario tomar en cuenta las directrices para el dimensionamiento y cálculo de la capacidad de la batería, para perfiles de carga completos, evaluar la razón de carga de batería para dimensionar los conectores intercelda, llamados también eslabones.

2. Aplicar el factor de corrección de ejecución aplicable a temperatura para una temperatura promedio por debajo de 25°C cuando sea aplicable. Ver tabla 2.3

3. Garantizar que la tensión de operación de la batería coincide con el rango de tensión de operación para el equipo de telecomunicaciones conectado de acuerdo con su tolerancia.

Discharge rates in amperes.

1.215 Sp. Gr. Electrolyte @ 77°F (25°C), including cell connectors.

TYPE	Nom. A.H. CAP.	72 hr.	24 hr.	12 hr.	8 hr.	5 hr.	4 hr.	3 hr.	2 hr.	1.5 hr.	1 hr.	30 min.	15 min.	1 min.	To 1.50 VPC 1 min.
To 1.75 VPC Final															
EA-5	230	4.6	11.1	18.8	26.6	44.0	49.9	59	75	87	102	152	197	290	530
EA-7	270	4.8	12.9	23.7	33.3	49.0	58.5	73	98	120	154	226	291	426	790
EA-9	350	6.4	17.2	31.6	44.4	65.3	78.0	97	131	160	205	298	380	548	1010
EA-11	440	8.0	21.5	39.5	55.5	81.7	97.5	122	164	199	257	367	465	685	1270
EA-13	530	9.6	25.8	47.4	66.6	98.0	117	146	197	239	308	435	558	792	1460
EA-15	620	11.2	30.1	55.3	77.7	114	137	171	229	279	359	507	651	924	1700
EA-17	710	12.8	34.4	63.2	88.8	131	156	195	262	319	411	571	728	1010	1870
EA-19	800	14.4	38.7	71.1	99.9	147	176	219	295	359	462	634	801	1100	2030
EA-21	890	16.0	43.0	79.0	111	163	195	244	328	399	513	694	870	1190	2200

*Rates shown depict average values and are subject to IEEE-485

Constant Current Discharge Ratings Amperes @ 77°F (25°C).

End Point Volts per Cell	Operating Time To End Point Voltage																	
	5 min.	15 min.	30 min.	60 min.	2 hr.	3 hr.	4 hr.	5 hr.	6 hr.	7 hr.	8 hr.	10 hr.	12 hr.	20 hr.	24 hr.	48 hr.	72 hr.	100 hr.
1.75	274	162	105	61.5	34.8	25.0	19.6	16.2	14.0	12.3	11.0	9.08	7.79	5.00	4.19	2.13	1.43	1.04
1.80	240	151	99.0	60.1	34.0	24.2	19.0	15.8	13.6	11.9	10.7	8.80	7.58	4.89	4.10	2.10	1.42	1.03
1.85	203	136	92.0	55.0	31.4	22.8	18.0	15.0	12.9	11.3	10.1	8.44	7.23	4.67	3.92	2.02	1.37	0.99
1.90	156	110	75.0	47.0	28.9	21.0	16.8	14.0	12.0	10.6	9.50	7.90	6.73	4.34	3.65	1.88	1.26	0.91

Tabla 2.2

Tabla típica de ejecución / funcionamientoo (performance) de baterías

4. Aplicar el factor de reducción de la razón su capacidad nominal por operación a altas temperaturas, inicio y fin de vida (porque se altera), dicho factor es 20% y es permisible para:
   - Baterías embarcadas a menos del 100% de capacidad, típicamente 90% (el 100% es logrado luego de un corto periodo de puesta en servicio en tensión de flotación).
   - La tensión final de batería (fin de vida) considerando como 80% de su capacidad. Ver figura 2.2

5. La capacidad de la batería está determinada por el número y tamaño de celdas por lo que una gran batería implica un tamaño grande.

Electrolyte °C	Temperature °F	Cell size correction factor
-3.9	25	1.520
-1.1	30	1.430
1.7	35	1.350
4.4	40	1.300
7.2	45	1.250
10.0	50	1.190
12.8	55	1.150
15.6	60	1.110
18.3	65	1.080
18.9	66	1.072
19.4	67	1.064
20.0	68	1.056
20.6	69	1.048
21.1	70	1.040
21.7	71	1.034
22.2	72	1.029
22.8	73	1.023
23.4	74	1.017
23.9	75	1.011
24.5	76	1.006
25.0	77	1.000
25.6	78	0.994
26.1	79	0.987
26.7	80	0.980
27.2	81	0.976
27.8	82	0.972
28.3	83	0.968
28.9	84	0.964
29.4	85	0.960
30.0	86	0.956
30.6	87	0.952
31.1	88	0.948
31.6	89	0.944
32.2	90	0.940
35.0	95	0.930
37.8	100	0.910
40.6	105	0.890
43.3	110	0.880
46.1	115	0.870
48.9	120	0.860
51.7	125	0.850

Tabla 2.3
Tabla para corrección de ejecución (performance) de baterías

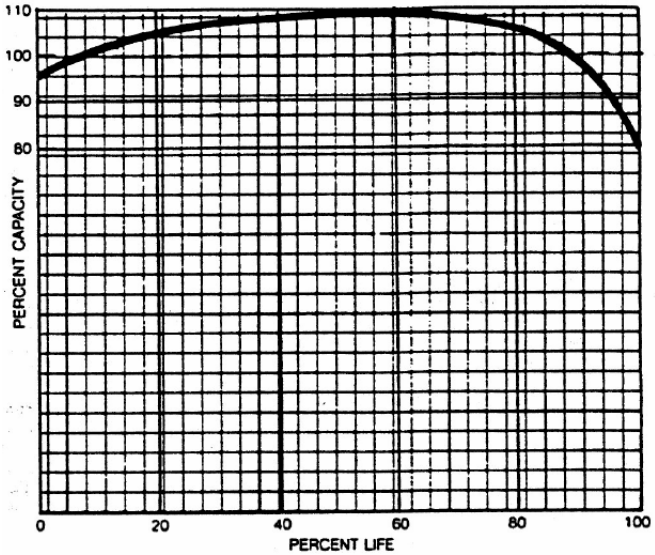


Figura 2.2
Ejecución de batería v.c. tiempo (vida de batería)

6. Bancos de baterías pueden ser conectados en paralelo para obtener capacidad adicional, es decir, se puede obtener un aumento en la capacidad, los bancos que se conecten deberán ser de la misma capacidad en todos sus parámetros y los

cables de conexión deben ser del mismo calibre y longitud para obtener características óptimas de carga y descarga, el número máximo de bancos recomendados es de tres.

7. Pequeñas aplicaciones comúnmente utilizan baterías de un solo bloque, las cuales tienen más de una celda en un ensamble. (Las baterías de automóvil son de ese tipo).

2.2.4 Características y criterios de selección

Hay tres tipos principales de baterías de ácido de plomo que son utilizadas en aplicaciones de telecomunicaciones, esos tipos de baterías, de acuerdo con la clasificacion ácida se encuentra en la tabla 2.4.

Acid Classification	Description	Advantages	Disadvantages
Flooded Technology	free liquid electrolyte, similar to an automotive battery	-proven technology -flat, tubular, plant options -best life expectancy of lead acid batteries at higher operating temperatures	-high maintenance -transportation restrictions
VRLA-AGM (Absorbed Glass Mat) Technology	a small quantity of liquid electrolyte is held in suspension in the fiberglass mat	-low maintenance -minimal vented gasses -easy installation in any position -easier shipping classification -will not freeze	-difficult to evaluate battery state of health -rapid reduction of life expectancy when operated at high temperatures (above 25 deg C)
VRLA-Gel Technology	fumed silica is added to gel the liquid electrolyte	-lasts longer than AGM at high operating temperatures	-performance (AH per kg) is less than AGM battery

Tabla 2.4
Clasificación y carcterísticas principales de baterías

1. Requerimientos de ciclado; diferentes aleaciones de platos de celdas y diferentes configuraciones afectan el funcionamiento de los ciclos de carga y descarga (ciclado) de la batería, determinar los requerimientos de ciclado de acuerdo con la aplicación, puede ser, flotación con ciclo ligero, flotación con ciclo pesado y servicio en ciclo total, elegir la batería que concuerde con dichos requerimientos.

2. Razón de descarga
   - Alta < 15 min

- Media >= 15 min =< 2 hr
- Baja > 2 hr

3. Mantenimiento

4. Parámetros físicos de diseño; espacio disponible, carga en el piso (peso), ventilación.

5. Costo; incluyendo la esperanza de vida, vida útil.

6. Baterías de ácido de plomo reguladas por válvula (VRLA; valve regulated lead acid) de tipo AGM (absorved glass mat; material de vidrio absorvente) y gel son a menudo la primera elección para respaldo, algunas de las características importantes a ver en una batería VRLA son:
   - Material absorvente de impactos, con baja razón de difusión de vapor de agua, es decir polipropileno o PVC (polivinilocarbonato) para prevenir que se seque.
   - Materiales absorvente de impactos y retardantes de flama
   - Compresión regular de sus platos a través de un método fijo de compresión por absorción de impactos para mantener la integridad del separador microporo y del plato (AGM)

   Diseñado para prevenir corrosión de sus barras y terminales (AGM)

7. Empaque, embalaje; la batería puede ser empacada celda por celda o puede estar atornillada toda junta en un autosoporte de su construcción, para bancos de baterías pequeños el uso o el empleo de estructuras metálicas tubulares o gabinetes (rack) puede ser una opción, también hay baterías AGM disponibles preempacadas desde fábrica para fácil instalación en una estructura de metal..

2.3 Distribución

El conjunto de fusibles e interruptores de protección utilizados para distribuir con seguridad dc a los equipos de telecomunicaciones (cargas) desde el grupo de rectificadores o el banco de baterías, dichos dispositivos protegen a las cargas y a los cables que conectan las mismas de corto circuitos, condiciones de sobrecarga y dan la posibilidad de desconexión manual, permiten aislar fallas entre circuitos, también son

utilizados para proteger a la batería y a sus cables y para permitir un fácil medio de desconexión de batería para seguridad, mantenimiento y prevención de incendios.

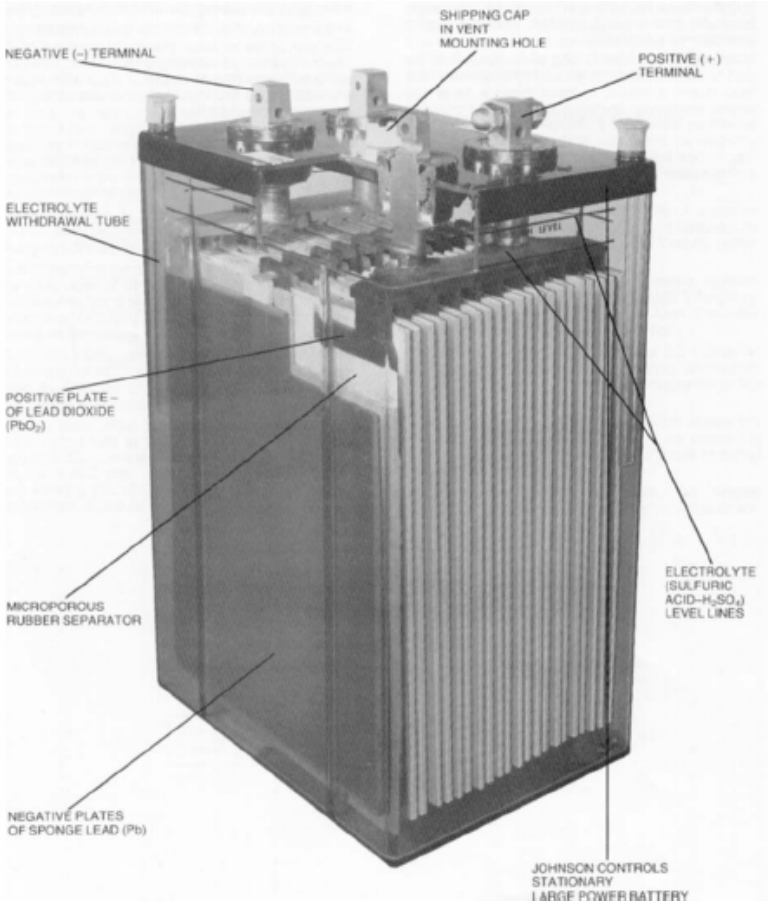


Figura 2.3
Construcción de una celda de batería de ácido de plomo

2.3.1 Conexión

1. Distribución primaria, protecciones localizadas en el sistema de potencia, conectadas en serie entre el sistema de potencia, las cargas y la batería.
2. Distribución secundaria; protecciones grandes principales son instaladas en el sistema de potencia para distribuir potencia de dc a las baterías. Se muestra la conexión básica en la figura 2.4

2.3.2 Operación

1. Fusibles; corriente excesiva fluyendo a través de un fusible rompe su sección desconectando la carga del sistema de potencia, un fusible guarda está en paralelo con el principal y se romperá cuando el principal se rompa, el fusible

guarda provee una indicación local (señal/indicador) y también enviará una señal de alarma externa vía un contacto auxiliar empotrado.

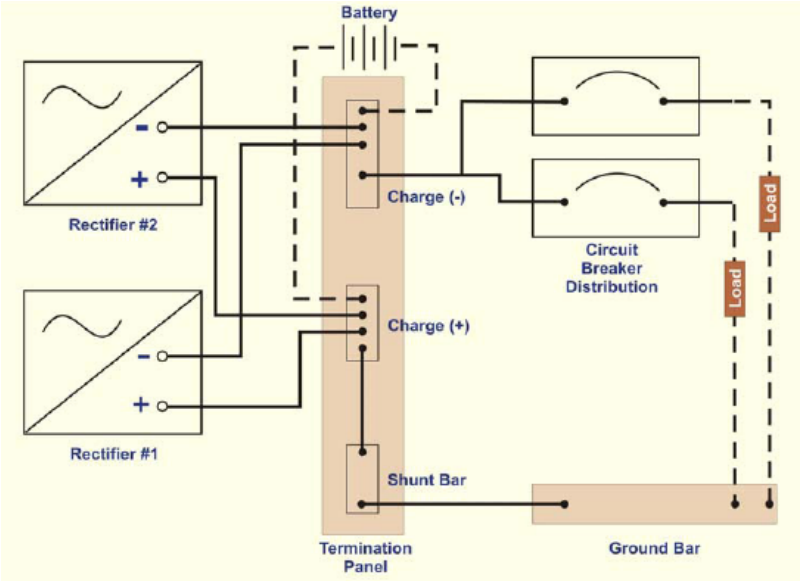


Figura 2.4
Sistema de potencia básico con distribución

2. Interruptores; corriente excesiva fluyendo a través de un interruptor causa calor excesivo (térmico) o un campo magnético excesivo para dispararlo a la posición de apagado, una alarma es enviada vía contactos auxiliares o circuitería de detección electrónica de disparo.
3. Circuitería de detección electrónica de disparo; es una resistencia de derivación (bypass) de 10 kW (para limitar la corriente) está conectada a través del interruptor, la tensión de salida del interruptor es monitoreado, el beneficio del circuito es que se indica una alarma únicamente cuando un interruptor es apagado con una carga conectada y no es necesaria conexión a contactos auxiliares.

- Interruptor encendido sin carga, la tensión de salida es alta no hay alarma.
- Interruptor encendido con carga, la tensión de salida es alta no hay alarma.
- Interruptor apagado sin carga, la tensión de salida es alto (debido a la resistencia de derivación, bypass) no hay alarma.
- Interruptor apagado con carga, la tensión de salida es baja (debido a la carga forzando tensión bajando a cero) hay alarma.
    i. La tensión será medida en la salida aún cuando el interruptor está apagado, sin embargo, el flujo de corriente está limitado a unos cuantos mA debido a la resistencia de derivación (bypass).

4. Dimensionamiento

- Muchos equipos de comunicaciones requieren de fusibles o interruptores de fusión rápida (con curvas de retraso cortas) para proveer la protección apropiada, pueden ser utilizadas diferentes curvas para igualar requerimientos específicos de carga.
- Deben ser dimensionados en 1.25 o 1.5 veces la carga contínua anticipada en el elemento de protección para operación realizable.
- De la misma forma se dimensionan las protecciones de batería al 125 veces la razón de corriente máxima de todos los rectificadores en el sistema como mínimo. Garantizar que la capacidad de corriente del panel de protectores no es excedida por la corriente drenada a las cargas.
- La capacidad de interrupción de los dispositivos de protección debe igualar a la aplicación, las protecciones de batería requieren alta capacidad de interrupción debido a la alta capacidad de corriente de corto circuito de batería y cables de sección transversal grande (baja impedancia).

5. Características y criterios de selección.

- Envío de alarma remota; vía fusible guarda o contactos remotos en el interruptor
- Indicador de alarma; relevador aislado, led o lámpara.
- Método de instalación; puede ser; fijación con tornillos, insertable y desinsertable o montable en riel
- Detección electrónica del disparo

6. Combinación; varios tipos de fusibles e interruptores pueden ser combinados en diferentes páneles para cumplir con todos los requerimientos de la carga.

7. Monitoreo de corriente; vía resistencia de baja relación y respuesta lineal (shunt) en serie para garantizar que no habrá sobrecarga o consumo de potencia monitoreado para efectos de facturación y cobranza.

8. Protección de batería:

- Apagado emergente de potencia EPO (emergency power off); capacidad de controlar mediante el uso de un contactor o interruptores de disparo para sitios que requieran una desconexión de potencia de emergencia para cumplir con códigos locales de incendios (requerimientos impuestos).

- Desconexión de batería por baja tensión LVD (low voltage disconect); controla la capacidad de desconectar y reconectar automáticamente la batería después de una falla de suministro prolongada.
- Desconexión manual de batería; dispositivos de protección y desconexión manuales para efectos de mantenimiento o aislamiento de una falla.

9. Diferencias entre fusíbles e interruptores
   - Características de fusibles; alta capacidad de interrupción, rápida velocidad de respuesta, costo mínimo (menor) y flexibilidad.
   - Características de interruptores; presición, baja velocidad de respuesta y pueden restablecidos (reset).

2.4 Barra(s) colectora(s) de retorno de batería o de tierra común (batery return bus)

Las barras colectoras de retorno de batería (o bus de tierra común) proveen un punto y una vía de retorno y referencia del común tanto para las cargas como para el sistema, ese punto de referencia de común está conectado a la tierra del sitio para proveer una vía de baja impedancia a tierra para ruido y transitorios, provee una referencia para el equipo conectado.

2.4.1 Conexión

Todos los cables de tierra de todas las cargas de dc, baterías y rectificadores deben ser conectados a éste punto, éstas barras colectoras (bus) deben ser conectadas al anillo de tierra del sitio.

2.4.2 Dimensionamiento

Las barras de tierra deben ser dimensionadas de acuerdo con los requerimientos de carga.

2.4.3 Características

1. Las barras deben estar preparadas para aceptar terminales de doble perforación y para varios tamaños de las mismas.

2. Deben estár aisladas de la estructura y del gabinete por medio de aislantes de manera que el sistema de potencia puede ser integrado correctamente con conexiones al punto de tierra del sitio.
3. Provisiones para terminación de cables pequeños conectores.
4. Resistencia a corrosión por construcción de cobre estañado.

2.5 Control y supervisión del sistema

En muchos sistemas de potencia es deseable tener un control centralizado, un centro de acopio de información por medio de un panel central, para proveer tanto indicaciones de tipo local como de tipo remoto de los parámetros de funcionamiento del sistemas de fuerza así como de los avisos llamados alarmas (alarma = aviso de algún evento ocurrido) generadas para proveer a los ingenieros de soporte de información para la toma de decisiones respectiva.

2.5.1 Conexión

Son necesarias varias conexiones para colocar un panel de supervisión, unas desde varios de los componentes del sistema de manera para que diferentes parámetros y niveles pueden ser monitoreados y en algunos casos controlados. Resistencias de baja razón y respuesta lineal (shunts) deben ser instaladas en la carga o en tierra o en los conductores del sistema. Ver la figura 2.5

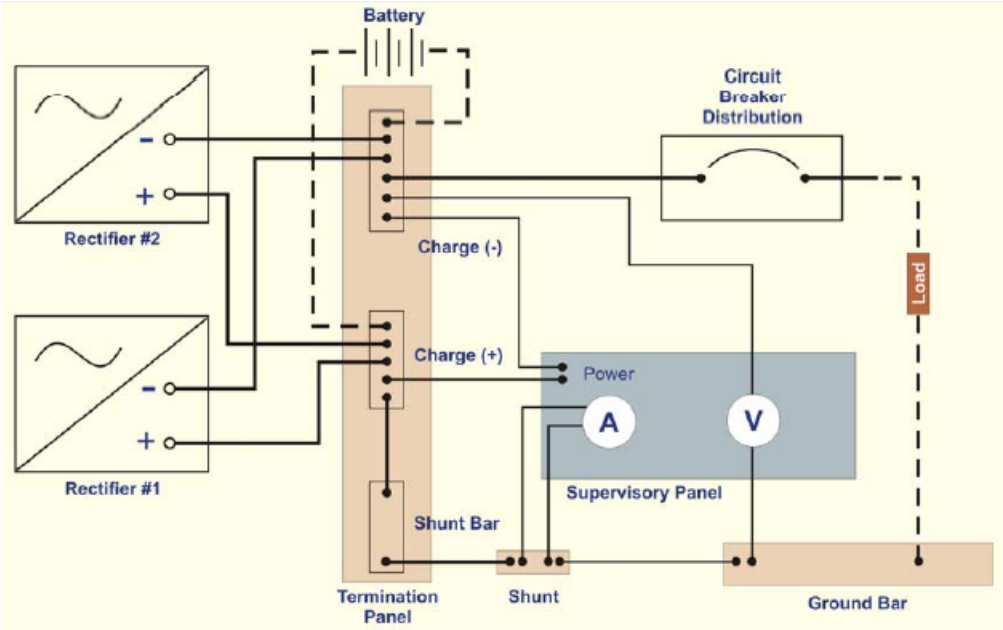


Figura 2.5
Sistema de potencia básico con distribución y panel supervisor

Los sistemas de potencia desde hace mucho tiempo han sido diseñados teniendo paneles locales de supervisión y han sido provistos de terminales específicas para que difrentes avisos (alarmas) y variables sean acopiadas de forma remota en centrales de diagnóstico, supervisión y control de las compañías de telecomunicaciones que venden sus servicios, para ello existen varias formas de envío de dichas señales. El par trenzado telefónico es una de ellas por medio de un modulador – demodulador (modem) a ambos lados del sistema y software de intercomunicación. Existen otras alternativas de transmisión de información por medio de enlace celular entre otros.

2.5.2 Operación

La carga y descarga de batería es monitoreada con conexión directa de cables a la fuente, batería y la carga. la corriente es monitoreada por medio de una resistencia de baja razón y respuesta lineal (shunt) externa, los shunts son resistencias calibradas de baja resistencia diseñadas para proveer una caída de tensión específica a una corriente específica por medio de una relación lineal, esa caída de tensión es medida por un ampermetro, por ejemplo un típico shunt es para 200 A y 50 mV por lo que solo cuando tenga una carga de 200 A tendrá una tensión de 50 mV.

Solo valores calculados pueden ser desplegados tal como la corriente total de salida, en sistemas donde no hay shunt de batería puede ser calculada una estimación de corriente mediante la resta la corriente de descarga de la corriente total que proporcionan los rectificadores.

Las temperaturas de la sala y de la batería pueden ser monitoreadas por medio de puntas de prueba. Parámetros analógicos adicionales pueden ser monitoreados empleando entradas variables disponibles. Eventos como alarma de fusible en distribución, alarma de batería (alarma = aviso de algún evento ocurrido), falla de rectificador, falla de convertidor son monitoreadas por medio de paneles de supervisión.

Las alarmas están basadas en un evento analógico o digital, cada alarma tiene de entre dos y cinco segundos de retraso en su presentación, el retraso elimina un disparo falso debido a transitorios o alarmas falsas, las alarmas analógicas a menudo incorporan hysteresis (ver sección de conceptos y definiciones capítulo 13) en el nivel de disparo para prevenir oscilación de una condición de alarma causada por fluctuaciones de nivel

alrededor del nivel ajustado, las funciones de alarma proveen indicadores tanto local (visual y/o auditiva) como remoto (relevador).

Los contactos del relevador pueden ser configurados como A (NO; normalmente abierto) B (NC; normalmente cerrado) y C (C; común).

Las funciones de control son extendidas desde el panel de supervisión para controlar otros varios sistemas de potencia. Los sistemas de supervisión basados en arquitectura de microprocesador en sus paneles tienen comunicación directa con los rectificadores para monitorear y controlar la tensión de trabajo del sistema, por medio de un puerto de comunicaciones. Un sistema de control y monitoreo puede tener varios sistemas de fuerza conectados.

2.5.3 Dimensionamiento

Las resistencias de respuesta linel (shunts) son dimensionados de acuerdo a los requerimientos de carga y limitan la capacidad inicial del sistema de potencia, la corriente fluyendo a través de un shunt no debe exceder el 80% de su capacidad nominal en una base contínua.

2.5.4 Características de un panel de control y supervisión

Los paneles de control y supervisión son dispositivos que mantienen en todo momento información sobre el funcionamiento del sistema de fuerza clasificados en diferentes categorías:

1. Alarmas generadas
   - Alarmas principales o de sistema principal
   - Alarmas de rectificadores
   - Alarmas de convertidores y / o de inversores o del sistema secundario
   - Alarmas de comunicaciones entre control y sistema

2. Mediciones del sistema de fuerza
   - Mediciones de parámetros principales
   - Mediciones de carga de elementos del sistema
   - Mediciones de batería

3. Ajustes
   - Ajustes de parámetros del sistema
   - Ajustes de umbrales (niveles) de alarmas
   - Ajustes de desconexiones de batería y reconexiones

4. Configuraciones del sistema
   - Inventario de elementos instalados en el sistema
   - Rectificadores habilitados/deshabilitados
   - Operación y temporización de modos de operación del sistema de fuerza
   - Modo igualación en automático

5. Calibraciones
   - Calibración de los sistemas
   - Calibración de compensador de temperatura

Entregan señales luminosas, en ocaciones auditivas y en pantalla si es disponible (si tiene) dependiendo del modelo y complejidad del sistema de fuerza así como del sistema de control y supervisión.

No todos los sistemas de fuerza tienen todas las características mencionadas a gran escala en el párrafo anterior pues depende de la tecnología en rectificación que se tiene instalada o que se compra y si se ha adquirido un sistema de monitoreo, supervisión y control por medio de tecnología de microprocesador o sin ella así como con o sin capacidad de reporte y habilitación / desabilitación o modificación de parámetros remota. El párrafo describe un sistema demasiado completo.

1. Alarmas generadas

   - Paro de emergencia HVSD / OVP
   - Alta corriente en el sistema principal CURR
   - Alta tensión en sistema principal 2, HV2
   - Alta tensión en sistema principal 1, HV1
   - Batería en descarga BOD o Baja tensión en sistema principal 1, LV1
   - Batería descargada profundamente 50%BOD o Baja tensión en sistema principal 2, LV2
   - Desconexión por baja tensión activada LVD

   - Interruptor / fusíble apagado en el sistema principal FA

- Mayor sistema principal MJ
- Menor sistema principal MN
- Rectificadores dañados ## RF
- Falla de comunicaciones entre control de sistema y algún(os) equipos del sistema
- Alto nivel de tensión en alimentación ac HAC
- Bajo nivel de tensión en alimentación ac LAC
- Nivel de tensión en alimentación nulo ac ACOFF (no hay alterna)

- Alta corriente en el sistema secundario (convertidores) SUBSYSCURR
- Alta tensión en sistema secundario (convertidores) SUBSYSHV
- Baja tensión en sistema secundario (convertidores) SUBSYSLV
- Interruptor / fusíble apagado en distribución del subsistema (convertidores) SUBSYSFA
- Mayor sistema secundario SUBSYSMJ
- Menor sistema secundario SUBSYSMN

- Rectificador en paro por emergencia EMERGSTOP
- Falla de ac en alimentación de rectificador ACFAIL
- Alta tensión en alimentación de ac HACLINE
- Falla de ventilador FANFAIL
- Interruptor apagado BKROFF
- Desconexión por alta tensión (shutdown) activado HVSACTIVE
- Falla de convertidor A/D A/DFAIL
- Falla de convertidor CONVERTER
- Alta temperatura HTEMP
- Sensado abierto OPENSNS
- Sin comunicación NOREPLY

2. Mediciones del sistema de fuerza

- Nivel de tensión del sistema principal (V dc) flotación o igualación
- Nivel de carga del sistema principal (A dc)
- Nivel de carga de rectificadores (A rect dc) global y por rectificador
- Nivel de tensión del sistema secundario (convertidores) (V dc)
- Nivel de carga del sistema secundario (convertidores) (A dc)
- Nivel de carga de convertidores (A conv dc) global y por convertidor

- Nivel de carga de batería (A bat dc)

3. Ajustes

- Nivel de tensión de flotación FLOAT, V
- Nivel de tensión de igualación EQ, V
- Nivel de tensión de desconexión por alta tensión HVS / OVP, V
- Nivel de corriente máximo CURRLIM, A
- Nivel de corriente de batería BATLIM, A

- Alarma por alta corriente en el sistema CURR
- Alarma por alta tensión en sistema principal 2, HV2
- Alarma por alta tensión en sistema principal 1, HV1
- Alarma por batería en descarga BOD o Baja tensión en sistema principal 1, LV1
- Alarma por batería descargada profundamente 50%BOD o Baja tensión en sistema principal 2, LV2
- Alarma por alta corriente en el sistema secundario (convertidores) SUBSYSCURR
- Alarma por alta tensión en sistema secundario (convertidores) SUBSYSHV
- Alarma por baja tensión en sistema secundario (convertidores) SUBSYSLV

- Nivel de tensión de desconexión por baja tensión LVD, V
- Nivel de tensión de reconexión de batería y sistema LV RECON, V

4. Configuraciones del sistema
   - Inventario de elementos del sistema
   - Rectificadores habilitados/deshabilitados
   - Operación y temporización de modos de operación del sistema de fuerza, periodo de igualación
   - Modo igualación en automático

5. Calibraciones
   - Calibración de los sistemas
   - Calibración de compensador de temperatura

Controles; las características del control para el sistema de fuerza tales que se obtenga información del funcionamiento de los rectificadores, inversores, convertidores y contactores.

Igualación manual; permite al usuario colocar los rectificadores en modo de operación de igualación por medio de un interruptor común que es utilizado para mantenimiento cuando se tienen baterías VRLA, es decir, funcionamiento a tensión de igualación de las celdas de batería.

Igualación automática; es común en aplicaciones donde baterías selladas están descargadas, colocando los rectificadores en igualación durante un periodo de tiempo preprogramado, es utilizado con baterías de válvula flotadas a baja tensión para prevenir sulfatación o donde es requerida una recarga rápida de batería luego de una falla prolongada en alterna y es iniciada mediante una de tres vías.

1 Luego de una falla prolongada de alterna tomando como base la tensión final de la batería.
2 Una indicación de que un periodo largo de ausencia de alterna ha ocurrido, los rectificadores están fuera (apagados) y las baterías se han descargado, y
3 Una indicación que la batería está cerca de la descarga total (tensión de activación) y que es necesario disparar el modo de igualación, los rectificadores están encendidos, permanecerán en dicho nivel durante el tiempo que haya sido programado.
4 Igualación periódica, donde las baterías se igualan en periodos preprogramados en días.
5 Inicio manual; utilizando el ajuste del periodo para regresar los rectificadores a modo de flotación luego de que ha expirado el periodo.

Desconexión por alta tensión HVSD/OVP; al ser detectada apaga en forma automática todos los rectificadores cuando existe un nivel de sobretensión en la salida del sistema.

Desconexión por baja tensión LVD; controla la activación de los contactores que abren automáticamente cuando una condición de batería baja es detectada y cierran cuando retorna la tensión del sistema a normal.

Inhibición de desconexión por baja tensión (INHLVD control); es un interruptor para asegurar que no se abrirán los contactores de LVD y se puedan realizar de labores de mantenimiento.

Compensación de temperatura de la batería TCM (temperature compansation module); es utilizado para ajustar la tensión de salida del rectificador para garantizar que la tensión de flotación de la batería es corregido por la propia temperatura de operación de la misma.

Control de corriente de carga; es usada para limitar el flujo de corriente en la batería cuando comienza la recarga después de una falla de alterna, ésta es programada típicamente a 1/5 de la capacidad de la batería, eso garantiza que la batería no es recargada demasiado rápido, resultando en un calor excesivo generado y una posible reducción en la vida de la batería, lo cual es muy importante para baterías VRLA.

Diagnósticos de batería

Estimación del estado de ¨salud¨ de la batería; una medición contínua y periódica del funcionamiento y estado de la batería, es expresada como un porcentaje de la especificación del fabricante, los disparos de las alarmas pueden ser ajustados para que se activen de acuerdo con el estado de la batería ¨salud¨ al 80% o por debajo, esa medida es tomada cada vez que se realice una descarga significativa de la batería y es registrada,
Predicción del tiempo de descarga de la batería; predecir el número de horas que la batería soportará antes que sea totalmente descargada o una condición de desconexión por baja tensión LVD ocurra, de acuerdo con la razón de la descarga presente.

Ajustes de rectificadores en un punto único (un solo control o pantalla); permite al operador inicializar y ajustar todos los rectificadores en un lugar y punto central y no cada uno por separado.

Fuerza contralelectromotriz CEMF (contraelectromotive force); controla uno o más contactores que cerrrarán automáticamente cuando una condición de alta tensión en la carga es detectada y abren cuando la tensión de la carga regresa a normal o está en una condición de baja tensión .

2.5.5 Otras características

1 Restablecimiento de alarmas visibles VAR (visible alarm reset); se utiliza para limpiar de alarmas (avisos) al panel o pantalla.

2 Lámpara de prueba, se iluminan todas las lámparas para verificar la operación.

3 Corte de alarma ALCO o ALCUTOFF; es provisto para limpiar los contactos del relevador y alarmas auditivas asociadas con cada condición de alarmas lo que permite que alarmas extendidas puedan ser canceladas mientras las condiciones que propiciaron alarmas están siendo resueltas por personal local.

2.5.6 Características avanzadas

1. Acceso remoto para monitoreo y control
   - Puerto RS232 para acceso local mediante una computadora personal
   - Acceso por modem de canal telefónico (remoto).
   - Protocolo de manejo simple de red SNMP (single network management protocol), reporte de alarmas sobre una redes LAN o WAN (redes locales de los usuarios).
2. Estadística e historia
3. Relevadores de alarma programables
4. Pantalla de cristal líquido para visualizar parámetros y alarmas

2.6 Contactor de desconexión por baja tensión LVD

El contactor de desconexión por baja tensión es utilizado para desconectar del sistema ambas cargas tanto la batería como la carga (equipo de telecomunicaciones), cuando la batería llega a un estado en el cual es considerada como completamente descargada es decir después de un largo periodo de falla de la alimentación ac (tensión final), hay tres razones para la utilización de una desconexión por baja tensión o LVD.

1. Prevención de daño de la carga debido a una condición de baja tensión , algunos equipos de comunicaciones pueden ser dañados cuando operan con tensiones exesivamente bajas de entrada o drenar corriente excesiva que puede disparar su interruptor de protección.
2. Previsión de daño a la batería debido a sobredescarga, descargando la batería por debajo de tensión final recomendado (umbral de tensión baja) que puede dañar permanentemente la batería.
3. Desconexión de carga específicas (sheeding) en una secuencia prioritaria para maximizar el tiempo de respaldo para cargas críticas, pueden ser utilizados contactores individuales.

2.6.1 Conexión

El contactor de desconexión por baja tensión puede ser conectado en serie con la carga (desconexión de carga) o con la batería (desconexión de batería). Es controlado por el panel de supervisión. Ver figura 2.6

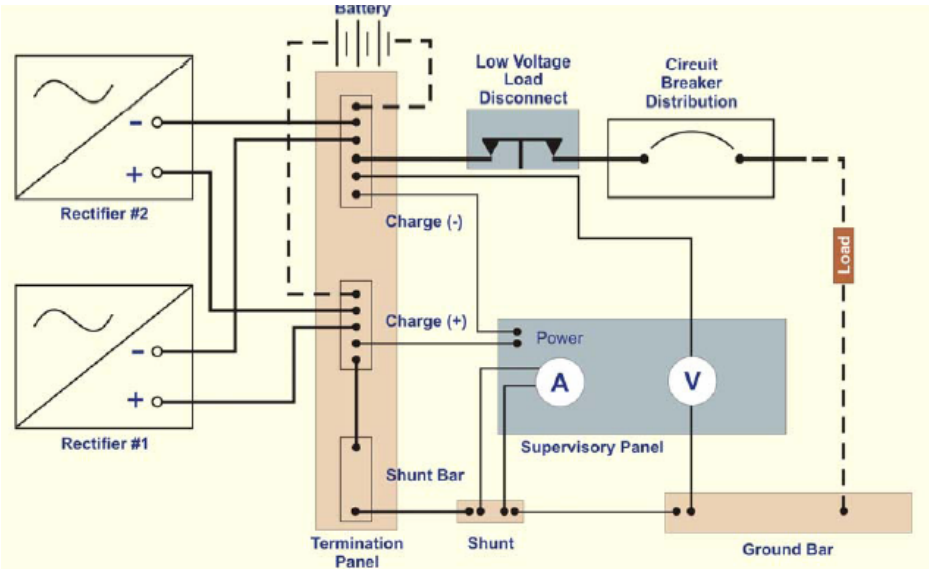


Figura 2.6
Sistema de potencia básico con distribución, panel supervisor y desconexión por baja tensión LVD

2.6.2 Operación

El panel supervisor monitorea y despliega constantemente la tensión del sistema. Después de una falla de alterna ac, la batería se descargará hasta llegar al punto de desconexión (umbral bajo), que considera la descarga total de la batería, dicho punto normalmente es ajustado a una tensión aceptable de batería (muy cercano a la tensión final). En aplicaciones de telecomunicaciones la tensión final típico usado es 1.75 V/celda 42V en un sistema a 48V y 21V en un sistema de +24V, cuando el punto de desconexión es alcanzado la batería y / o la carga será desconectada depende configuración.

La carga o la batería permanecerán desconectadas hasta que la alimentación de ac se restablesca, al regreso de la alimentación las desconexiones de carga y batería funcionan de formas diferentes.

- Desconexión de carga; los rectificadores precargarán la batería por unos pocos minutos hasta que la tensión de batería alcanza el punto de reconexión (

típicamente 25V o 50V según sea el sistema), cuando el punto de reconexión es alcanzado la carga se reconecta a ése nivel de tensión .

- Desconexión de batería LVD; inmediatamente luego de la reaparición de alimentación la carga verá un incremento lento de dc (0-50 o 0-25 Vdc sobre un periodo de 8-10 seg, debido a una característica de inicio suave en el rectificador), a 50 o 25 V la batería será reconectada (es decir que el contactor de su LVD se conectará nuevamente) .

Una franja amplia de tensión (rango) entre los ajustes de entrada y salida (42V salida, 50V entrada en un sistema de 48V, 21V salida, 25V entrada en un sistema de 24V) previene oscilaciones en los contactores dado que la tensión de batería subirá naturalmente luego que la carga ha sido removida de éste y no es deseable reconexión sin rectificadores trabajando.

Desconexión de batería v.c. de carga; En algunos casos la desconexión de la batería, en lugar de la de carga, es deseable, la ventaja de éste sistema es que una operación accidental del LVD no interrumpirá la potencia a la carga a menos que la ac también esté apagada. La ventaja de la desconexión de batería es que la carga verá un incremento de tensión lento 0-50V o 0-25V conforme el funcionamiento de los rectificadores, el inicio suave puede causar daño involuntario a la carga o a un fusible o disparo de un interruptor, es requerida una cuidadosa evaluación de las especificaciones de carga para verificar que éste método de desconexión no afectará la carga.

2.6.3 Dimensionamiento

Los contactores para desconexión por baja tensión están disponibles en varias capacidades y tamaños, la razón indica la corriente máxima portadora de la habilidad de desonexión.

2.6.4 Características y criterios de selección

Se encuentran disponibles para interrumpir cargas de alta corriente, la mayoría de ellos son utilizables en capacidades de 200 A, 400 A, 800 A, y 1200 A.

2.7 Compensación de temperatura de batería TCM

El funcionamiento de la batería y su expectativa de vida esta directamente relacionada con la temperatura ambiente de batería (es decir de operación en el sitio), la temperatura óptima de operación es de 25° C, arriba de esa temperatura la vida de la batería se ve comprometida y debajo de la misma el funcionamiento y ejecución es reducido.

Las baterías VRLA tienen una carácterística negativa en que un incremento en su temperatura causa un incremento de corriente en los bloques que conforman la celda (interior), y sucesivamente aumentan la temperatura y la corriente en forma desmedida (runaway, semejante a una oscilación térmica), esto ocurre cuando la temperatura interna de la batería sube debido a sobrecarga, temperatura ambiente alta o falla interna, causando que la batería drene más corriente de flotación la cual poco a poco eleva su temperatura interna, dicho ciclo continúa hasta que la batería falla y la falla puede ser bastante dramática (puede causar un ambiente húmedo de ácido en la sala).

La compensación de temperatura es un proceso de reducción automática de la carga aplicada a la batería a alta temperatura (para incrementar su vida y prevenir el runaway) e incrementar la tensión aplicada a baja temperatura (para incrementar la capacidad de la batería y garantizar la carga correcta de la misma). Tablas 2.5 y 2.6

TEMPERATURE*		BFV**=54.00V @25°C(77°F)			BFV**=54.50V @25°C(77°F)			BFV**=55.00V @25°C(77°F)		
°C	°F	2.5mV (volts)	3.5mV (volts)	4.5mV (volts)	2.5mV (volts)	3.5mV (volts)	4.5mV (volts)	2.5mV (volts)	3.5mV (volts)	4.5mV (volts)
-40	-40	57.90	59.46	61.02	58.40	59.96	61.52	58.90	60.46	62.02
-35	-31	57.60	59.04	60.48	58.10	59.54	60.98	58.60	60.04	61.48
-30	-22	57.30	58.62	59.94	57.80	59.12	60.44	58.30	59.62	60.94
-25	-13	57.00	58.20	59.40	57.50	58.70	59.90	58.00	59.20	60.40
-20	-4	56.70	57.78	58.86	57.20	58.28	59.36	57.70	58.78	59.86
-15	5	56.40	57.36	58.32	56.90	57.86	58.82	57.40	58.36	59.32
-10	14	56.10	56.94	57.78	56.60	57.44	58.28	57.10	57.94	58.78
-5	23	55.80	56.52	57.24	56.30	57.02	57.74	56.80	57.52	58.24
0	32	55.50	56.10	56.70	56.00	56.60	57.20	56.50	57.10	57.70
5	41	55.20	55.68	56.16	55.70	56.18	56.66	56.20	56.68	57.16
10	50	54.90	55.26	55.62	55.40	55.76	56.12	55.90	56.26	56.62
15	59	54.60	54.84	55.08	55.10	55.34	55.58	55.60	55.84	56.08
20	68	54.30	54.42	54.54	54.80	54.92	55.04	55.30	55.42	55.54
25***	77	54	54	54	54.5	54.5	54.5	55	55	55
30	86	53.70	53.58	53.46	54.20	54.08	53.96	54.70	54.58	54.46
35	95	53.40	53.16	52.92	53.90	53.66	53.42	54.40	54.16	53.92
40	104	53.10	52.74	52.38	53.60	53.24	52.88	54.10	53.74	53.38
45	113	52.80	52.32	51.84	53.30	52.82	52.34	53.80	53.32	52.84
50	122	52.50	51.90	51.30	53.00	52.40	51.80	53.50	52.90	52.30
55	131	52.20	51.48	50.76	52.70	51.98	51.26	53.20	52.48	51.76
60	140	51.90	51.06	50.22	52.40	51.56	50.72	52.90	52.06	51.22
65	149	51.60	50.64	49.68	52.10	51.14	50.18	52.60	51.64	50.68

Tabla 2.5
Compensación de tensión de flotación de batería para banco de 48V

TEMPERATURE*		BFV**=27.00V @25°C(77°F)			BFV**=27.25V @25°C(77°F)			BFV**=27.50V @25°C(77°F)		
°C	°F	2.5mV (volts)	3.5mV (volts)	4.5mV (volts)	2.5mV (volts)	3.5mV (volts)	4.5mV (volts)	2.5mV (volts)	3.5mV (volts)	4.5mV (volts)
-40	-40	28.95	29.73	30.51	29.20	29.98	30.76	29.45	30.23	31.01
-35	-31	28.80	29.52	30.24	29.05	29.77	30.49	29.30	30.02	30.74
-30	-22	28.65	29.31	29.97	28.90	29.56	30.22	29.15	29.81	30.47
-25	-13	28.50	29.10	29.70	28.75	29.35	29.95	29.00	29.60	30.20
-20	-4	28.35	28.89	29.43	28.60	29.14	29.68	28.85	29.39	29.93
-15	5	28.20	28.68	29.16	28.45	28.93	29.41	28.70	29.18	29.66
-10	14	28.05	28.47	28.89	28.30	28.72	29.14	28.55	28.97	29.39
-5	23	27.90	28.26	28.62	28.15	28.51	28.87	28.40	28.76	29.12
0	32	27.75	28.05	28.35	28.00	28.30	28.60	28.25	28.55	28.85
5	41	27.60	27.84	28.08	28.60	28.09	28.33	28.10	28.34	28.58
10	50	27.45	27.63	27.81	27.70	27.88	28.06	27.95	28.13	28.31
15	59	27.30	27.42	27.54	27.55	27.67	27.79	27.80	27.92	28.04
20	68	27.15	27.21	27.27	27.40	27.46	27.52	27.65	27.71	27.77
25***	77	27	27	27	27.25	27.25	27.25	27.5	27.5	27.5
30	86	26.85	26.79	26.73	27.10	27.04	26.98	27.35	27.29	27.23
35	95	26.70	26.58	26.46	26.95	26.83	26.71	27.20	27.08	26.96
40	104	26.55	26.37	26.19	26.80	26.62	26.44	27.05	26.87	26.69
45	113	26.40	26.16	25.92	26.65	26.41	26.17	26.90	26.66	26.42
50	122	26.25	25.95	25.65	26.50	26.20	25.90	26.75	26.45	26.15
55	131	26.10	25.74	25.38	26.35	25.99	25.63	26.60	26.24	25.88
60	140	25.95	25.53	25.11	26.20	25.78	25.36	26.45	26.03	25.61
65	149	25.80	25.32	24.84	26.05	25.57	25.09	26.30	25.82	25.34

Tabla 2.6
Compensación de tensión de flotación de batería para banco de 24V

2.7.1 Conexión

La conexión de compensadores de temperatura TCMes tienen las variantes siguientes.

1. En sistemas de fuerza tradicionales (sin sistema de supervisión, monitoreo y control en paneles) se utiliza un módulo de compensación de temperatura TCM conectado en serie entre el lazo de sensado remoto del(os) rectificador(es) en la entrada y las terminales de la batería.
2. Sistemas de fuerza pequeños pueden tener dicha característica construida bajo diseño y no requieren de la conexión anteriormente descrita (en el punto 1) y solo habrá que seguir las indicaciones de conexión establecidas en el manual correspondiente.
3. En plantas de fuerza que cuenten con sistemas de supervisión, monitoreo y control no se requerirá de conexiones adicionales entre las terminales de sensado y la batería.

Se colocan sensores directamente en las terminales negativas de la batería y las mismas terminales de todas las que conformen el banco, para su monitoreo.

2.7.2 Operación

Se tienen las siguientes formas de operación:

1. En sistemas de fuerza sin sistemas de supervisión, monitoreo y control, el TCM ajusta la tensión de salida sensado de los rectificadores basado en la temperatura ambiente detectada en la batería, y reajusta los rectificadores en su tensión de salida de acuerdo con el nivel de tensión sensado en sus terminales de sensado remoto.
2. En sistemas pequeños la salida del rectificador se ajusta basandose en la temperatura ambiente detectada en la batería.
3. En sistemas que cuentan con sistemas de supervisión, monitoreo y control, el propio sistema ajusta la tensión de flotación basandose en la temperatura detectada de la batería, y repetirá el proceso a intervalos programados, interfaces de comunicaciones como una RS485 pueden ser utilizadas para dichos propósitos.

A 25° C no ocurre compensación de temperatura (temperatura ideal de trabajo).

A temperaturas por debajo de los 25°C, el rectificador incrementará su salida en una razón fija de 25mV / celda por cada °C que haya cambiado la referencia.

A temperaturas por arriba de los 25°C, el rectificador decrementará su salida en una razón fija de 25mV / celda por cada °C que haya cambiado la referencia.

Para prevenir tensión excesiva que pudiera dañar la carga, la batería o causar una condición de alarma por alta tensión , la máxima compensación de la tensión de batería puede ser limitada en un punto de ruptura bajo a una temperatura fija que puede ser 0°C.

Para prevenir una tensión baja excesivo que pudiera cargar por debajo de lo requerido o descargar la batería la máxima compensación la tensión de batería puede ser limitada en un punto de ruptura alto a una temperatura fija que puede ser 50°C.

2.7.3 Dimensionamiento

Pendiente o declive de compensación de temperatura; la recomendación es igualar la pendiente de compensación proporcionada por el fabricante buscando conservarse cerca en una franja no mayor de 2.5 o 3.5mV.

Punto de ruptura; la selección del punto de punto de ruptura, determina las tensiones máxima y mínima que serán aplicados a la batería y a la carga, hay que igualar los puntos recomendados cuidadosamente, es decir, seleccionar el punto bajo determina la máxima tensión apliacado a la carga. Verificar el rango de tensión de operación aceptable de la carga, por ejemplo un 4.5mV de pendiente con un punto de ruptura de 40°C en un sistema de 48V resulta en 61V aplicados a la carga (31 en un sistema de 24V) en una condición de temperatura baja.

2.7.4 Características y criterios de selección

- Circuitería de detección de falla.
- Sensores redundantes de temperatura para incrementar la seguridad.
- Apagado automático si una falla es detectada y una alarma es desplegada.

2.7.5 Posibles soluciones

TCMes son disponibles de diferentes formas:

1. Externos; módulos de compensación de temperatura que pueden ser montados en gabinete o estructura o en la superficie de la batería.
2. Internos; son soluciones incorporadas que vienen desde diseño y construcción en algunas líneas de rectificadores.

2.8 Sistema de convertidores dc-dc.

El sistema de convertidores dc-dc toma como su alimentación la tensión de salida del sistema principal de recticación, y entregan una tensión en dc diferente del que les alimenta, se utiliza por las razónes siguientes:

1. Proveer niveles de tensión de -48V en sistemas de +24V realizando conversión.
2. Sistemas con +24V y -24V
3. Aislamiento galvánico o de tierra, sistemas de +24V y +24V con tierra flotada.
4. Regulación de tensión para equipos con rango cerrado (apretado) de operación en tensión de entrada operados desde un sistema de batería.

2.8.1 Conexión

Es conectado en serie entre el sistema principal de dc y la carga.

Un sistema de convertidores consiste de uno solo o un panel de convertidores, puede incorporar muchas de las características encontradas en el sistema principal de dc incluyendo la distribución, barra colectora de tierra común (bus), los convertidores dc-dc pueden tener asociadas posisiones de fusibles o interruptores en el sistema principal para su alimentación, aislamiento y protección, si son colocados convertidores en el mismo gabinete o estructura que el sistema principal es permisible conexión directa a la barra colectora de la entrada (bus).

2.8.2 Operación

El sistema de convertidores no tiene a la batería conectada a su salida, la tensión de salida es menos crítico y no son requeridos compensador de temperatura TCM ni LVDes, la tensión de salida de convertidores es ajustado para igualar los requerimientos de carga y para garantizar compartición de carga correcta entre los convertidores en paralelo.

2.8.3 Dimensionamiento

El sistema de convertidores puede ser dimensionado para suministrar adecuadamente carga bajo cualquier condición, es sustancial que sea constuido redundante y contar fusíble indicador o disparo de interruptor de falla, si esa redundancia no es construida dentro del propio sistema, los convertidores no son accesibles para aislar y reparar una falla y se efectuará una limitación de corriente, la salida del sistema de convertidores se afectará.

Siempre es recomendable utilizar fusíbles de fusión rápida en la distribución del sistema de convertidores sin usar valores grandes. Los sistemas de convertidores dc-dc pueden adicionar carga sustancial al sistema principal, podrían ser tomadas tolerancias cuando se dimensiona el sistema principal.

2.8.4 Características y criterios de selección

Estandarización; seleccionar unidades iguales en las características para preveer casos de mantenimiento.

Configuración monolítica o modular; los convertidores modulares permiten mantenimiento sencillo porque resultan de fácil remplazo y permiten una expansión rápida y sencilla, pueden ser incorporados en el sistema de supervisión y distribución.

Alta eficiencia; para beneficio de potencia y refrigeración.

Diseño compacto; en muchas aplicaciones el espacio es reducido (ahorro de espacio), se reduce el costo de instalación y el espacio.

Compartición de carga balanceada; la regulación de los convertidores es importante para lograr compartición de carga aún con convertidores de otras tecnologías.

Limitación de corriente; puede ser provista desde diseño a 105% de la carga de diseño para proveer protección en condiciones de sobrecarga.

Paro por alta tensión ; para que el convertidor se apague en caso de una condición de alta tensión a la salida y se prevenga el daño de la carga.

Encendido suave; introducir gradualmente al convertidor de cero a carga (compartida o completa) dependientdo de los requerimientos de carga, eliminando el surgimiento de cargas altas por transitorios de corriente inicial, el valor del interruptor de alimentación se decrementa reduciendo los costos de instalación.

Alarmas, proveen indicaciones de fallas en los convertidores éstos pueden ser de un diseño previsor lleno de avisos de fallas, pueden ser requeridos indicadores locales y remotos.

2.9. Sistema de inversores dc-ac o Unidades de potencia ininterrumpida UPS

Los sistemas de inversores o las unidades de potencia ininterrumpida UPSes son utilizadas para alimentar cargas tales como equipos de oficina y computadoras principalmente, que representan la necesidad del usuario final de mantener oficinas comerciales o de rastreo y monitoreo trabajando en todo momento adjuntas al sitio, en dichos casos se necesita proyectar el sistema de fuerza con la elección adecuada de alguno de los elementos mencionados para suplir la necesidad del cliente y usuario final.

Hay varias opciones que pueden ser considerdas y presentadas al usuario final para obtener la solución a sus necesidades.

1. Inversor(es) en la línea (on-line); entrada de dc y salida de ac, se conecta(n) directamente a la salida de dc del sistema principal, de manera que se tiene en preparada en reserva y lista una línea (standby) de ac.

2. Inversor(es) fuera de la línea (off-line), entrada de ac y salida de ac, tiene una línea de conexión de dc disponible, la línea de dc de reserva (standby) está disponible y está conectada a la dc del sistema principal.

3. Doble conversión UPS; es el concepto tradicional de rectificador dedicado, batería e inversor.

4. Línea interactiva UPS; consiste en un transformador ferroresonante con un cargador pequeño de batería, batería, inversor y un control inteligente, la operación normal es a través de un ferrocircuito que provee filtrado y un poco de almacenamiento de energía, el inversor es conmutado a conexión cuando es requerido por el control, la parte de rectificación (cargador) se utiliza solo para cargar la batería.

2.9.1 Conexión

1. Inversor(es) on-line; el inversor es conectado en serie entre el sistema de fuerza de dc y las cargas conectadas al sistema, es hecha una conexión para el respaldo o redundancia, una fuente de ac en preparada en reserva y lista una línea (standby).

2. Inversor(es) off-line; el inversor es conectado en serie con la fuente de ac y las cargas conectadas, es hecha una conexión para la redundancia del sistema de fuerza de dc.

2.9.2 Operación

1. Inversor(es) on-line; en operación normal el inversor toma corriente desde el sistema de fuerza de dc y convierte la misma en ac para suministrar a sus cargas (equipos de oficina), si el inversor falla o el sistema de fuerza es intrerumpido el inversor en forma automática transferirá la carga a una fuente (alterna) de ac, llamada standby

2. Inversor(es) off-line; en operación normal la carga está alimentada por la fuente de ac por medio del inversor, cuando se pierde la fuente de ac la carga es transferida al inversor, allí puede haber un circuito resonante para proveer su energía almacenada mientras la carga es transferida al inversor.

2.9.3 Dimensionamiento

Puede ser dimensionado el(os) inversor(es) o el UPS de tal forma que la carga contínua en VA no exceda entre el 75% al 80% de la capacidad nominal del mismo en VA.

Los inversores a menudo suministran energía a equipo de cómputo los cuales tienen fuentes conmutadas de potencia así como otras cargas no lineales, si cargas con alto factor de cresta (> 2.5) son conectadas, la razón del UPS puede llegar a reducir su capacidad nominal.

La corriente del neutro también puede ser monitorada después de la instalación del UPS para garantizar si está dentro de los límites permisibles del conductor, cargas no blanceadas y un factor de potencia pobre a menudo generan corrientes en el neutro, es posible que esas corrientes sobrecarguen la carga sobre el conductor del neutro sin que el conductor tenga protección.

Si es utilizado un inversor on-line ambos tanto la batería del sistema de fuerza de dc como los rectificadores tienen que ser sobredimensionados para cubrir la carga adicional impuesta por el inversor.

Si es utilizado un inversor off-line solo debe ser sobredimensionada la batería, el inversor está trabajando en operación normal desde la fuente de ac y únicamente absorverá corriente desde la fuente de dc cuando haya una falla de ac.

Los inversores solo pueden drenar corriente al inicio de operación y puede ser requerida la curva de operación de la protección sea un interruptor o un fusible.

2.9.4 Características

Muchos sistemas UPS tienen en el mismo gabinente la batería las cuales raramente reciben el mantenimiento adecuado, nunca reciben la ventilación adecuada dados los compartimientos que ocupan, muchos de ellos utilizan como sistema de dc a la batería, cada una de esas pequeñas celdas es potencialmente un eslabón débil en la cadena. Suministrando potencia a las cargas de ac desde un inversor conectado a una batería de alta calidad de un sistema de fuerza con buen mantenimiento se reduce el problema.

2.10 Integración del sistema de fuerza de dc.

El sistema de fuerza ya conformado integra los elementos mencionados anteriormente, dependerá de los objetivos y requerimientos impuestos por el proyecto de que elementos y que componentes deban ser considerados dentro del sistema de fuerza completo.

2.10.1 Conexión

1. Intersistema.
   - Un sistema de fuerza típico puede ser provisto de las preparaciones necesarias con terminaciones simples para conexión de elementos.
   - Sistema de Barras colectoras (bus), puede estar formado por barras o cables de cobre terminados mediante la utilización de terminales de alta resistencia y calidad, que cumplan con los requerimientos eléctricos de carga y código.
   - Rondanas cónicas y/o planas para las conexiones electro-mecánicas que garanticen integridad bajo diferentes condicones de temperatura en carga alta y baja, en todos los lugares donde se prevea colocar terminales deben ser provistas perforaciones para terminales de doble perforación, tipicamente de 3/8¨ y/o de 1¨.
   - La mayoría de los sistemas de fuerza incluyen éstas características y utilizan barras de cobre recubierto para eliminar oxidación.
   - El cableado del bus intersistema determina la capacidad del sistema de potencia.
   - El bus de descarga vertical es utilizado para conectar los paneles de distribución para las terminaciones de carga y descarga en un sistema de fuerza tradicional.

2. Batería
   - Configuración separada de carga y descarga; en ése método de conexión la batería fue utilizada en el pasado para reducir la tensión de rizo hacia la carga, las baterías de válvula de aspiración fueron usadas como filtro, con la aparición de rectificadores de bajo rizo dicho método ya no es requerido.
   - Son provistos dos buses para terminación positiva y negativa respectivamente, la salidas negativas de los rectificadores son terminadas en un bus – y un cable corre a la terminal negativa de la batería desde dicho bus, un segundo cable es conectado desde la termminal negativa de la batería de vuelta al segundo bus - de descarga y la alimentación negativa es conectada a dicho bus, esto también

es repetido para el lado positivo, éste método tiene beneficios adicionales mejor regulación y ligeramente un nivel reducido de tensión visto desde la carga.

- Configuración común de carga y descarga; éste es el método de terminación de corriente estándar, un bus es provisto para las conexiones negativas y uno para las conexiones positivas, salidas de rectificador, cables de baterías, la alimentación de la carga es conectada directamente al bus.

2.10.2 Dimensionamiento

Los sistemas de potencia pueden ser sobredimensionados por un factor de 20-25% (de hecho es recomendado por varias marcas fabricantes), la dimensión (carga total estimada o pronosticada) se multiplica por un factor de 1.2 o 1.25 (en ocaciones 1.3), para garantizar que no será sobrepasada la capacidad del shunt principal y que estará disponible la capacidad adecuada en el bus y en los cables para corriente de recarga de la carga y la batería.

2.10.3 Características y criterios de selección

1. Requerimientos de acceso, ya sea frontal o posterior.
2. Estructura metálica abierta y organizada para relevadores de abertura o llamada box bay.
3. Restricciones de espacio físico,

2.10.4 Ejemplos de sistemas típicos

1. Sistemas de fuerza tradicionales.
   - El empacado de los sistemas tradicionales es de relevador abierto.
   - Gabinetes o estructuras de metal (racks) de 19¨o de 23¨de ancho.
   - Acceso según sea requerido para mantenimiento frontal o posterior.
   - Nivel de carga, son variables, inclusive de 10,000 A o más.

2. Sistemas de fuerza de acceso frontal.
   - Con un espacio físico llamemosle mediano el acceso frontal es una característica importante, han llegado a hacer muy utilizados y requieren de instalación sencilla en su parte posterior (pocas conexiones), después de su instalación inicial pueden ser removidos a posiciones cercanas a las paredes que permitan ventilación (porque es necesaria).

- Las maniobras de mantenimiento y servicio son realizadas en su mayoría pór la parte frontal.
- Pueden manejar niveles de carga de 1200 A o mayores.

3. Sistemas de fuerza misceláneos
   Incluyen montaje de equipos en gabinetes portátiles o con ruedas o la utilización de consolas o ménsulas para montaje en pared.
   Se deben de proveer soluciones para necesidades y proyectos específicos.

4. Sistemas de fuerza compactos
   - Éstos sistemas de fuerza totales contenidos dentro de un solo gabinete pequeño (excepto la batería) pueden ser configurados en varios tipos de combinaciones para unos 2, 3, 4 o 5 rectificadores por módulos adicionando módulos de distribución, de supervisión, de desconexión de batería y compensación de temperatura (según sea configurado). Vienen en gabinetes compactos de 19¨a 23¨de ancho (o menores) y de 12¨de profundidad (hay ocaciones en que el sistema de fuerza es aún menor a las 17¨ en los que previendo crecimiento se emplean tapas ciegas si son necesarias.
   - Su acceso es totalmente frontal para efectos de crecimiento, mantenimiento y servicio.
   - Su utilización es en aplicación es donde el espacio físico es un factor determinante por su tamaño. Pueden ser gabinetes exteriores para enlaces que manejen poca corriente.
   - Las baterías están fuera la localización de la planta de fuerza y son conectadas en los puntos marcados en las barrras.

Capítulo 3 Dimensionamiento de un sistema de fuerza

3 Dimensionamiento de un sistema de fuerza

3 Dimensionamiento de un sistema de fuerza

Todo sistema de fuerza (potencia) debe ser dimensionado de acuerdo con los requerimientos que sean marcados por las necesidades de los equipos de telecomunicaciones que se vaya a alimentar, es necesario realizar un análisis de todos y cada uno de ellos previo a ver cuanta corriente de salida será necesario tener como capacidad instalada para la adquisición de los equipos rectificadores, del mismo modo es necesario de acuerdo con los requerimientos del cliente si el sistema lleva equipos de conversión de potencia dc-dc y / o dc-ac adicionar su consumo a la corriente de la capacidad a instalar, un dato muy importante es el hecho de conocer el tiempo de respaldo que se requerirá para realizar la elección de la batería (estamos llamando batería al conjunto completo de baterías que conformen el total) y una vez elegida considerar la corriente que requerirá la batería el estar considerada como totalmente descargada para ser agregada a los datos de corriente necesaria. Como comentario final será necesario saber si el sistema de fuerza llevará inversores para dar respaldo a equipos en un centro de trabajo alterno al sistema de fuerza para por supuesto ser considerada una corriente, dependiendo de su forma de conexión.

Del lado de la ac es necesario ver que tipo de alimentación estará disponible para saber sobre los equipos o accesorios de protección que serán considerados o necesarios para los rectificadores así como que tecnología de rectificación será adquirida, considerando los elementos de monitoreo, el ambiente de trabajo y tipo de sala, espacio físico disponible, medio ambiente exterior en que serán colocados, y por supuesto claro está que, todo de acuerdo con las disposiciones económicas que el proyecto tenga en consideración será la combinación final de cada uno de los elementos del sistema o sistemas de fuerza a instalar.

3.1 Cálculos

3.1.1 Análisis de carga del sistema

Para determinar la potencia del sistema es necesario evaluar las necesidades o requerimientos de las cargas así como el periodo de tiempo de respaldo deseado o necesario. Es necesario revisar todos y cada uno de los componentes del sistema y determinar:

- Tensiones nominales de operación, tensión de flotación, tensión de igualación; tensión del sistema principal.
- Tensión de subsistema, tensión de operación de equipos de telecomunicaciones alimentados desde convertidores (si existirán).
- Carga que representará el equipo de telecomunicaciones alimentado desde el sistema principal (ITE o TEL), éste dato lo da el comprador, es necesario contemplar que habrá crecimiento.
- Carga que representará el equipo de telecomunicaciones alimentado desde el subsistema (ITES o TESL), éste dato lo da el comprador, es necesario contemplar que habrá crecimiento.
- Carga a suministrar por parte de los inversores (si existirán) kVAs.
- Carga a suministrar a los inversores para alimentarlos (II o CI o IL si existirán).
- Carga a suministrar a los convertidores para alimentarlos (IC o CC o CL si existirán).
- Carga o corriente que necesitará suministrar la batería si no hay alterna (IBOD).
- Definir los tiempos de descarga y recarga de la batería (TD o DT y TR o RT).
- Definir la tensión de umbral mínimo, tensión final de la batería.
- Carga o corriente que será necesaria para alimentar la batería en las peores condiciones (IBMAX - igualación).
- Carga a los rectificadores en la peor condición, Carga del sistema (CS o SL)

3.1.2 Tensión de sistema

De acuerdo con el equipo de telecomunicciones que se va a alimentar los sistemas pueden requerir de tensiones nominales de operación en – 48 V o +24 V, las tensiones de flotación e igualación dependen de las características de la batería. Por lo que es necesario acudir a los datos del fabricante de las baterías que se utilizarán para conocer las tensiones de operación. De hecho es prácticamente uno de los datos básicos manejar

los parámetros sobre las tensiones de operación de las baterías, no exactamente arranca de aquí el cálculo del sitio pero si es de los datos de mayor importancia.

3.1.3 Carga del equipo de telecomunicaciones

Es necesario que el usuario del sistema de fuerza establesca las corrientes a suministrar a sus equipos de comunicaciones ya sea que se vayan a alimentar desde el sistema principal (ITE / TEL) o desde los convertidores si exisirán (ITES o TESL). Se debe tomar en cuenta que tal vez sean solo datos de una carga preliminar pues normalmente todo sistema tiene crecimiento. Prácticamente de aquí, de éste dato parte todo el proceso pues la mayor cantidad de equipos de telecomunicaciones se alimentan a tensión del sistema ya sea en flotación o igualación VSYS (FLOAT / EQ).

3.1.4 Carga a los inversores

Si el usuario requerirá de operar ininterrumpidamente equipos de oficina necesita dar de igual forma el dato sobre la carga que necesita cubrir desde el(os) inversor(es), Potencia requerida en kVAs. Nuevamente hay que contemplar crecimiento.

3.1.5 Carga de los Inversores y Convertidores

Es necesario calcular la carga o corriente que el sistema requerirá para alimentar los equipos inversores y convertidores (CI o IL y CC o CL) si existirán. Será necesario calcularlas mediante las fórmulas 3.1 y 3.2 respectivamente.

3.1.6 Carga máxima a la batería IBOD

Cuando no hay presencia de alterna la batería, la cual es el repaldo, necesita suministrar la corriente o carga a los equipos de telecomunicaiones que trabajan a tensión principal así como a los equipos convertidores e inversores, si existen, por lo que será necesario calcular la corriente con la fórmula 3.3.

3.1.7 Capacidad de carga de rectificadores

La capacidad a instalar de rectificación depende de las peores condiciones de carga a suministrar al sistema de fuerza, esto es suministrar carga a una batería descargada, a

inversor(es), a convertidor(es) (si existen) y al equipo de telecomunicaciones que trabaja a tensión de sistema VSYS. Prácticamente la capacidad a depende en un gran porcentaje de la corriente que necesita la batería en su condición de descargada.

3.1.7.1 Carga de (para) batería descargada

Es neceario establecer los parámetros para la batería que se aplicará en el sistema de fuerza.

1. Tensión final o tensión de desconexión, según fabricante.
2. Tiempo de descarga (TD o DT, tiempo de respaldo deseado en sitio)
3. Tiempo de recarga (TR o RT, igualación)
4. Corriente que necesitará suministrar la batería si no hay alterna (BOD) usando la fórmula 3.3.
5. Capacidad en Amper/hr requerida CAP ecuación 3.4
6. Cálculo de la corriente máxima requerida por la batería para recargarse IBMAX utilizando la fórmula 3.5

Una vez teniedo todos los los parámetros establecidos y los datos anteriores calculados mediante la fórmula 3.6 calcular la carga del sistema o carga a los rectificadores. Finalmente de acuerdo con el tipo de sistema establecer la cantidad de rectificadores que integrará la planta de fuerza.

3.1.8 Fórmulas y ejemplo de cálculos

	V SIS			
	BATERIAS SELLADAS GEL		BATERIAS DE VALVULA LIQUIDO	
CELDAS X BANCO	FLOTACION			
	V/CELDA	V FLOAT	V/CELDA	V FLOAT
24	2.25	54	2.17	52.08
12	2.25	27	2.17	26.04
	IGUALACION EN 24 HRS			
	V/CELDA	V EQ	V/CELDA	V EQ
24	2.3	55.2	2.22	53.28
12	2.3	27.6	2.22	26.64
	IGUALACION EN 12 HRS			
	V/CELDA	V EQ	V/CELDA	V EQ
24	2.35	56.4	2.27	54.48
12	2.35	28.2	2.27	27.24
	V SUBSIS			
	CONVERTIDORES			
	VSIS NOMINAL	VSUB POSIBLE	VSIS REAL	VSUB REAL
24	-48		27	
12	24	-24	-54	-27

	CARGA DE EQUIPO TELECOM			
	ITE o TEL	A V SIS	ITES o TESL	A V SUBSIS
INICIAL	350	XXX	15	XXX
CRECIM	600	XXX	25	XXX
	INVERSOR(ES)			
POT A SUM kVAs	CAP INV kVAs	I ENT POR INV (Amp dc	NUM DE INVERSORES	II o IL (Amp dc)
INICIAL 25	10	10	3	30
CRECIM 35	10	10	4	40
	CONVERTIDOR(ES)			
ITES o TESL (Amp dc)	CAP CONV (Amp dc)	I ENT POR CONV (Amp)	NUM DE CONV	IC o CL (Amp dc)
INICIAL 15	3	2	6	12
CRECIM 25	3	2	9	18
	BATERIA			
	BATERIAS SELLADAS		BATERIAS DE VALVULA	
BATERIAS X BANCO	V FINAL / CELDA	V FINAL VOLTS dc	V FINAL / CELDA	V FINAL VOLTS dc
24	1.75	42	1.7500	42
12	1.75	21	1.7500	21

Tabla 3.1
Ajustes de tensión de flotación e igualación (izq), Carga en los sistemas (der)

	TR o RT HRS	TD o DT HRS	IBODmax Amp	IBMAX Amp	CAPACIDAD Amp/Hr	CARGA RECTS IR o RL
INICIAL	24	8	392	143.7333	3136	535.7333
CRECIM	24	8	658	241.2667	5264	899.2667
INICIAL	12	8	392	287.4667	3136	679.4667
CRECIM	12	8	658	482.5333	5264	1140.5333

Tabla 3.2
Carga y capacidad a instalar sistema con inversores on-line

3.2 Fórmulas

$$CI = II \cdot NPI$$ Ec. 3.1

$$II = \frac{L}{I\mu \cdot FV}$$ Ec. 3.1.1

II Corriente nominal de alimentación de un Inversor A
NPI Número de posiciones (ocupadas) de inversor
CI IL Carga de Inversor(es) A
Nota Si no se tiene la corriente nominal que consume un inversor se utiliza la ec. 3.1.1 en la que se trabaja con la eficiencia nominal de un inversor y la II describe la corriente que requiere un solo inversor para trabajar
L Carga W
Iμ Eficiencia del inversor
FV Tensión de flotación, V sistema

$$CC = IC \cdot NPC$$ Ec. 3.2

$$IC = \frac{SL\frac{OV}{IV}}{C\mu}$$ Ec . 3.2.1

IC Corriente nominal de un convertidor A
NPC Número de posiciones de convertidor
CC CL Carga de Convertidor(es) A
Nota Si no se tiene la corriente nominal que consume un convertidor se utiliza la ec. 3.2.1 en la que se trabaja con la eficiencia nominal de un convertidor y la IC describe la corriente que requiere un convertidor para trabajar
SL Carga del secundario A (equipo de telecomunicaciones a alimentar desde el convertidor) (TELS / CETS / IETS) A
Cμ Eficiencia de un convertidor
OV Tensión de salida V
IV Tensión de entrada V

$$I_{BOD} = TEL + CL + IL$$ Ec. 3.3

I_{BOD} Carga máxima de batería en descarga (Carga que la batería suministra, sin presencia de rectificadores)
CL Carga del convertidor A (CC)

IL Carga del inversor A (CL)
TEL Carga de los equipos de telecomunicaciones alimentados a VSYS (CET)

$$CAP\left[A/H\right] = I_{BOD} \cdot DT \qquad \text{Ec. 3.4}$$

CAP Capacidad de la batería en A/H
DT Tiempo de descarga de la batería (prácticamente es el tiempo de respaldo estimado) TD / DT

$$I_{BMAX} = I_{BOD} \cdot (1.1) \cdot \frac{DT}{RT} \qquad \text{Ec. 3.5}$$

I_{BMAX} Corriente máxima a suministrar a los equipos del sistema de fuerza cuando la batería esté considerada como descargada
RT Tiempo de recarga de la batería (prácticamente es el tiempo en que se estipula la recarga de la batería)
Nota Se puede realizar el cálculo de la I_{BMAX} con la capacidad nominal en A/Hr de la batería empleando la fórmula 3.5.1

$$I_{BMAX} = \frac{(1.1) \cdot CAP\left[\frac{A}{H}\right]}{RT} \qquad \text{Ec. 3.5.1}$$

$$RL = IB_{MAX} + I_{BOD} = IB_{MAX} + IL + CL + TEL \qquad \text{Ec. 3.6}$$

RL Carga al equipo de rectificación (CR / CS / SL)

3.2.1 Fórmulas adicionales auxiliares para diseño de un sistema de fuerza

$$TRC = TSL \cdot 1 + \left(2RF \cdot \frac{DT}{RT}\right) \cdot TSL = TSL\left[1 + 2RF\,\frac{DT}{RT}\right] \qquad \text{Fmla. 3.4}$$

TRC Capacidad total del rectificador A
TSL Carga total del sistema A
RF Factor de carga, es el factor de eficiencia de recarga para una batería para baterías de ácido de plomo tipicamente es 1.1 / 1.2
D Descarga hrs
R Recarga hrs

Si un inversor off-line es conectado al sistema de potencia de dc su carga debe ser sustraido de la carga total del sistema cuando se calcula la capacidad total de rectificador.

El factor de recarga es el factor de eficiencia de recarga para la batería, tipicamente 1.1 - 1.2 para baterías de ácido de plomo

3.2.2 Otras fórmulas de diseño del sistema

$$RaC\mu = \frac{OP}{IP} = \frac{OV \cdot OI}{IP} o \frac{OV \cdot OI}{IV \cdot II \cdot PF}$$ Fmla. 3.5

RaCμ Eficiencia del Rectificador o del Convertidor (depende del cálculo)
OP Potencia de salida
IP Potencia de entrada
OV Tensión de salida V
OI Corriente de salida A
IP Potencia de entrada W
IV Tensión de entrada V
II Corriente de entrada A
PF Factor de potencia (real)
Para un convertidor no aplica PF

$$S = \frac{P}{PF}$$ Fmla. 3.6

S Potencia aparente VA
P Potencia real W
PF Factor de potencia

$$CFC = \frac{PIC}{IC_{RMS}}; ideal = 1.414(ondasenoidal)$$ Fmla. 3.7

PIC Pico de Corriente de entrada A
CFC Factor de cresta
IC_{RMS} Corriente de entrada RMS A

$$TCBV = (25 - BT)(\#celdas)(slope) + FVnom@25°C$$ Fmla. 3.8

TCBV Tensión de batería a temperatura compensada V
BT Temperatura de batería °C
slope Pendiente de función de compensación de temperatura
FV Tensión de flotación nominal V a 25°C

Capítulo 4 Tecnología de rectificadores

4 Tecnología de rectificadores

4 Tecnología de rectificadores

4.1 General

La industria de telecomunicaciones desde sus inicios ha requerido de grandes cantidades de corriente directa (dc) por lo que ha requerido de desarrollar equipos de rectificación para el suministro de la misma, existen aplicaciones industriales de ese tipo de equipos entre las que se incluyen control de motores, reducción de aluminio, electrodeposición o chapeado y algunas otras en las que se requiere de grandes cantidades de dc a bajos costos, en ésta sección se presentan las principales características de las diferentes tecnologías desarrolladas en rectificadores para sistemas de telecomunicaciones. Los principios básicos de rectificación que han sido utilizados para desarrollar dichos equipos así como una descripción de las tecnologías empleadas.

4.2 Principios de rectificación regulada por amplificador magnético

El concepto de amplificador magnético es bastante añejo, requiere de diodos para alto desempeño el cual se logró con diodos de selenio y de óxido de cobre, el diodo de silicón permitió un mejoramiento aún mayor en el desempeño del mismo. Hacia los años 60 fueron colocados en el mercado de las centrales de telecomunicaciones ese tipo de rectificadores, su operación es bastante compleja por lo que se revisa solo su base de operación sin la descripción del fenómeno completo.

El concepto principal de revisión en ésta sección del presente estudio es la comprensión de la saturación magnética. Un transformador de núcleo de hierro sin carga aplicada en el secundario operando en modo lineal a una razón de tensión de entrada limita la corriente en el primario debido a la impedancia al flujo de corriente en dicho devanado, la impedancia del primario está relacionada con la densidad de flujo en el núcleo, el núcleo tiene un límite definido para la cantidad de líneas de flujo magnético que puede portar, si el valor de tensión aplicada al primario excede grandemente la tensión nominal el núcleo se satura, esto es, la tensión aplicada genera un campo magnético en el núcleo de tal

intensidad que absolutamente ya no pueden ser contenidas más líneas de flujo magnético en el núcleo.

Cuando la saturación del núcleo ocurre la impedancia del primario decrece rápidamente, esto permite una gran cantidad de corriente fluyendo en el primario limitada solamente por la resistencia de dc del cobre del alambre que compone el devanado, en éste punto, el transformador ya no funciona como transformador, se comporta más como un interruptor, dado que la saturación del transformador ocurre, el primario soporta la tensión aplicado y limita el flujo de corriente, en el punto de saturación del núcleo el primario ya no soporta una tensión , la caída de tensión a través del devanado es baja y pueden fluir grandes cantidades de corriente, éste tipo de acción iterruptora ocurre durante medio ciclo.

Si la carga está conectada en serie con el transformador de núcleo saturado la cantidad de potencia aplicada a la carga puede ser controlada, antes que el núcleo se sature el transformador soporta la tensión aplicado a través de su devando durante medio ciclo, después que ocurre la saturación la tensión remanente en cada medio ciclo aparece a través de la carga entonces una muy pequeña caída de tensión aparece a través del devanado del transformador. Por medio del control del punto al que la saturación del núcleo del transformador ocurre en relación a la fase la tensión de ac aplicado la cantidad de potencia aplicada a la carga puede ser controlada con cierta presición.

La configuración de un amplificador magnético simple se muestra en la figura 4.1 en ella se utiliza un transformador de núcleo con tres derivaciones, los devanados en las salidas portan potencia de ac y son llamados devanados compuerta, la derivación central es la de control, las derivaciones de los devanados de salida están defasadas de manera que las tensiones inducidas se cancelan en el el devanado de control, el nivel de saturación del circuito del núcleo está determinado por la corriente de dc fluyendo en el devanado de control.

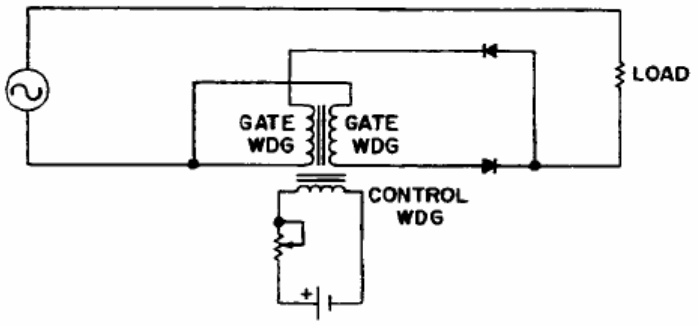


Figura 4.1
Amplificador magnético básico

La ganancia de potencia de un amplificador magnético bien diseñado puede ser bastante alta, por ejemplo, con menos de 5 W de control de potencia se puede controlar una fuente de salida de 50 kW, el amplificador magnético es bastante simple y robusto y ofrece buen aislamiento entre entrada y salida, es un dispositivo regulador tipo conmutador bastante eficiente. Los diodos mostrados en el circuito incrementan la ganancia del amplificador, puede pensarse como un bloque de tensión en medio ciclo para prevenir reajuste del núcleo, en la practica, se incrementa la ganancia de potencia varias veces así la corriente de los devanados de compuerta son unidireccionales mientras que la corriente de la carga es de ac.

El diagrama de bloques de un amplificador magnético regulado se muestra en la figura 4.2 el amplificador magnético controla la tensión aplicado al transformador y por tanto la tensión a la salida de la fuente, como realimentación, una porción de la tensión de salida es comparada con una referencia aplicada al circuito amplificador, es sensada una señal de error en la salida y amplificada por un amplificador de transistores que controla el devanado de control del amplificador magnético en una dirección para reducir el error. La corriente de salida es sensada por un transformador que alimenta un circuito de resistencias, cuando se alcanza el punto de limitación de corriente la tensión desarrollado por el circuito sensor de corriente excede el desarrollado por la red de sensado de tensión, el amplificador regula la corriente de salida en lugar de la tensión de salida, así, el rectificador mantiene tensión constante hasta el punto de interferencia por cruce (crossover) y entonces mantiene constante la corriente.

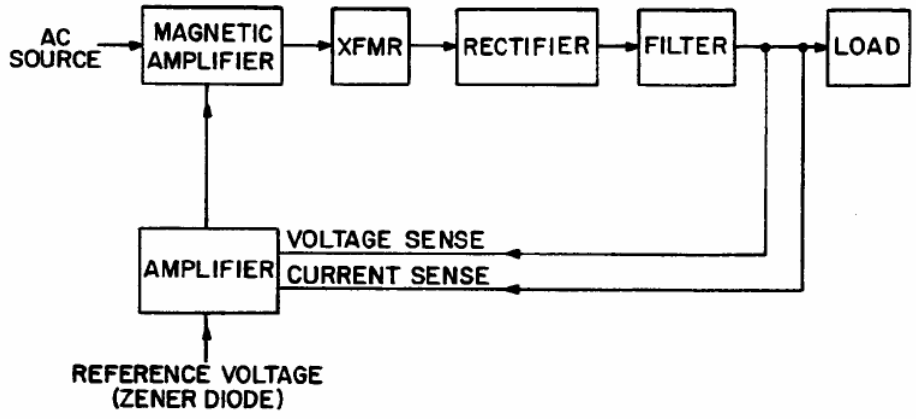


Figura 4.2
Amplificador magnético básico regulado

4.3 Principios de rectificación regulada por diodos y thystores

4.3.1 Diodos en monofásica

El circuito de la figura 4.3 muestra la forma más simple de rectificación con diodos utilizando un transformador de derivación central en el secundario para derivar una dc de salida desde una fuente de ac, el transformador provee aislamiento entre la fuente de ac y la carga de dc también cambia la amplitud de la tensión al nivel requerido, los diodos rectifican la ac proveyendo dc no filtrado a la salida hacia la carga, el dc no filtrado a la salida requiere ser modificado para cargar de forma satisfactoria la batería y ser utilizado por las cargas porque contiene un alto nivel de rizo, es necesario el empleo de filtros para reducir las componentes no deseadas a la salida. La limitación principal de ese tipo de rectificación monofásica es que conforme la capacidad de potencia a la salida es incrementada se incrementala dificultad de filtrar en forma adecuada la dc de salida una solución para el problema de filtrado es el cambiar de rectificación monofásica a trifásica.

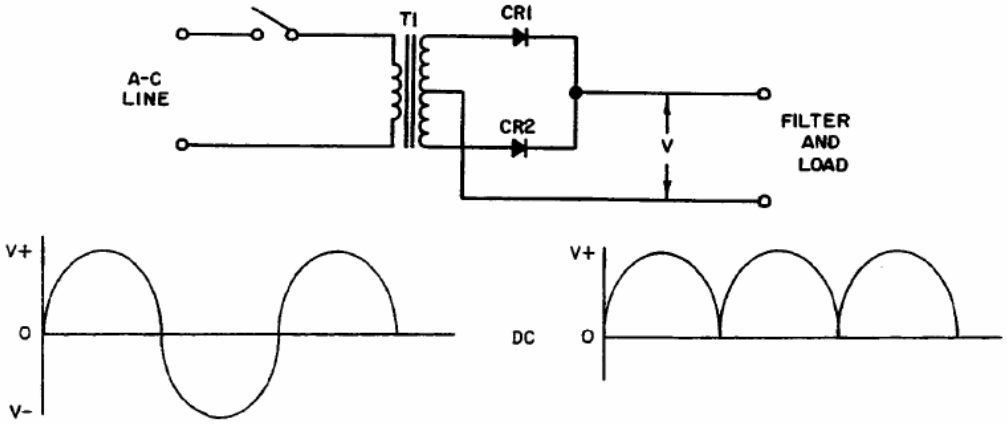


Figura 4.3
Rectificción con diodos básica (transformador con derivación central)

4.3.2 Diodos en trifásica

Como muestra la figura 4.4 un rectificador trifásico en esencia consta de tres rectificadores monofásicos conectados en paralelo, el tipo de transformador trifásico más común consiste de devanados aislados y separados, un núcleo de tres devanados. Cada derivación del núcleo contiene primario y secundario para una fase en particular, el núcleo de tres devanados. Se establecen tres flujos magnéticos desplazados 120° eléctricos entre sí.

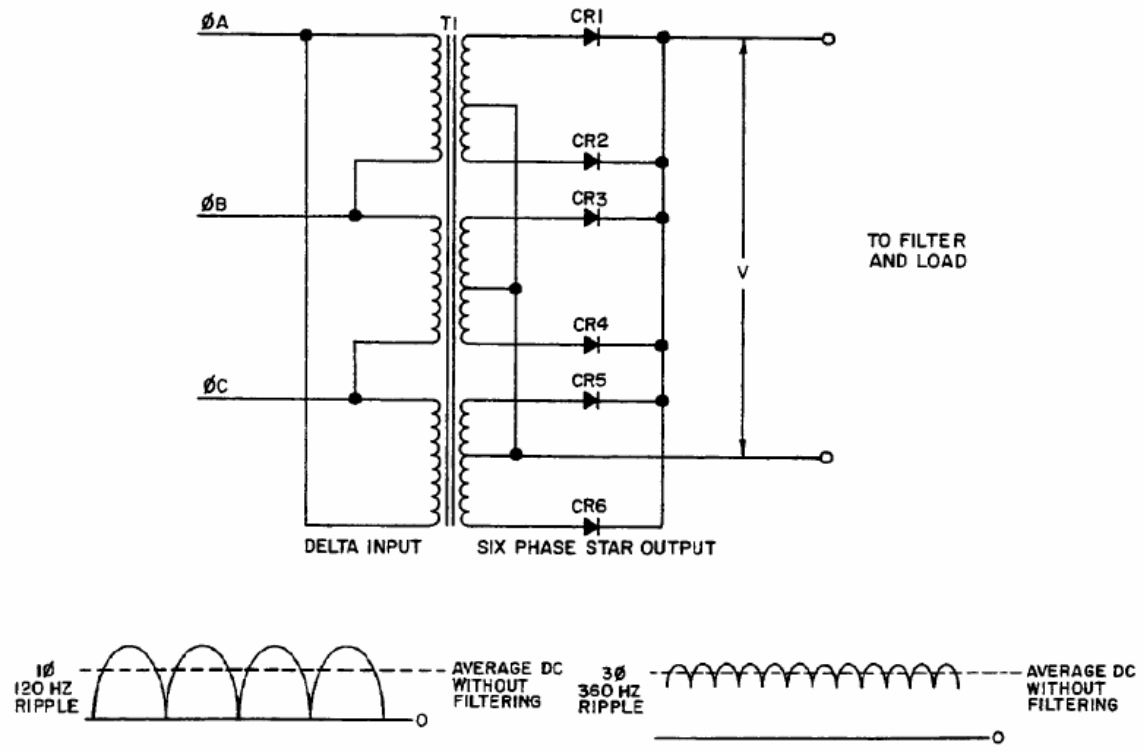


Figura 4.4
Rectificación trifásica con diodos, fase por fase, comparación con monofásica

Las salidas rectificadas resultantes de cada fase están combinadas en una sola salida, el desplazamiento de 120° entre fases resulta en un rizo a la salida del triple de frecuencia de la de un rectificador monofásico como muestra la figura 4.4. El incremento en la frecuencia de rizo resulta en un porcentaje de rizo que es de 1/10 de la de los rectificadores monofásicos. El incremento en la frecuencia de rizo y el decremento resultante en el porcentaje de rizo provee una salida que es más fácil de filtrar que la de un rectificador monofásico, la mayor parte de los rectificadores trifásicos son dimensionados para trabajar arriba de 200 A.

Pueden ser utilizados varios tipos de transformadores y de configuraciones para realizar la conversión de ac a la dc requerida, las más comunes son dos tipos, el primer tipo consiste una conexión en delta en el primario y en doble estrella los devanados del secundario, como muestra la figura 4.5 dicha configuración en el secundario tiene una derivación central para producir un secundario de seis fases, el segundo tipo de configuación de transformador (misma figura) utiliza dos transformadores separados con primario conectado en T de Scout para proveer un secundario de cuatro fases.

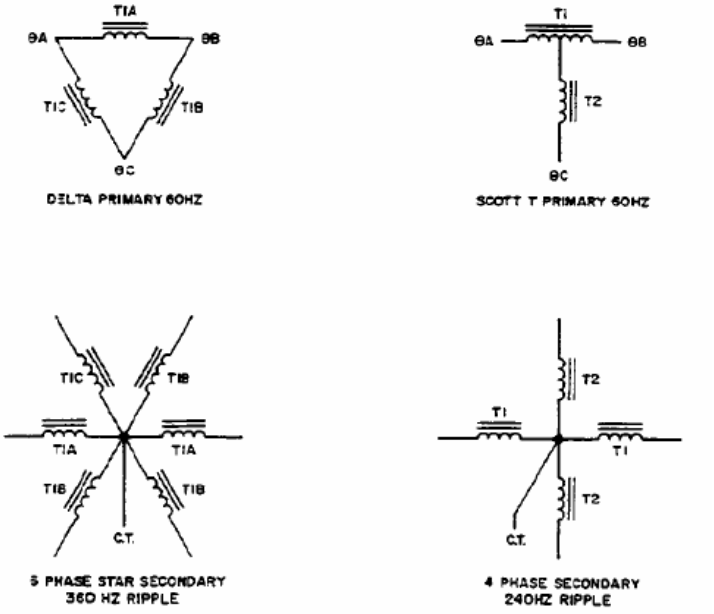


Figura 4.5
Configuraciones para el transformador

4.3.2.1. Rectificadores regulados por thrystores

Los circuitos discutidos previamente son básicamente de tensión fijo, esto es, la dc de salida es una fracción fija de la ac de entrada, la tensión de salida se decrementa conforme la corriente de la carga se incremeta, para carga de batería es deseable mantener una dc constante a pesar de las variaciones en la fuente de suministro de ac así como también de cambios en la corriente de la carga, si la unidad es conectada a una batería descargada, debe haber una vía para limitación y control de la corriente de salida previniendo daño en componentes u operación (activación de protección) de fusible.

En un cargador de batería ideal, la tensión de salida está sujeto a un valor constante para todas las variaciones de línea y carga hasta carga completa, en algún punto (cercano) hacia carga completa el cargador limita la corriente de salida en un valor seguro, es necesario tener un dispositivo de ajuste de tensión de salida, entonces, es deseable tener un rectificador estático completo no pueden ser usados dispositivos tales como transformadores variables y reguladores de inducción.

Un método utilizado para regular la salida de un rectificador es por medio del uso de un circuito regulador de conmutación, la figura 4.6 muestra un circuito básico regulador de conmutación, mediante la apertura y cierre del interruptor la tensión aplicado a la carga es cambiado en forma repetitiva de cero al tensión completo de la fuente, la tensión promedio de la carga está relacionado al tensión de la fuente mediante una relación de los

tiempos de encendido y apagado, la variación del tiempo de encendido puede ser suavemente variada entre esos dos extremos.

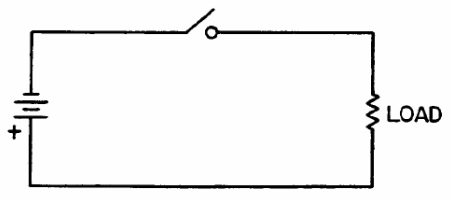


Figura 4.6
Circuito básico regulador de conmutación (switching regulator)

El elemento ideal en un regulador de conmutación es un thrystor (rectificador de silicio controlado), éste es semejante a un interruptor ideal, en estado de conducción la caída de tensión a través del thrystor es cercana a 1 V, en el estado de bloqueo la resistencia de dispersión puede ser de muchos megaohms y virtualmente la tensión entero de la fuente aparece a través del dispositivo, por tanto, la potencia disipada por el elemento de conmutación es bastante pequeño y se logra una eficiencia del orden de 90 %. El circuito regulador de conmutación se consigue empleando thrystores es por mucho el circuito más común en equipo de potencia en potencias mediana y alta.

4.3.2.2. Operación del thrystor

El thrystor es un dispositivo semiconductor que exhibe acción interruptora regenerativa, el más común es el rectificador de silicio controlado SCR, el SCR es un dispositivo de 4 cristales de material de silicio dopado intercalado de tres terminales con conducción controlada, si es aplicado tensión en polarización inversa al dispositivo éste bloquea la tensión como lo hace un diodo convencional, también bloquea la tensión en dirección de la polarización en directa hasta que una señal es aplicada al electrodo de control llamado compuerta, cuando una señal de compuerta es aplicada el dispositivo conmuta dentro de unos cuantos μseg a un estado de conducción y exhibe una baja caída de tensión. Dada la acción de conmutación regenerativa, el dispositivo continúa conduciendo mientras corriente de polarización directa está pasando a través de él, aún cuando se remueva la señal de compuerta, si la corriente de polarización directa es reducida a cero el dispositivo recobra su habilidad e bloqueo dentro de entre 10-100 μseg a través de un proceso llamado conmutación.

La propiedad de permanecer en conducción hasta que la corriente es reducida (externamente) a cero puede conducir a algunas complicaciones en los circuitos de dc,

sin embargo en los circuitos de ac, la corriente se revierte en cada medio ciclo y apaga al thrystor.

4.3.2.3. Circuitos típicos de thrystor

Los thrystores pueden ser combinados de muchas maneras en controladores de conversión de ac a dc, diferentes circuitos de control de potencia pueden ser de control primarios y / o secundarios, la elección del circuito depende el nivel de potencia así como de las tensiones de entrada y salida requeridas, para aplicaciones de baja y media potencia generalmente es usado el circuito que describe la figura 4.7, en operación de control secundario el thrystor es usado tanto como elemento de control y también como elemento rectificador.

La tensión de salida del circuito de thrystor puede ser controlado por retraso del punto al que el thrystor es encendido, como muestra la figura 4.7, si la señal de disparo es aplicada contínuamente, la tensión de salida será de un valor máximo, determinado por el valor de la tensión del secundario del transformador, por medio de la variación la señal de disparo entre esos extremos, la señal de dc puede ser ajustada suavemente sobre su rango de tensión completo, el punto en el ciclo de ac al que es aplicada la señal de disparo es el ángulo de fase, el tipo de rectificador que utiliza dicho principio es llamado rectificador por control de fase. Básicamente la figura 4.7 muestra las configuraciones básicas de ellos. Éstos circuitos tienen varias desventajas incluyendo Factor de Influencia Telefónica TIF causado por subidas de tensión generados cuando los thrystores son disparados a conducción.

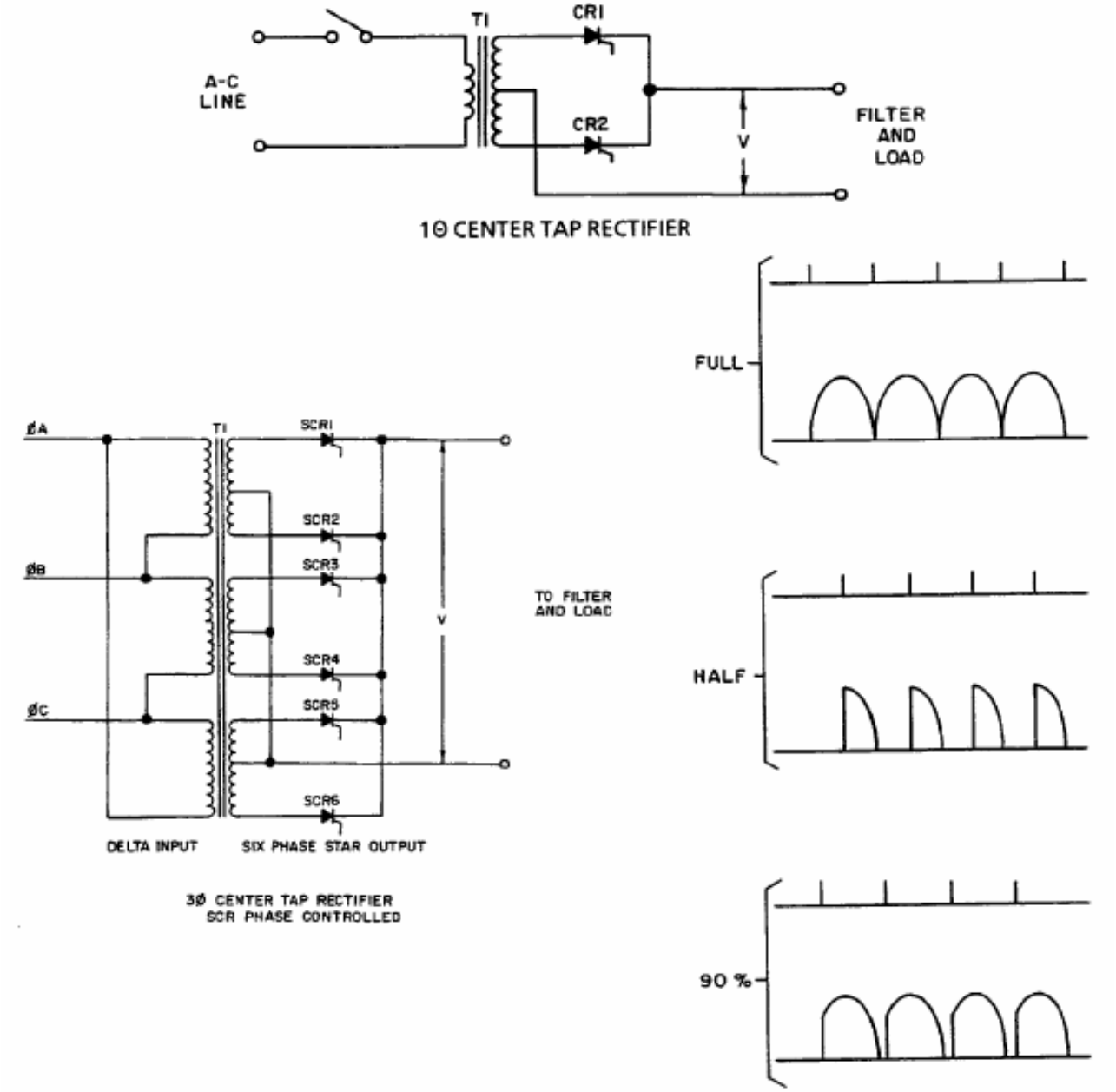


Figura 4.7
Circuitos de rectificación con thristores, monofásico y trifásico

Una configuración mejorada del mismo aparece en la figura 4.8 en la cual se observa la adición de un circuito amplicador de refuerzo que consiste de diodos insertados en el secundario del transformador entre la derivación central y el thrystor asociado, la tensión a través del diodo del devanado está disponible a la salida aún cuando el thrystor asociado esté disparado en conducción, cuando los rectificadores son disparados durante el medio ciclo de ac son insertados devanados adicionales en el circuito de salida incrementando así la tensión de salida del rectificador.

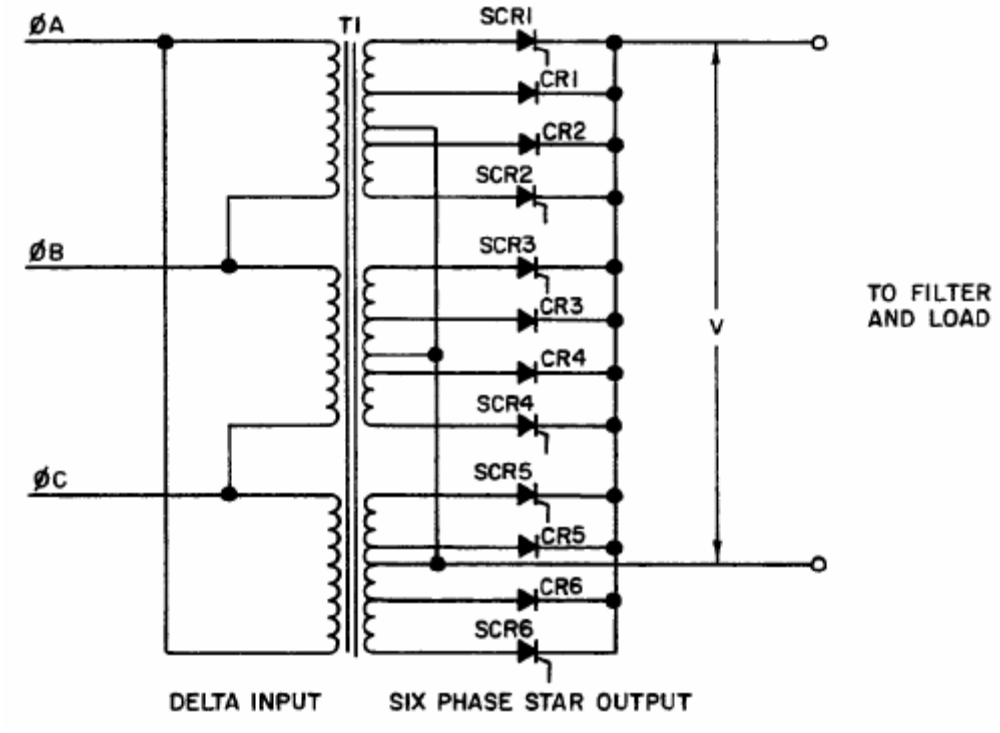


Figura 4.8
Circuito rectificador trifásico con derivación cental, fase contolada con circuito amplificador de refuerzo

El punto en que los thrystores son disparados con respecto del medio ciclo de ac determina la tensión de salida, si son disparados al inicio del medio ciclo la salida del rectificador es alta, si son disparados al final del medio ciclo la tensión de salida depende de la tensión disponible desde los devanados de los diodos en el secundario. La ventaja de dicho circuito es que incluye una subida repentina de tensión muy pequeña cuando el thyrstor es disparado a conducción lo que resulta en un bajo TIF también como un mejoramiento del factor de desplazamiento, éste tipo de circuito requiere de un pequeño filtro.

4.3.2.4. Circuito variador de fase (phase shifting)

Los circuitos de rectificación por thrystores producen distorsión en la ac de la línea, un circuito proveedor de una componente de tensión defasada respecto al tensión de referencia (phase shifting circuit) es construido en los rectificadores que manejan como corriente de salida entre 400 y 800 A, éste minimiza la distorsión de la ac de línea mediante el cambio de fase de la corriente de entrada del rectificador con respecto a la linea de ac, ésto resulta en baja distorsión acumulada de la línea de ac cuando operan dos o más thrystores controlados en paralelo. La característica de defasamiento es incorporada al transformador principal y cambia la fase ± 15° por el simple intercambio de dos de las fases, vectorialmente se muestra en las figuras 4.9 y 4.10, la primera muestra

un cambio de fase de + 15° las líneas punteadas representan el cambio y el triangulo de trazo más fino representa los devanados del transformador, la rotación de fases es en sentido de las manecillas del reloj y el transformador adelanta la ac 15° proveyendo un cambio de fase de + 15°. Si son intercambiadas las fases B y C la rotación vectorial de las fases queda como en la figura 4.10 la rotación de fases queda en sentido contrario a las manecillas del reloj causando un retraso de línea de 15° dando un cambio de fase de –15°.

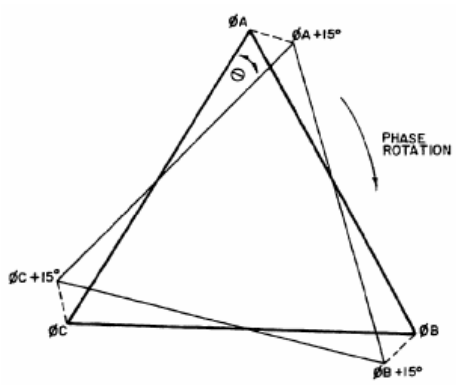


Figura 4.9
Fasores en rotación de fases en sentido de las manecillas

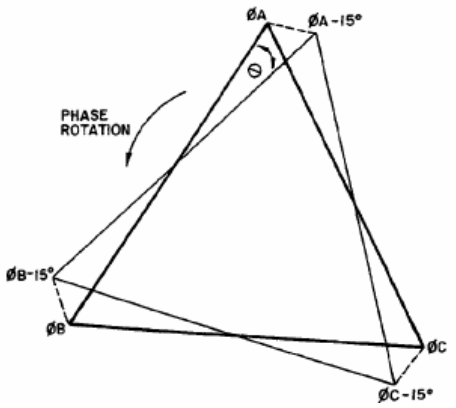


Figura 4.10
Fasores en rotación de fases contrario a las manecillas

4.3.2.5. Regulación de la tensión de salida

Un equipo para cargar la batería (cargador) requiere de mantener constante la tensión de salida de dc a pesar de las variaciones en la tensión de ac de la entrada, y necesita limitar la corriente de salida para prevenir que opere una protección por fusible o daño en componentes, la figura 4.11 muestra las características ideales de un cargador automático, para lograr el efecto requerido es necesario tener alguna forma de realimentación para corregir la distorsión en la señal, aplicando una señal de error al amplificador para corregir el error.

El concepto requiere de la medición de las salidas tanto de tensión como de corriente para que sean comparadas con referencias generadas de forma interna y aplicar una señal de corrección a una red activa que responde a pulsos discretos de corriente o tensión (pulse circuit), un diagrama de bloques es mostrado en la figura 4.12, los pulsos de control de los thrystores son generados por medio de una red activa responde a pulsos discretos (pulse circuit) la cual responde a la comparación de las señales alimentadas en un circuito comparador, pueden ser utilizados varios tipos de circuitos para generar las variables de tiempo para disparar los thrystores con precisión, el diagrama de bloques de la figura 4.13 muestra un ejemplo.

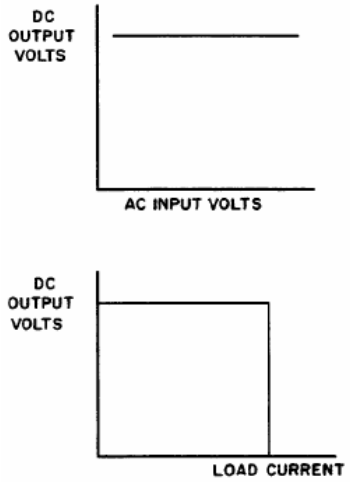


Figura 4.11
Característica de ub cargador automático ideal

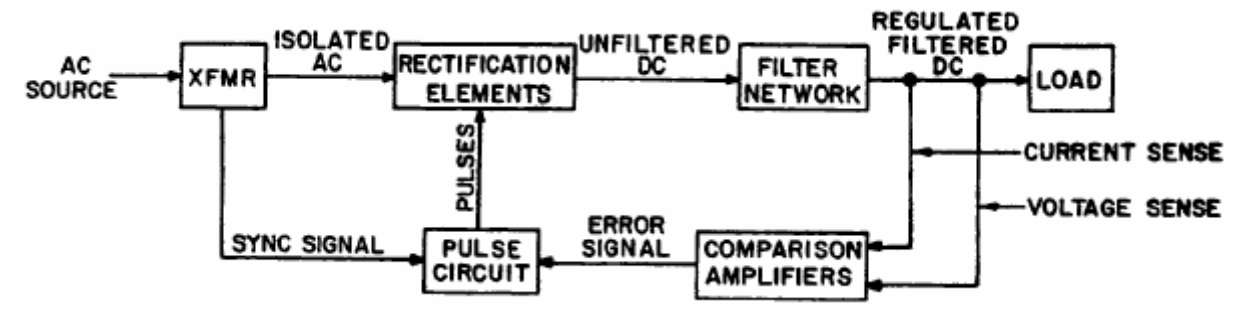


Figura 4.12
Diagrama de bloques del control secundario por SCRes

Al inicio de cada medio ciclo el circuito de sincronía restablece el tiempo de retraso e inicia una temporización, la longitud del intervalo de tiempo está determinado por la magnitud de la señal de tensión desde el amplificador de señal de error, al final del intervalo de tiempo el circuito de retraso de tiempo aplica una señal al generador de pulsos para encender el thrystor apropiado, un circuito típico de retraso de tiempo puede cargar un capacitor a una relación variable generando así una rampa con alguna pendiente, cuando la rampa alcanza un nivel de tensión particular un pulso de salida es generado.

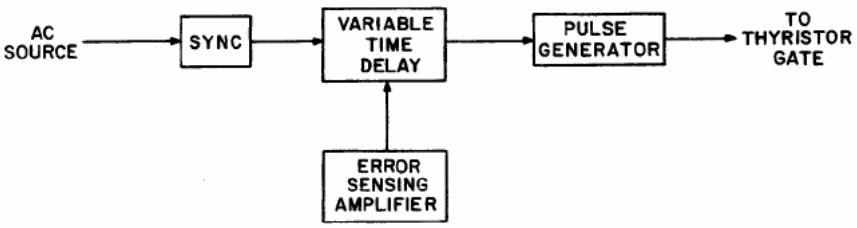


Figura 4.13
Bloques del circuito de disparo de thystores

4.4 Principios de ferroresonancia y rectificación por control ferroresonante

4.4.1 Operación ferroresonante básica

La clave del principio de operación ferroresonante está en el diseño del transformador ferroresonante, el cual consiste de un núcleo de hierro con devanados primario y secundario separados por derivaciones magnéticas en la ventana del núcleo, esas derivaciones desvían una parte del flujo inducido por el primario al secundario resultando en un cierto aislamiento entre los dos devanados. Un transformador con alta reactancia de dispersión entre primario y secundario que permite que los niveles de flujo en las dos secciones del núcleo sean diferentes en amplitud y en fase, la situación es análoga a un circuito en que el primario y el secundario están enrrollados en un núcleo convencional y el primario está conectado en serie con un inductor de igual reactancia a la reactancia de dispersión producida por las derivaciones magnéticas.

El circuito ferroresonante básico se muestra en la figura 4.14 es conectado un capacitor a la salida a través del secundario, el C1 y el T1 forman un circuito tanque resonante paralelo, con la elección del valor del capacitor correcto ese tanque es resonante a la frecuencia de la línea, Cuando es aplicado tensión suficiente de ac al primario de T1 ocurre un intercambio de energía entre C1 y T1 resultando en saturación de ac en la sección del secundario del núcleo del transformador.

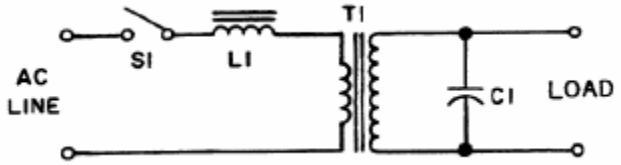


Figura 4.14
Circuito tanque (resonante) T1 C1 a la salida

Entonces una sección del transformador está saturada, una porción de la tensión secundario puede ser drenada, rectificada y filtrada por una fuente de dc relativamente constante a una carga. Cambios en la tensión de entrada del primario solo cambiarán el nivel de saturación del núcleo produciendo solo un pequeño cambio en la tensión de salida, cargando la salida se drena energía del circuito tanque reduciendo la saturación

del núcleo resultando solo un pequeño cambio en la tensión de salida. Sin embargo conforme la carga es incrementada aún más alla se alcanza un punto donde la energía en el circuito tanque es insuficiente para mantener al núcleo en saturación y la tensión de salida caerá rápidamente con un incremento adicional en la carga, bajo esa carga (que es pesada) la salida produce una corriente cercana a constante con incremento en la carga.

Las desventajas de un arreglo de ese tipo son:

- El grado de regulación de tensión es dependiente sobre las características magnéticas del material del núcleo
- No puede ser fabricado con extrema precisión
- La tensión de salida está determinado por el número de vueltas de la derivación del secundario y no puede ser cambiado
- La tensión de salida es sensible a la frecuencia de entrada
- La carga que comienza a la limitación de corriente cambia grandemente con la tensión de entrada, una alta tensión de entrada induce más energía en el circuito tanque y requiere más carga para llevar al núcleo fuera de saturación.

La desventaja de un circuito ferroresonante simple es superada mediante control electrónico del transformador ferroresonante.

4.4.1.1 Operación por control ferroresonante

El circuito de control ferroresonante utiliza un transformador como el descrito y un arreglo de circuito tanque adicionalmente incluye una inductancia variable conectada en paralelo con el capacitor del circuito tanque, de hecho, esa inductancia variable, es un inductor el cual es conectado y desconectado electrónicamente dentro y fuera del circuito tanque, puede ser utilizado un triac como elemento de control para sincronizar al inductor dentro y fuera del circuito tanque, el triac funcione como un thrystor bidireccional, a diferencia de un rectificador de silicio controlado SCR que conduce en una sola dirección, el triac exhibe características bidireccionales, puede ser utilizado como elemento de control el circuito tanque, la figura 4.15 muestra un circuito ferroresonante controlado básico.

La inserción del inductor en el circuito tanque cambia la impedancia del mismo y simula la saturación del núcleo, de manera que la tensión del capacitor del circuito tanque normalmente es menor que la tensión mínimo que podría ser visto con la carga más pesada y el menor tensión de entrada así como frecuencia, la tensión de salida puede ser

controlado electrónicamente para ser esencialmente independiente tanto de la tensión de entrada como la corriente de carga asimismo de la frecuencia y de las características magnéticas.

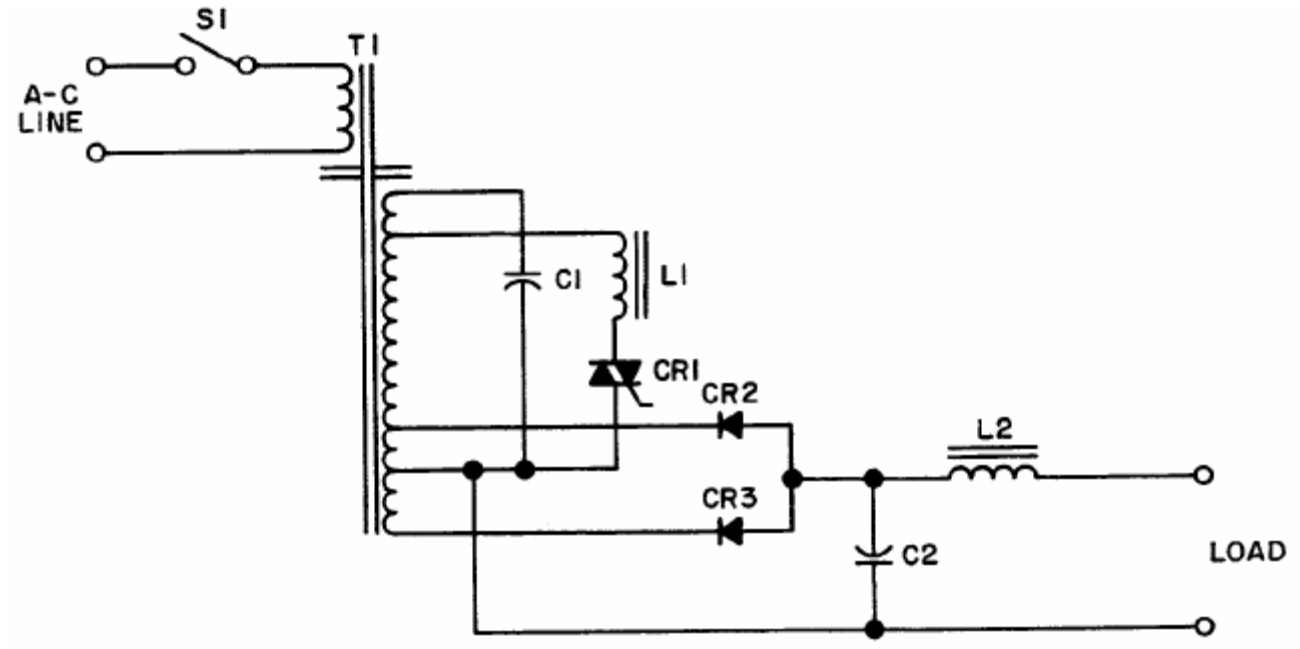


Figura 4.15
Circuito ferroresonante básico controlado

Por medio del encendido del triac variando el ángulo de fase respecto de la tensión de línea la tensión promedio del capacitor es cambiado así la tensión de salida es hecho grande o pequeño, si el control electrónico completo falla, la corriente máxima de salida suministrada del rectificador está limitada en un valor predeterminado debido a la alta inductancia de dispersión entre el primario y el secundario. El rectificador puede controlarse por medio de triac así tanto la tensión como la corriente de salida son controladas por realimentación, respecto de la tecnología anterior mencionada la diferencia respecto de la realimentación es que el elemento de control esta localizado en el circuito tanque como se puede ver en la figura 4.16.

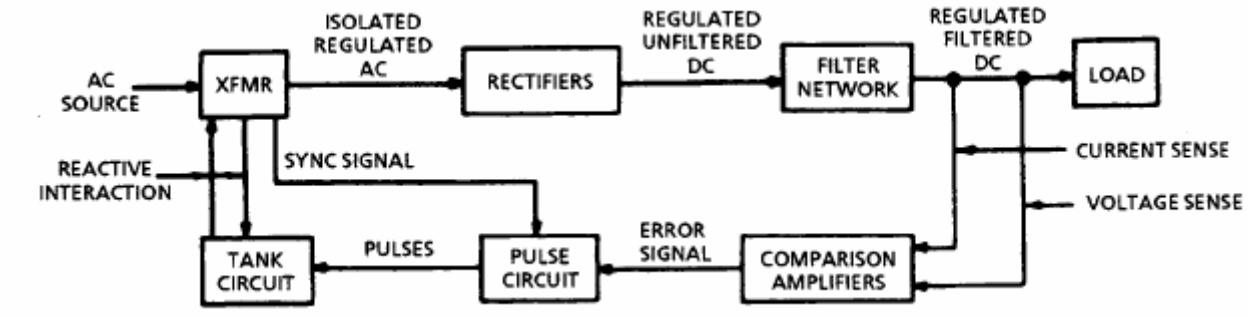


Figura 4.16
Diagrama de bloques de un rectificador con control ferroresonanante

4.5 Comparación entre rectificación regulada por thrystores y por control ferroresonante

4.5.1 Circuitos de control

Los circuitos electrónicos de control que determinan el ángulo de disparo del thrystor o triac son bastante semejantes tanto en diseño como en función, la mayor diferencia entre ambos existe en el efecto realizado por el cambio de ángulo de disparo de los pulsos de compuerta puesto que son utilizados dos diferentes tipos de circuitos de conversión. En el rectificador controlado por thrystores los SCRes controlados funcionan como elementos de regulación en serie, los elementos de regulación son conectados en serie con el circuito de potencia principal, de otra manera, el triac usado en el circuito de control ferroresonante como un elemento de regulamiento derivado (shunt regulating), Los elementos de control disparan al triac, el inductor de descarga y el capacitor resonante son conectados en paralelo con el circuito de potencia principal, cuando se considera el efecto del circuito de control electrónico en los elementos de regulación de potencia los resultados que ocurren son opuestos, el avance del ángulo de disparo de los pulsos de compuerta del circuito de control resulta incrementado, la salida del rectificador cuando se usa regulación por trhystores (SCRes) sin embargo es decrementada la salida cuando se utiliza regulación por control ferroresonante.

4.5.2 Diferencias en factor de influencia telefónica TIF

Las curvas contenidas en la figura 4.17 describen un ejemplo de la influencia de funcionamiento más distintiva entre rectificadores regulados por thrystores y controlados por control ferroresonante, el factor de influencia telefónica es una medición de la influencia probable a la cual las líneas de potencia provocan un acoplamento cerradamente cercano a las líneas telefónicas. Las curvas en la figura 4.17 muestran que a 100 % de carga en la razón de salida el TIF medido para un rectificador regulado por thrystores de 400 A es de 24,500 mientras para un ferroresonante es de 875.

4.5.3 Comparación de las corrientes de entrada

La forma de onda de la corriente de entrada en un rectificador determina el contenido armónico (la cantidad de ruido inducido) en la línea de alimentación de ac, la figura 4.18 muestra una forma de onda típica de alterna que alimenta un rectificador trifásico regulado

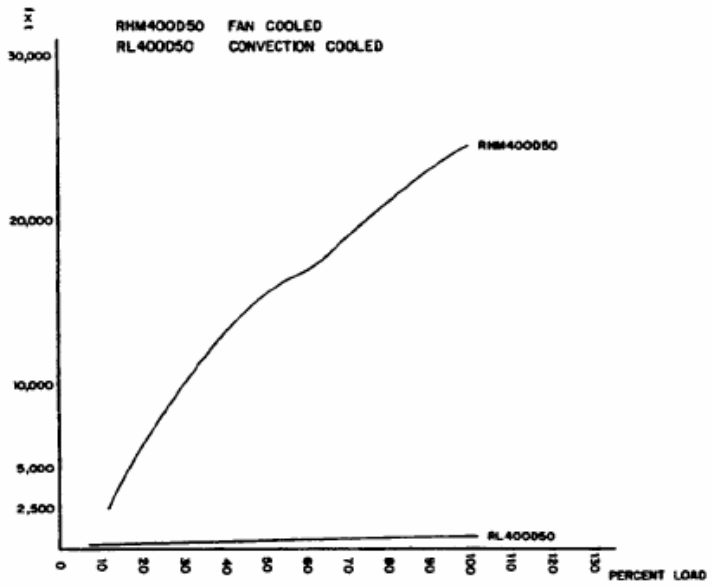


Figura 4.17
Curva típica de TIF (factor de influencia telefónica) de rectificadores de 400 A

por thrystores, la joroba doble del oscilograma corresponde al periodo de conducción de los dos thrystores, hay que notar el incremento agudo de corriente en los flancos de cada joroba doble en ambos medios ciclos tanto en el positivo como en el negativo, ese incremento de corriente instantánea ocurre en el momento correspondiente a cuando el thrystor tiene señal de compuerta para conducción y es responsable por mucho de la producción de ruido en la línea de ac. La figura 4.19 muestra una forma de onda de un rectificador trifásico ferroresonante, realizando una simple comparación no se observan incrementos abruptos en corriente, la forma de onda permanece muy cercana a la senoidal presentando solo una menor distorsión por ruido inducido en la línea de ac.

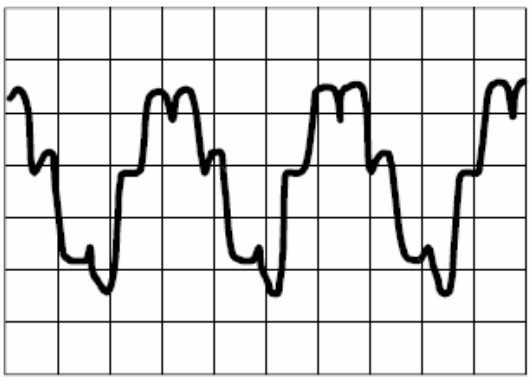


Figura 4.18

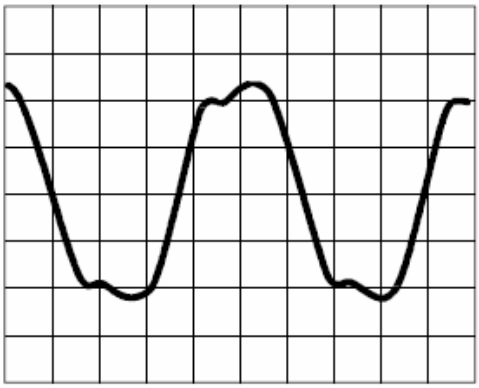


Figura 4.19

Forma de onda típica de corriente de entrada de un Rectificador trifásico regulado por thystores

Forma de onda típica de corriente de entrada de un Rectificador trifásico de control ferroresonante

4.5.4 Comparación de las tensiones de entrada

La forma de onda de la tensión de entrada para un rectificador corresponde con la forma de onda de la corriente en la medida que afecta los requerimientos de corriente de la línea de ac, una entrada típica de un rectificador trifásico regulado por thrystores se muestra en la figura 4.20 las muescas bruscas en la forma de onda de la tensión son efectos transitorios ocurriendo en los instantes de conducción de los SCRes, corresponden al incremento instantáneo de la corriente del SCR que muestra la figura 4.18. una entrada típica de un rectificador trifásico ferroresonante se muestra en la figura 4.21 se debe de notar que no se encuentran presentes efectos transitorios entonces no hay incrementos bruscos en la corriente de entrada de un rectificador ferroresonante, ocurre una distorsión muy pequeña de tensión de ac.

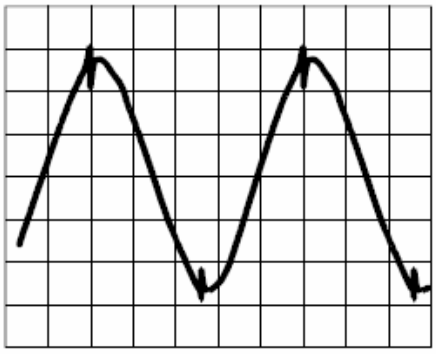


Figura 4.20
Forma de onda típica de tensión de entrada de un Rectificador trifásico regulado por thystores

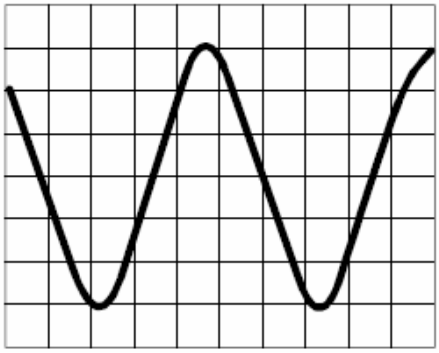


Figura 4.21
Forma de onda típica de tensión de entrada de un Rectificador trifásico de control ferroresonante

4.5.5 Comparación de factor de desplazamiento

La relación entre tensión y corriente de entrada es cuantificada por el valor del factor de desplazamiento, la figura 4.22 ilustra las diferencias de factor de desplazamiento entre un rectificador regulado por thrytores y un ferroresonante, las diferencias en valores de las curvas pueden atribuirse a las diferencias entre las formas de onda de las corrientes de entrada, los rectificadores regulados por thrystores producen un efecto de pico en la corriente de entrada como muestra la figura 4.18 existe un poco (algo) de factor de desplazamiento comparado con el rectificador de control ferroresonante, típicamente un rectificador regulado por thyrstores exhibe factores de desplazamiento mayores de 90 %,

en un amplio rango de carga desde menos de 20 % hasta 100 % en la salida, Para propósitos de aplicación en un rectificador con un alto factor de desplazamiento se requiere de baja corriente de entrada de ac la cual se traduce en bajo precio en alimentación.

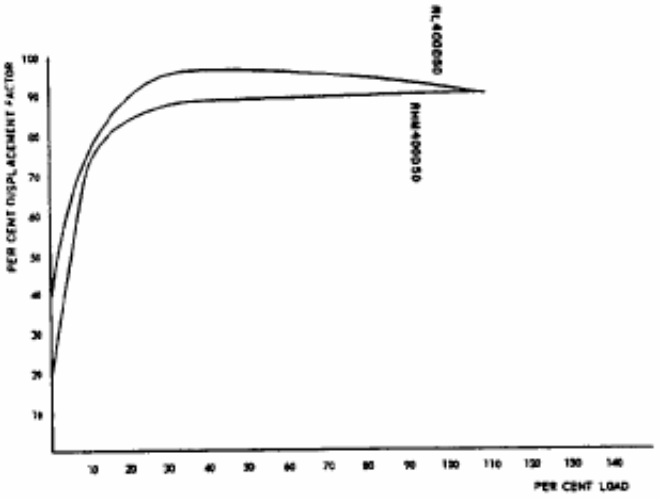


Figura 4.22
Curvas de factor de desplazamiento

4.5.6 Comparación de eficiencia

Las curvas de eficiencia para un recificador regulado por thrystores y uno ferroresonante se ilustran en la figura 4.23 la eficiencia de un rectificador regulado por thrystores alcanza un valor máximo a cargas livianas, aproximadamente 30 % de la relación de salida entonces declina ligeramente hacia 100 % de carga. Un rectificador ferroresonante logra su mejor eficiencia a altas cargas comenzando en 60 % de la relación de salida permaneciendo aún cercanamente constante a cargas altas, ciertas pérdidas fijas dentro del circuito tanque ferroresonante previenen al rectificador de lograr altas eficiencias a cargas livianas.

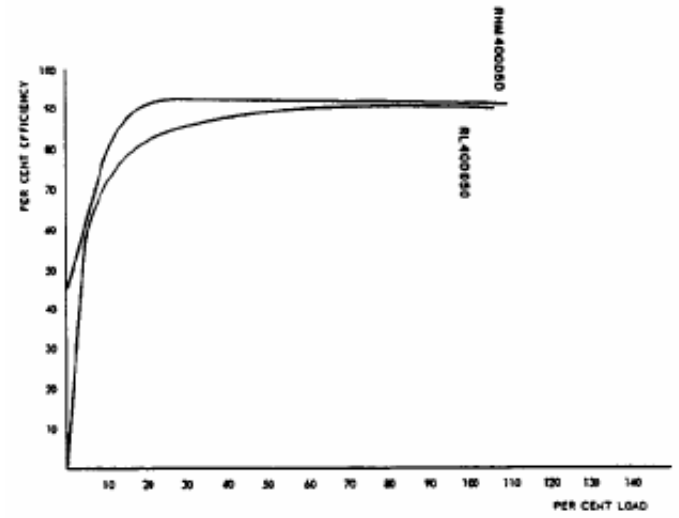


Figura 4.23
Curvas típicas de eficiencia

4.6 Rectificación basada en alta frecuencia

Pueden ser utilizados rectificadores basados en tecnología de alta frecuencia con frecuencias de coversión de 20 kHz hasta 200 kHz para aplicaciones de eliminador y carga de batería, la utilización de conversión por alta frecuencia crea distintas ventajas comparada sobre las tecnologías antes mencionadas para aplicaciones sobre los mismos rangos.

- Se reduce el tamaño y peso de los componentes magnéticos como son transformadores e inductores interiores del rectificador por lo que el peso y su tamaño se reducen sustancialmente, resultando por tanto en un decremento en el espació y sus requerimientos de instalación. Como son compactos son la elección ideal para espacios restringidos.
- Aceptan un amplio rango de alimentación en alterna y frecuencia (rango extendido) mientras mantienen su regulación de tensión.
- Pueden ser instalados con elementos moto generadores de alterna para respaldarlos en caso de ausencia prolongada de alimentación.

4.6.1 Introducción

En las secciones previas se examinó la conversión de energía de ac a dc operando cerca de la frecuencia de línea resultando en unidades magnéticas y filtros de un tamaño considerablemente grandes, llegan a ser de menor tamaño las unidades magnéticas y filtros conforme se va aumentando la frecuencia de conversión de potencia, los

componentes operando a miles de Hertz pueden ser bastante pequeños. La utilización de las fuentes de alta frecuencia ha sido limitada para aplicaciones de baja potencia, la conversión por alta frecuencia es ampliamente utilizada en circuuitos de conversión dc – dc, los avances en tecnología permitieron la existencia de transistores de alta potencia con los cuales es posible convertir miles de Watts a frecuencias tales como 200 kHz y con ello se logró el desarrollo de rectificadores de alta frecuencia.

4.6.2 Alimentación y circuito de entrada

Un rectificador de alta frecuencia es una fuente de potencia en off-line, lo que significa que la ac de alimentación es rectificada inmediatamente para producir una fuente de alta tensión para el circuito interruptor de potencia (power switch), la frecuencia de entrada típica tiene es de entre 47 y hasta 63 Hz, algunos modelos de rectificadores monofásicos pueden operar con alimentación de 120 Vac o 208/240 Vac entonces por medio del cambio en una deivación la fuente de dc para el interruptor de potencia (power circuit) puede ser fijada en una de las tensiones, a pesar de la alimentación la alta tensión al interruptor de potencia (power switch) es derivado en una de dos alternativas dependiendo de la alimentación disponible.

Para un rectificador alimentado a 208/240 Vac la entrada es aplicada a un puente rectificador de onda completa simple como el mostrado en la figura 4.24, la tensión resultante de dc derivado de los diodos del puente CR1-CR4 carga los capacitores C1 y C2 (si el rectificador no está diseñado para 120 Vac los capacitores que aparecen en serie pueden ser sustituidos por uno solo) la tensión de salida filtrado puede ser aplicado al interruptor de potencia, el punto medio de los capacitores mostrados en la figura puede o no ser utilizado dependiendo de los requerimientos.

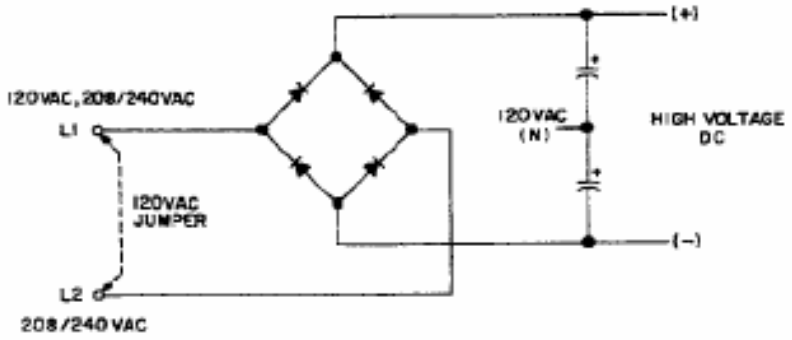


Figura 4.24
Circuito de rectifición de entrada 120-208 / 240 Vac

Si está operando a 120 Vac la tensión de entrada debe ser duplicado utilizando un circuito duplicador de manera que su entrada tenga el mismo valor como si fuera de 208/240 Vac, utiliza también el circuito de la figura 4.24 pero usa diferentes puntos como entrada, el lado de entrada de 120 Vac es conectado a las terminales L1 y L2 por medio de un puente, el neutro de la ac es conectado a la unión de C1 y C2. Durante el medio ciclo positivo de la entrada CR1 y CR2 conducen y C1 carga según la polaridad respecto al neutro mostrada en la figura 4.24. Durante el medio ciclo negativo CR3 y CR4 conducen y C2 carga en la polaridad mostrada respecto al neutro, las tensiones aplicadas a través de C1 y C2 entonces se adicionan los capacitores que están conectados en serie. La alta tensión derivada de una entrada 120 Vac es de un valor aproximado al mismo que entrega una alimentación de 208/240 Vac.

Algunos tipos de rectificadores de alta frecuencia tienen un rango de alimentación de 120 – 240 Vac sin derivación, tienen un circuito de corrección de factor de potencia PFC que ofrece baja distorsión y un amplio rango de alimentación de ac, algunos operan a 208/240 Vac y adicionan un circuito PFC, existen otros que operan en alimentación trifásica en 208/240 Vac, 380 Vac o 480 Vac normalmente son unidades de 200 A y 48 Vdc (50 V dc nominales) de salida que utilizan un circuito PFC pasivo.

4.6.3 Interruptor de potencia (power switch)

El alta tensión de dc obtenido desde la línea rectificada no es adecuado para proporcionar energía a una carga o cargar una batería, la tensión debe ser ajustado y regulado conforme los requerimientos de la carga, se requiere alta eficiencia, un circuito de reducción de tensión, de manera que es requerido un regulador de disipamiento. Dos tipos de circuitos cumplen ese criterio; el medio puente de dos transistores y el puente completo de cuatro (power switches), ambos ejecutan la misma función convirtiendo el alta tensión de dc en una onda cuadrada de ac adecuada para uso con un transformador de aislamiento que baja la relación de tensión, para minimizar el tamaño de los componentes magnéticos y mantener la operación del circuito por arriba del rango audible la frecuencia de conversión del circuito de conmutación (switching circuit) es de 20 kHz.

4.6.3.1 Interruptor de potencia de medio puente

Para aplicaciones que requieren niveles de potencia de salida menores de 1 kW puede ser utilizado el interruptor de potencia de medio puente mostrado en la figura 4.25, en muy bajas potencias (menores de 12 A) se utiliza ese método, en ése tipo de circuito los

transistores conducen alternativamente para generar una onda cuadrada en el primario de T1, Q1 y Q2 reciben señales de control en las bases desde un circuito externo que controla los estados de conducción y corte de los transistores.

Para explicar asumimos que la señal de control de base polariza en directa a Q1 mientras en inversa a Q2, la tensión a través de C1 y C2 es el alta tensión de dc derivado del circuito de rectificación de entrada de ac, con Q1 conduciendo fluye corriente a través de la juntura colector – emisor CE el devanado primario de T1 y por C4 (cerrando el circuito), esa corriente induce una tensión a través del devanado primario de T1 tal que la terminal 1 es positiva y 2 negativa.

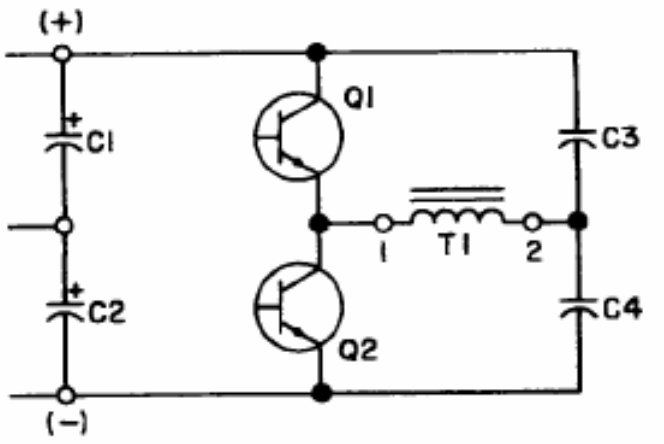


Figura 4.25
Diagrama esquemático simplificado de
Un interruptor de potencia (power switch) de medio puente

El circuito de control de señales de las bases remueve la polarización de Q1 en el tiempo correcto pero no polariza a Q2 en directa de forma inmediata, ocurre un tiempo muerto de duración controlada durante el cual ambos transistores permanecen en corte sin que fluya corriente a través de T1, controlando el tiempo muerto de ambos transistores pueden ser controlados la cantidad de potencia y fundamentalmente la tensión y corriente disponibles para la carga en el primario de T1. Un largo tiempo muerto resulta en una mínima potencia disponible y un tiempo muerto corto maximiza la potencia disponible.

Cuando Q2 está conduciendo mientras Q1 permanece en corte fluye corriente a través de C3, T1 y la juntura CE de Q2 en T1 (tiene dirección inversa a la anterior) es tal que induce una tensión en que 1 es negativo y 2 es positivo, completando así un ciclo completo de operación del interruptor de potencia de tal modo que induce un ciclo completo de ac en el primario de T1, aún cuando la duración de medio ciclo cambia de acuerdo a los requerimientos de potencia, la alta frecuencia de operación es constante.

4.6.3.2 Interruptor de potencia de puente completo

Si los niveles de potencia exceden 1 kW es requerido un interruptor de potencia de puente completo como el que muestra la figura 4.26 los transistores utilizados en éste tipo de puente son pares complementarios, de forma que, Q1 y Q4 operan juntos igualmente Q2 y Q3, señales de base son aplicadas a esos pares de transistores tales que la señal aplicada a Q1 está 180° fuera de fase con la señal aplicada a Q2, asimismo la señal aplicada a Q3 está 180° fuera de fase con la aplicada a Q4 en adición las señales de conducción o de base están relativamente defasados una a la otra para propósito de control de potencia en el devanado primario de T1.

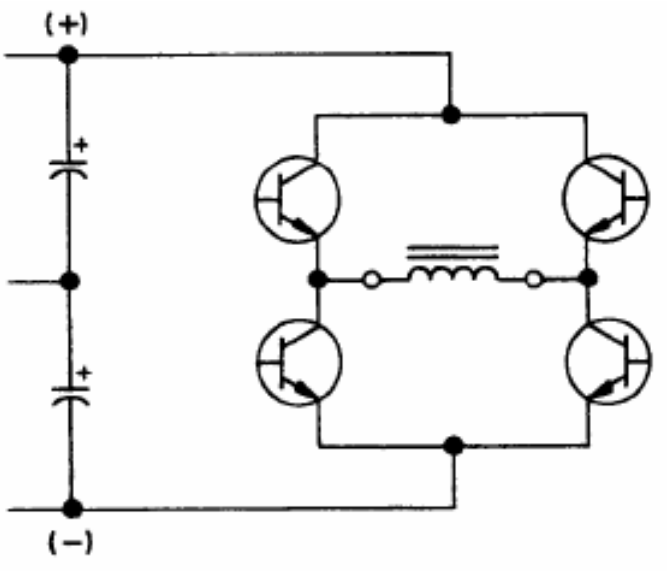


Figura 4.26
Diagrama simplificado de
Un interruptor de potencia (power switch) de puente completo

Para explicar consideramos que Q1 y Q4 constituyen el primer par a conducir, es aplicada polarización en directa a Q1 entonces siguiendo en un retraso de tiempo a Q4 también, fluye corriente en CE de Q1 a través del transformador y en CE de Q4 dicha corriente induce en T1 una tensión tal que 1 es positivo y 2 es negativo; el circuito de control de señales de las bases remueve la polarización de Q1 mantiene a Q4 conduciendo, simultaneamente Q2 es polarizado en directa y Q4 está conduciendo por un periodo de tiempo durante el ciclo de operación del interruptor de potencia durante el tiempo que Q2 y Q4 están conduciendo ambos T1 es sujetado y es desarrollada muy poca potencia.

Al tiempo correcto del control de señales de bases remueve la señal de Q4 y aplica polarización directa a Q3, fluye corriente en Q3, el primario de T1 y Q2, la corriente en T1

es en dirección inversa a la de cuando conducen Q1 y Q4 induce una tensión tal que 1 es negativo y 2 es positivo, durante el complemento del ciclo de operación del interruptor de potencia T1 es sujetado por Q1 y Q3, un ciclo completo de ac en el primario de T1 ha sido entonces generado, la cantidad de potencia disponible a la carga es controlada, el control de potencia ocurre por defasamiento de las señales complementarias de control desde 0° hasta 180° de desplazamiento. 0° significa en alta potencia en la salida y 180° en mínima.

4.6.3.3 Circuito convertidor resonante

Éste circuito difiere considerablemente respecto al convertidor de potencia, en las técnicas antes descrito los transistores actúan para inciar y parar el flujo de corriente de manera similar a un circuito de apertura y cierre, la corriente puede iniciar abruptamente para fluir cuando el interruptor esta cerrado y para abruptamente cuando el interruptor es abierto. En el convertidor resonante no hay flujo abrupto de corriente cuando el interruptor es cerrado, en lugar de ello se inicia un pulso de corriente senoidal, la amplitud y duración del pulso de corriente está determinado por los componentes del circuito resonante, impedancia y frecuencia de resonancia, cuando el pulso de corriente ha vuelto a cero el interruptor nuevamente es apagado, de éste modo el esfuerzo en los transistores llega a ser mucho menor porque el transistor es encendido y apagado con corriente cero, la figura 4.27 muestra un circuito resonante en serie simplificado, los transistores encienden alternadamente para entregar pulsos de corriente en el transformador de potencia.

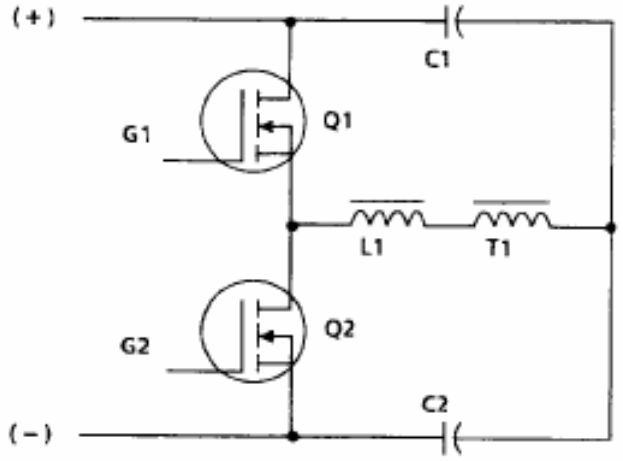


Figura 4.27
Circuito resonante en serie simplificado

Éste circuito regula la tensión de salida por medio del cambio en la relación a la que entrega pulsos de corriente al filtro de salida, en la figura 4.28 se ejemplifican tres ejemplos de flujo de corriente resonante, el primer ejemplo describe una condición de

carga pesada, los pulsos están muy cerrados entregando una gran cantidad de energía al filtro, en el segundo ejemplo los pulsos los pulsos están distantes y entrega menos energía que en el primero, y en el último los pulsos están aún más distantes indicando que el circuito convertidor está operando a carga muy liviana.

El circuito convertidor resonante es una fuente de corriente, son producidos y entregados pulsos de corriente al circuito de salida sin necesidad de filtro pues es una fuente de corriente reduciendo así la complejidad del filtro de salida.

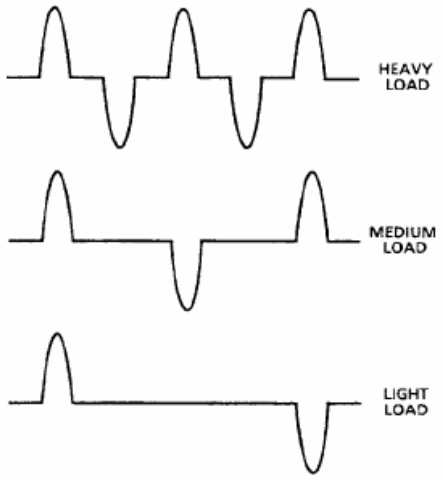


Figura 4.28
Pulsos de corriente resonante

4.6.3.4 Topología de convertidor realimentado (fordward converter)

Rectificadores mono y bifásicos de 25 A 50 V, 50 A 50 V y 100 A 25 V nominales de salida utilizan éste tipo de topología, éste circuito difiere ligeramente sobre el anterior y los previos donde simultáneamente conducían y cortaban los transistores por grupos a un tiempo, en que utiliza modulación por ancho de pulso PWM como en el puente rectificador pero solo en una polaridad. Una ventaja del convertidor realimentado (forward converter) de dos transistores es que puede utilizar un transistor de baja tensión con una baja resistencia, una ventaja adicional es que, el circuito de restablecimiento del transformador es de mayor simplicidad y efectividad, la figura 4.29 muestra un circuito simple de convertidor realimentado.

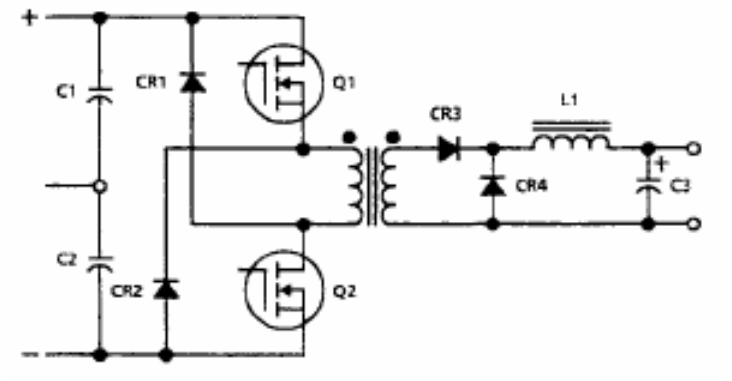


Figura 4.29
Convertidor realimentado (feed fordward converter)

En éste tipo de circuito de conversión de potencia los dos transistores de efecto de campo FETs conducen simultáneamente generando una onda cuadrada en el primario de T2, Q1 y Q2 reciben señales de compuerta (control) desde un circuito externo que controla los estados de conducción y corte de los transistores.

La tensión a través de C1 y C2 es el alta tensión derivado por el circuito de rectificación, el circuito de control de señales de compuerta polariza en directa Q1 y Q2, la corriente fluirá en la juntura drenador – fuente (drain - source) DS de Q1 el primario de T1 y la misma juntura DS del Q2, esa corriente induce una tensión a través del devanado de T1 tal que 1 es positivo y 2 negativo, CR1 y CR2 están polarizados en inversa sin fluir corriente a través de ellos. La señal de control de compuerta remueve la polarización directa de Q1 y Q2 en el tiempo requerido interrumpiendo el flujo de corriente. Por medio del control de apagado de Q1 y Q2 la cantidad de potencia así como corriente y tensión pueden ser controlados y disponibles para la carga, un tiempo corto de conducción minimiza la potencia disponible, la energía almacenada que ha sido acumulada en T1 durante el flujo de corriente realimentada debe ser removida en dirección opuesta.

En el primario de T1 1 es negativo y 2 es positivo en éste momento, CR1 y CR2 ahora están polarizados en directa y conduciendo, la energía almacenada en T2 será retornada a la alta dc a través de C1 y C2, un ciclo completo de operación del interruptor de potencia es completado ahora induciendo un ciclo de ac completo en el primario de T1, aunque la duración de la conducción de Q1 y Q2 cambia conforme los requerimientos de carga la frecuencia básica de operación es constante, la figura 4.30 compara el rizo en el transformador de un convertidor de puente y un convertidor realimentado.

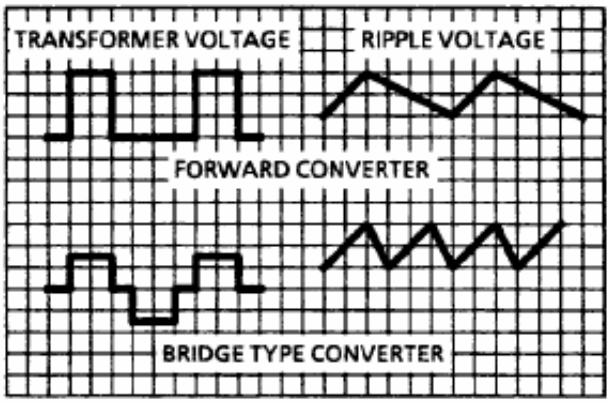


Figura 4.30
Rizo en el transformador de puente y en un convertidor realimentado (fordward converter)

4.6.3.5 Topología de puente completo tipo defasador por transición a tensión cero (phase shifted ZVT (zero voltage transition))

Las unidades de conversión de potencia PCUs las cuales pueden ser alimentadas en monofásicas o bifásicas para 50 A y 50 V o 100 A y 25 V nominales utilizan una topología de puente completo de defasador por transición de tensión cero ZVT (zero voltage transition) mejorando la eficiencia. El mejoramiento de eficiencia de la conversión de potencia por alta frecuencia requiere de reducción de pérdidas en comnutación. Cuando los convertidores de modulación por ancho de pulso PWM son operados en altas frecuencias se incrementan las pérdidas por corrientes parásitas de los dispositivos de conmutación, las pérdidas por conmutación son especialmente malas a altas potencias y altas tensiones de aplicación.

El puente completo de transición a tensión cero ZVT opera en un modo que provee conexión de los interruptores activados a tensión cero eliminando así las pérdidas en el encendido (de conexión a conducción) la conexión (conducción) a tensión cero se logra utilizando energía almacenada en la inductancia de dispersión del transformador para descargar la capacitancia parásita de salida de los interruptores antes de que se pongan en conducción, las señales de compuerta son tales que en lugar de conectar en diagonal dispositivos opuestos en el puente es introducido un defasamiento entre la rama izquierda y derecha determinando así la operación de un ciclo de trabajo del converidor.

El ZVT permite operación con pérdidas por conmutación y esfuerzo grandemente reducidas, elimina la necesidad de amortiguadores primarios, habilita una alta frecuencia de conmutación por el mejoramiento de la densidad de potencia y eficiencia de la conversión, ventajas que hacen a éste convertidor adecuado para aplicaciones de alta

frecuencia y alta potencia. la figura 4.31 muestra un interruptor de potencia de puente completo defasador por transición a tensión cero ZVT.

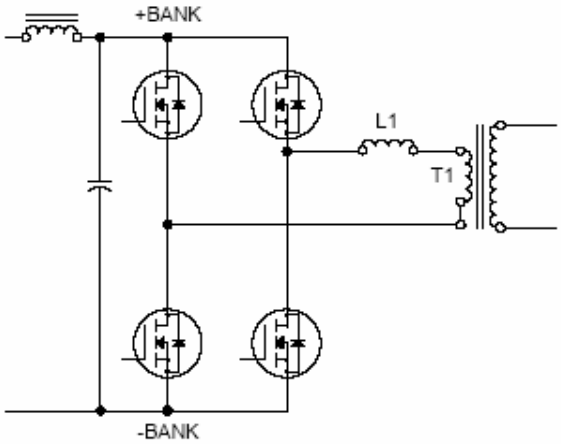


Figura 4.31
Diagrama esquemático simplificado de un puente completo defasador por transición a tensión cero ZVT (phase shifted ZVT)

4.6.4 Rectificación secundaria (en el secundario)

Todos los circuitos interruptores de potencia producen una onda cuadrada en el primario del transformador de potencia, la relación de vueltas del transformador es elegida para reducir la tensión de ac en el secundario, entonces esa ac de alta frecuencia es rectificada y filtrada para proveer la dc de salida a la carga, entonces la ac de alta frecuencia es rectificada y filtrada para proveer la dc de salida a la carga, pueden ser utilizados dos circuitos rectificadores básicos, uno que ha sido anteriormente discutido, para aplicaciones < 200 A, el rectificador de onda completa con filtro que contiene un inductor y uno o más capacitores es suficiente, en aplicaciones de alta corriente de salida el circuito medio puente paralelo proporciona distintas ventajas, como muestra el esquema de la figura 4.32 se incorporan devanados secundarios múltiples para la salida en el núcleo de un transformador, ese método de construcción y diseño optimiza la distribución de potencia del secundario proveyendo un devanado individual para cada diodo usado.

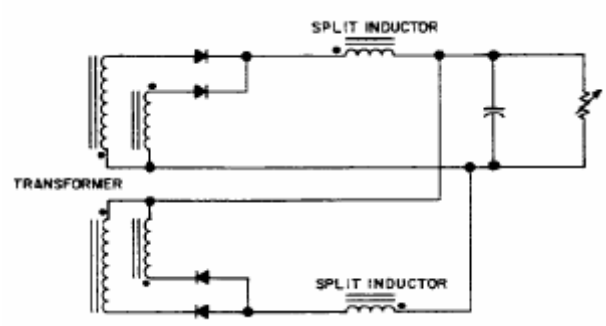


Figura 4.32
Rectificación de medio puente paralelo

Los diodos y los devanados del transformador operan en pares así dos diodos conducen durante el primer medio ciclo, CR1 y CR3 y sus devanados asociados conducen durante uno de los medios ciclos, igualmente CR2, CR4 y sus devanados asociados conducen durante el segundo medio ciclo, la corriente que fluye a través de la carga RL es unidireccional, por tanto la carga ve una fuente de dc, L1 y C1 forman el filtro de salida pero son relativamente pequeños porque la frecuencia de rizo es el doble de la frecuencia de conversión.

4.7 Operación de un rectificador de alta frecuencia por bloques

La forma en que un rectificador integra en su funcionamiento los circuitos que fueron descritos en los puntos de la sección 4.3 (hasta el 4.3.2.4) y de la sección 4.6 (hasta el punto 4.6.4) del presente estudio es organizada en forma de un sistema constando de varios bloques descritos en la figura 4.33.

Considerando un rectificador de -48V de salida (nominales, su tecnología en sí no tiene discrepancia mayor que si fuera de + 24V) alimentado por una fuente de alterna de rango extendido 184-264 Vac 50/60 Hz operado con interruptores de protección adecuados, el primer bloque que trabaja es el bloque de rectificación primaria (figura 4.8) que contiene un rectificador de onda completa, el cual entregará a su salida una onda senoidal rectificada de 120 Hz y 340 V de pico a neutro, de hecho entrega un tren de pulsos, con alto rizo, dicha señal entra a un bloque que filtra y almacena la señal en capacitores la tensión y entrega una señal de 290 V dc que contiene un rizo de 30 mV pico – pico de 120 Hz.

Un interruptor de potencia de tecnología de transistores (figuras 4.25 a la 4.31) realiza una tranformación de la señal entregando una señal rectangular de alta frecuencia 100kHz o mayor de 525 V dc pico –pico con un ciclo de trabajo de 66%, esa señal se hace pasar a un transformador reductor de una relación de transformación de 1:2.1, con lo que aísla las etapas y baja la tensión al 47.62% de la forma de onda, a su salida se obtiene 250 V pico –pico.

Un rectificador secundario (figura 4.32) convierte la señal en un tren de pulsos de dc de 136 V pico – pico de alta frecuencia, puede ser 200 kHz o menor, luego pasa por un filtro

de dos etapas que es el que se encaga de entregar la señal de salida adecuada (con bajo nivel de ruido, uniforme y alizada) para alimentar los equipos de telecomunicaciones.

Para lograr que el rectificador se controle y entregue la tensión adecuado para alimentar los equipos de telecomunicaciones el rectificador realimenta dos valores, uno de tensión y uno de corriente, eso se le llama sensado remoto, normalmente los rectificadores tienen terminales de sensado remoto, la corriente es sensada por medio de una resistencia de baja relación y respuesta lineal (shunt), la tensión simplemente lo conecta de forma directa. Cada una de las variables entra a un amplificador comparador (de corriente y de tensión respectivamente, amplificadores de error para cada valor o parámetro) donde a cada uno de ellos entra un valor de referencia IOUT / VOUT que proporciona el microporocesador o un circuito de ajuste .

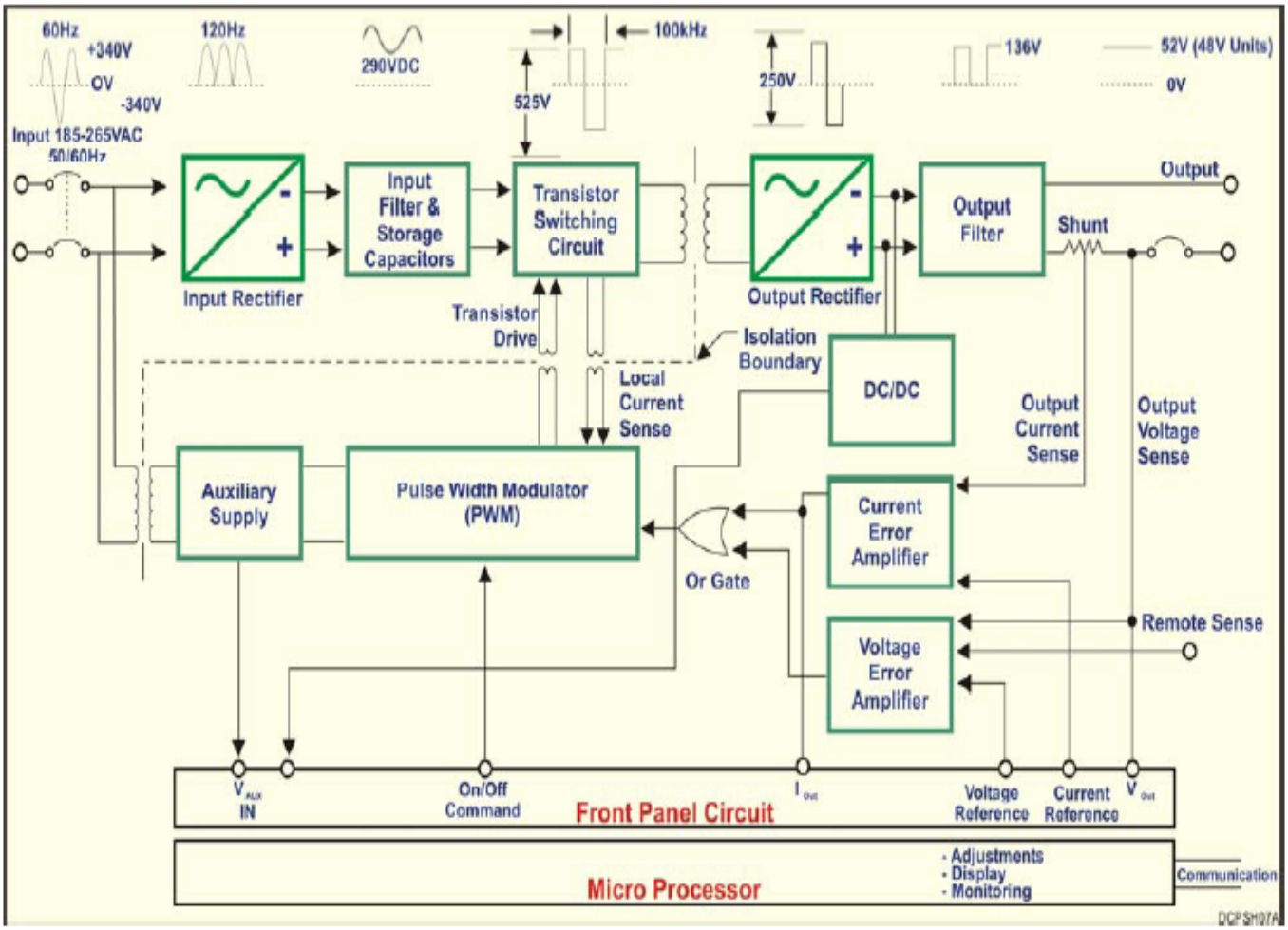


Figura 4.33
Diagrama de bloques de un rectificador de alta frecuencia con tecnología de microprocesador

Las salidas de los amplificadores de error se pasan a una etapa que hace las veces de una compuerta OR cuya salida entra a un modulador de ancho de pulsos PWM (para que

se consiga regulación de ambas variables tanto de corriente como de tensión), la etapa PWM controla el tiempo de ecendido de los transistores del interruptor de potencia para variar la salida comandada por los amplificadores de error, también sensa la corriente de los transistores de conmutación de forma instantánea para proveer a los transistores de protección ciclo por ciclo.

Una fuente de tensión alimentada desde un pequeño transformador de 50 / 60 Hz alimenta al PWM, recibe una señal de reloj que funciona como señal de encendido y apagado proveniente prácticamente del microprocesador interno del rectificador.

Como parte final cada variable o parámetro es visualizado por medio de un circuito de visualización con dígitos de segmentos o por medio de una pantalla de cristal líquido, todas y cada una de las etapas anteriores controladas desde el microprocesador del equipo.

4.8 Características de equipos rectificadores comerciales

Dada su tecnología, su fabricación así como las directrices de diseño a seguir en el cumplimiento de diferentes requerimientos los rectificadores tienen características que llevan a los usuarios y compradores a realizar un examen, un análisis para seleccionarlos, siendo las mismas las siguientes:

Para rectificadores de tecnologías por amplificador magnético, por diodos, por thystores y por control ferroresonante:

1. Regulación
2. Control de modo de operación flotación/igualación manual / automática.
3. Alarmas de alto/baja tensión HVA/LVA
4. Apagado por alta tensión HVSD
   - Selectivo
   - No selectivo
   - Remoto
5. Restablecimiento automático de rectificador
6. Compartición de carga
7. Drenado gradual de corriente de entrada
8. Paro remoto
9. Alarma de falla de rectificador RFA

10. Alarma de alto rizo HRA
11. Pérdida del lazo de realimentación
12. Carga parcial

Dentro de las características anteriormente mencionadas encontramos unas que por su nombre sobresalen y causan una cierta admiración en quienes no conocen el campo en que son empleados los equipos de rectificación ni los sistemas de fuerza en general para aplicaciones de telecomunicacioes; las alarmas; podemos definir como una alarma como un aviso que el(os) equipo(s) de rectificación, el(os) equipo(s) de conversión de potencia, planta de fuerza o sistema de fuerza, genera para enterar al operador responsable del sitio de telecomunicaciones en forma local y / o remota de un evento acontecido en los equipos de la planta de fuerza, *lo cual se debe interpretar primero que nada como un aviso y tomarse para su análisis aún en el momento que el propio equipo le llama alarma*.

Cada aviso (alarma) es generado por el equipo de acuerdo con sus características de diseño y es presentado normalmente en dos formas (aún cuando no siempre están disponibles ambas en todos lo tipos de equipos) una de ellas en forma local, la cual es un aviso luminoso en el tablero principal de la planta de fuerza y/o frontal del propio equipo donde se generó el aviso mediante un diodo emisor de luz (led) que regularmente tiene membrete serigráfico ya sea con siglas o palabras completas, la otra es para utilización a distancia o remota la cual es una posición o contacto (en ocaciones un par o tercia) de un conector o espacio en una terminal múltiple (porque puede tener varias señales disponibles) proveniente de la salida de un relevador simple disponible para realizar una conexión externa, normalmente de acuerdo a la filosofía del fabricante o al requerimiento del cliente final se tiene presencia de tensión en la terminal (o por el contrario usencia), con el objetivo de que sean conocidos los acontecimientos en el equipo de fuerza, esto porque en la mayoría de los casos las empresas de telecomunicaciones tienen puestos de manteniminento en cada localidad del país o regionalizados que se responsabilizan de la administración de los recursos y del funcionamiento ininterrumpido de los sitios de telecomunicaciones y requieren del monitoreo constante. Existen dependiendo de la empresa de telecominicaciones usuaria también las centrales de acopio de avisos, seguimiento por entidad o regionales y nacionales.

4.9 Criterios de selección

Como se revisó en el capítulo 3 en todo proyecto la selección de componentes de un sistema de fuerza va obedeciendo una serie de directrices que pueden resumirse en

características de entrada – salida, las cuales se enlazan unas con otras las etapas siendo las salidas de unas secciones las entradas de otras, una vez realizados los cálculos en una tabla de diseño se tienen las directrices, es decir ya sabiendo cuales son los valores de carga total o corriente a suministrar en dc en el peor de los casos posibles garantiza el correcto funcionamiento de la planta de fuerza, entonces se procede a la selección de cada uno de los componentes del sistema sin dejar de contemplar que todo sistema puede tener crecimiento (de hecho siempre hay). Los puntos siguientes sirven de base para seleccionar los equipos rectificadores que llevará un sistema de fuerza

1. Bajo rizo en la salida, para garantizar que la carga no se afectará por operación tanto con batería como sin batería en ambos casos donde ésta característica es de mayor importancia dado que la batería es un filtro a la salida de los rectificadores, porque las baterías de ácido de plomo reguladas por válvula VRLA deterioran su vida útil cuando son conectadas en sistemas con rectificadores con alto rizo de tensión a la salida.

2. Rango apretado de regulación de tensión en línea y en carga para garantizar que la batería está cargada apropiadamente y que la carga no recibe tensiones fluctuantes.

3. Configuración modular contra monolítica los rectificadores modulares ofrecen fácil reemplazo y extensión para el crecimiento de la planta de fuerza. No hay mucho que hacer para insalar.

4. Factor de potencia unitario, (PF > .95) es considerado de lo más importante en los avances hacia un monitoreo del factor de potencia incrementado, un factor te potencia pobre puede resultar en una sobrecarga en la factura de la energía (pago), En Europa es un requerimiento el factor de potencia unitario tanto para energía residencial como para comercial, en Norteamérca casi es igual la tendencia, hay dos tipos de mediciones del factor de potencia el desplazamiento y el real, la componente de desplazamiento del factor de potencial es la razón de la potencia activa de la onda fundamental 60 Hz, en Watts, respecto de la potencia aparente de la fundamental en Volt Ampers, éste es el valor que se usa para determinar el cobro o facturación de la energía, el factor de potencia real es la razón de la potencia total de entrada, en Watts, respecto de los Volt Ampers de entrada, éste incluye la onda fundamental y los armónicos, es utilizado para cálculos de eficiencia. Algunos diseños de rectificadores hace algunos años (20-15) hacían

corrección de factor de potencia a bajo costo, pero los de tecnología actual llegan incluso hasta un PF >= .99. Figuras 4.34 a y b.

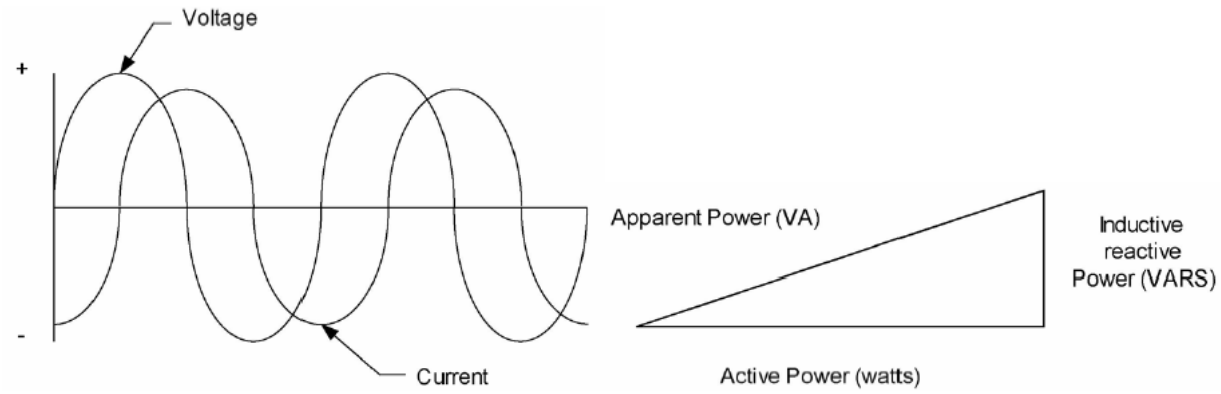


Figura 4.34

(a) Potencia en un circuito inductivo (b) Triángulo de potencias

5. Bajo factor de distorsión armónica total THD y corrientes armónicas dañinas, se refiere a la distorsión de la forma de señal de la energía de entrada representada por un porcentaje. Sección 10.2.4.

6. Alimentación trifásica o monofásica, para altas necesidades de potencia llega a ser de mayor importancia la trifásica para garantizar carga balanceada en la sección de suministro de potencia.

7. Alta eficiencia obteniendo beneficios de potencia y reducción de las capacidades de los interruptores de los alimentadores y calibre de los cables así como de los requerimientos de aires acondicionados.

8. Rango extendido de tensión de alimentación (franja ancha) para garantizar la tolerancia que presentarán los rectificadores a fluctuaciones tanto de tensión como de frecuencia sin apagarse.

9. Peso de la unidad y compactación ambos reducen las condiciones de mantenimiento y de transporte. Pueden ser modulares.

10. Carga compartida y balanceada, deben ser logradas ambas características con recitificadores del mismo diseño así como en ocaciones de otra tecnología, ya que en momentos críticos es necesario combinar tecnologías para mantener soportado el sitio (práctica común).

- Compartición forzada, trabaja en rectificadores en que se elije uno como unidad maestra (el de mayor tensión de salida) y los otros se forzan a ajustarse siguiendo al maestro y por tanto compartir su carga con él.
- Regulación de la caída de la tensión de salida; que permite una pequeña caída de la tensión de salida del rectificador en cualquier punto de carga desde nula hasta total o un poco más y antes del 10% de la carga completa, dicha regulación permite al usuario colocar otros rectificadores en carga compartida fácilmente y también mantener sus características de regulación de tensión de diferentes marcas de rectificadores. Figura 4.35.

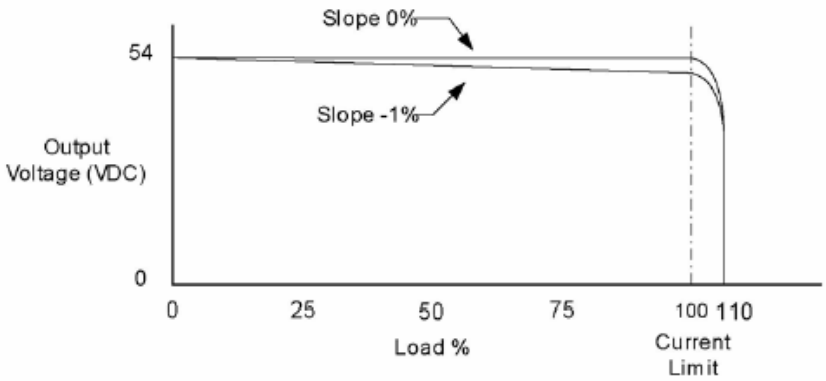


Figura 4.35
Pendiente de salida, regulación de tensión y límite de corriente

11. Limitación de corriente; restringe la corriente de salida del rectificador tanto con batería descargada como en condiciones de sobrecarga, operando sin daño. Figura 4.36.

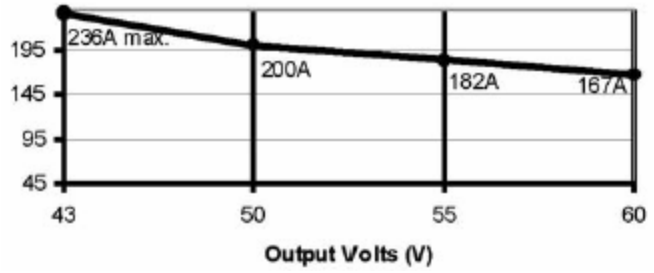


Figura 4.36
Corriente de salida de un rectificador -48V 200 A 10kW (ejemplo)

12. Limitación de potencia; permite al rectificador suministrar gran cantidad de corriente de salida cuando la tensión de salida permanece bajo, reduce el tiempo de recarga de batería y provee capacidades de sobrecarga así como la necesidad de rectificadores redundantes. Figura 4.37

13. Selector de modo de operación flotación/igualación que permite la selección trabajo en los modos de operación

- Modo de flotación; carga de batería normal (permanente) y suministro de carga a distribución
- Modo de igualación; es un modo de tensión de salida alto para recarga de batería cuando sea requerido, eliminando el sulfatamiento de los electrodos que resultan en desbalances de tensión y funcionamiento pobre, ésta es una carcterística para baterías de plomo – calcio de válvula a niveles de tensión reducidos que no es requerida por baterías VRLA bajo condiciones de operación normales.

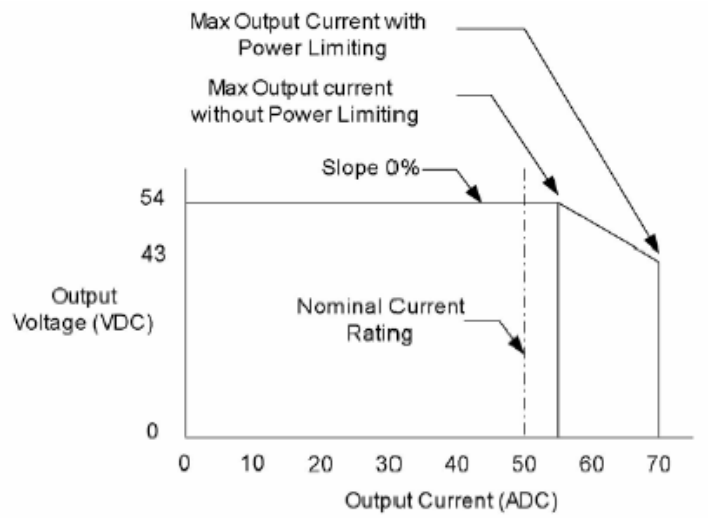


Figura 4.37
Limitación de potencia vc. limitación de corriente
(comparación de dos rectificadores 1/1 -48V - 60A – 3kW v.c. -48V – 50A 2.4.kW)

14. Corte por alta tensión automático HVSD o protección por alta tensión OVP (high voltage shutdown u over voltage protection) para apagar los rectificadores en caso de presentar condiciones de alta tensión previendo daño tanto para baterías como para carga, incluyendo un sistema de reestablecimiento para cuando la condición es temporal.

15. Arranque / Inicio suave son pasos que gradualmente conectan a un rectificador a las barras, eliminando el surgimiento de corrientes de inicio asociadas, el dimensionamiento de su interruptor de alimentación se decrementa y reducen los costos al instalarse

16. .Retraso de inicio ajustable es una propiedad que algunos rectificadores tienen de ser disparados con un tiempo de retraso reduciendo el esfuerzo en la alimentación que también permite que inicien a trabajar luego de los compresores de los aires acondicionados.

17. Alarmas; indicadores visuales locales y remotos de eventos (fallas) en componentes interiores del rectificador o del sistema de fuerza.

18. Sensado remoto; son cables conectados directamente entre la batería y los rectificadores vía fusibles del panel de distribución (no visibles la mayoría de las veces) que permiten al rectificador regular su funcionamiento de acuerdo con el comportamiento de la batería, mejorando la regulación de tensión elemento que resulta importante en sistemas que incorporan circuitos separados de carga y descarga o donde hay una caída de tensión significativa en los cables de batería

19. .Control y monitoreo remoto; que permite conocer el estado del sistema de fuerza en alguna otra localidad como puede ser una estación local, regional o central de monitoreo.

20. Diodo paralelizante (opcional); previene ruptura del sistema de dc ante un evento de falla interna de rectificador en sistemas que no tienen batería, un diodo de bloqueo previene que fluya corriente de vuelta desde los otros rectificadores a un rectificador que presentó falla. No es necesario en sistemas con batería.

Capítulo 5 Armónicos

5 Armónicos

5 Armónicos

5.1 General

Las perturbaciones que sufren las señales eléctricas son de especial importancia ya que provocan problemas que incluso para los usuarios finales la mayoría de las veces resultan inexplicables, se pueden observar problemas como:

1. Daño de arhivos (de cómputo) o pérdida de datos o pérdida de archivos completos.
2. Daño de discos duros.
3. Apagado de equipos.
4. Sobrecalentamiento.
5. Luces titilantes.
6. Acortamiento de la vida útil de equipos.
7. Atascamieto de equipos.
8. Quema de circuitos impresos.
9. Errores de comunicaiones.

Los problemas de calidad de energía tienen repercusiones en el servicio y podemos encontrar entre los de mayor importancia:

1. Condiciones de tensión cero por más de dos ciclos.
2. Baja tensión .
3. Transitorios de tensión.
4. Baja tensión estable.
5. Interferencia por radiofrecuencia o electromagnética.
6. Transitrios de corta duración, nanosegundos o hasta medio ciclo.
7. Armónicos.

De todas las anterores he colocado especial etención en los armónicos, los cuales normalmente son causados por cargas no lineales; cada tipo de problema o combinación de ellos en los sistemas de enería tienen diferentes causas y por lo mismo diferentes procesos son realizados para minimizar sus efectos. En el presente trabajo he realizado un estudio referente a armónicos en el que de manera general se analizan cuales son sus fuentes, como se pueden analizar las características de respuesta de un sistema, cuales son sus efectos más representativos, cuales son los procesos que se puden llevar a cabo para minimizar sus efectos, como se pueden efectuar medicines de los mismos y cuales son las recomendaciones para mantenerlos en los niveles soportables sin susceptibilidad de falla de un sistema.

5.2 Generación de armónicos

5.2.1 Convertidores de energía (rectificadores, inversores y convertidores)

Un convertidor de energía es un dispositivo o equipo que cambia energía eléctrica desde un tipo en su alimentación a otro tipo en su salida, como puede ser de energía en alterna a energía en directa ac-dc o por el contrario de energía en directa a energía en alterna cd-ac, un convertidor de energía semiconductor es un convertidor que usa dentro de su proceso de conversión semiconductores como sus elementos activos en diferentes circuitos. A partir de éste punto se llamará convertidor en general a cualquier dispositivo o equipo convertidor de energía.

5.2.1.1 Onda ideal de tensión

La figura 5.1 muestra un sistema de suministro de potencia trifásico alimentando un rectificador de puente de seis dispositivos (elementos) semiconductores, asumiendo que no tiene carga el sistema, la tensión línea-línea V_{LL} más alto (de mayor valor) que será conectado a un circuito de carga en directa dc a su salida tendrá la forma de onda que se observa en la figura 5.2.

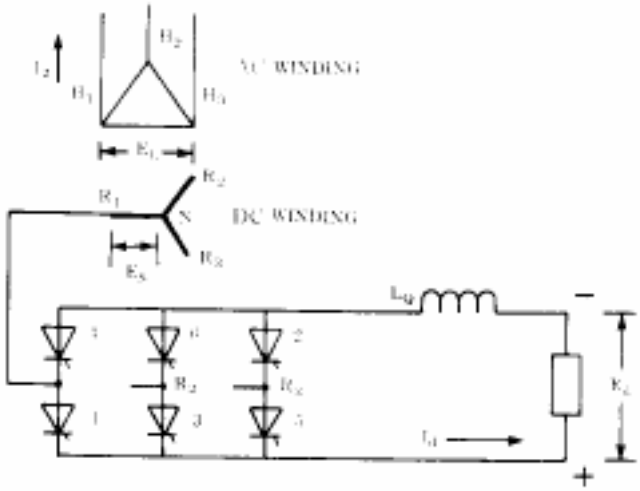


Figura 5.1
Circuito rectificador trifásico de puente de seis semiconductores

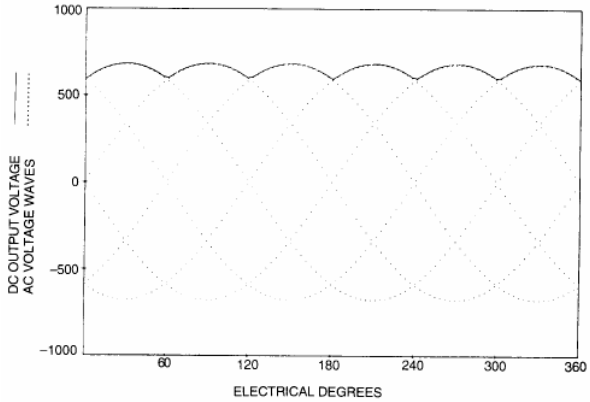


Figura 5.2
Forma de onda de tensión ideal del rectificador trifásico de puente de seis semiconductores

5.2.1.2 Onda ideal de tensión rectificada

La figura 5.3 muestra la forma de onda ideal a la salida de un puente rectificador como el mostrado en la figura 5.1, su forma contempla que la corriente no tiene rizo debido a carga inductiva y que la corriente de dc es transferida de una fase a otra instantáneamente en el momento que la fase entrante excede la tensión de la fase saliente, las fórmulas para la componentes de corriente armónica de la onda de alterna son las ecuaciones 5.1 y 5.2:

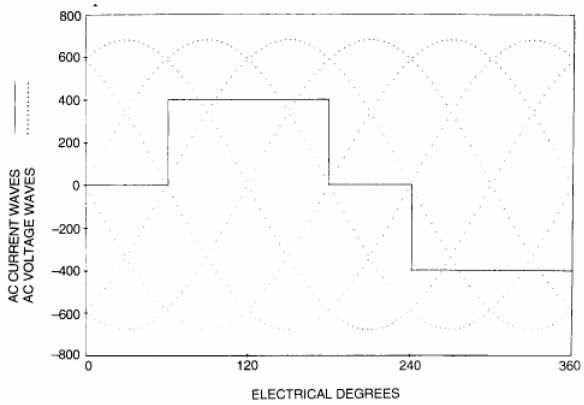


Figura 5.3
Forma de onda de corriente ideal del rectificador trifásico de puente de seis semiconductores

$$h = kq \pm 1 \qquad \text{Ec. 5.1}$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \qquad \text{Ec. 5.2}$$

h es el orden del armónico
k es un entero posible (dif de 1)
q es el número de semiconductores (pulsos) en el circuito rectificador
I_h es la amplitud de la corriente armónica de orden h
I_1 es la amplitud de la corriente fundamental

5.2.1.3 Conmutación

Una forma de onda rectangular implica inductacia cero o una fuente infinita de alterna ac alimentando al rectificador, en tal caso no ocurre el escalonamiento o ranuramiento (notching) de tensión, cuando la inductancia está presente, la corriente no se transfiere de una a otra fase instantáneamente, sino que hay un traslape (o conmutación μ) periodo durante el cual dos dispositivos están en conducción, durante ese traslape hay un transitorio en alterna un corto circuito a través de dos dispositivos de conducción, el cortocircuito es interrumpido por la corriente inversa en la salida del dispositivo, la duración en tiempo de ése traslape depende de lo cerrado (angosto) del ángulo del corto circuito de ac y de su valor respectivo.

La figura 5.4 muestra las condiciones de conmutación con α (angulo de retraso, delay) igual a 0°, la figura 5.5 muestra las condiciones de conmutación con α igual a 30°, las diferencias que se observan entre ambos casos son debidas a razones de incrementos diferentes de corriente en las fases entrantes, cuando α igual a 0°, las condiciones corresponden a máxima asimetría con característica de subida de corriente, a α igual a 90°, las condiciones de corto circuito son de asimetría nula con característica de subida

de corriente inicial rápida, en éste α ángulo de retraso (delay), el ángulo de traslape μ es el más pequeño para un valor particular de corriente, las figuras 5.6 y 5.7 muestran las tensiones de línea a neutro para los mismos dos casos.

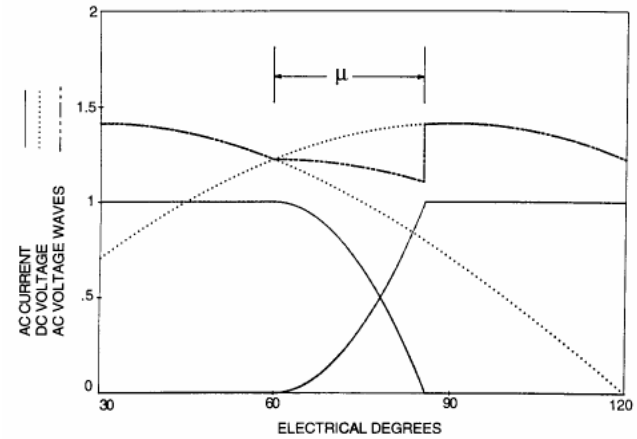


Figura 5.4

Traslape de conmutación α = 0° μ = 25°

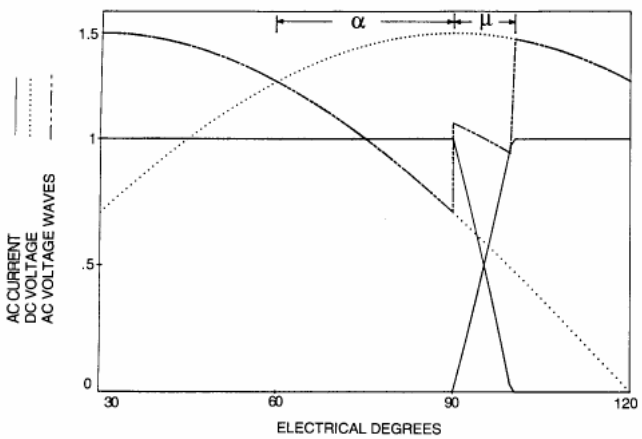


Figura 5.5

Traslape de conmutación α = 30° μ = 12°

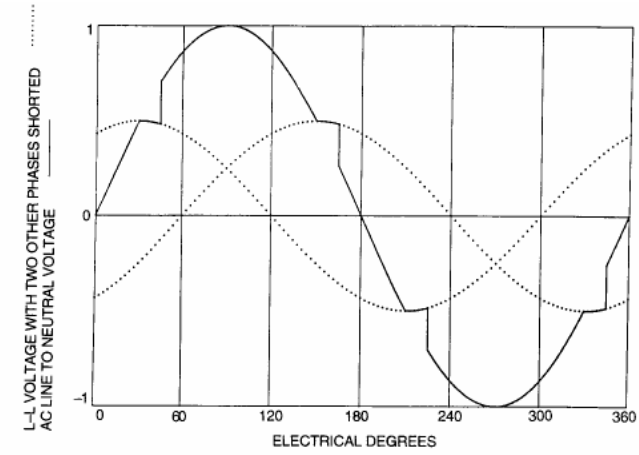


Figura 5.6

Ranuramiento de tensión del rectificador α = 0°

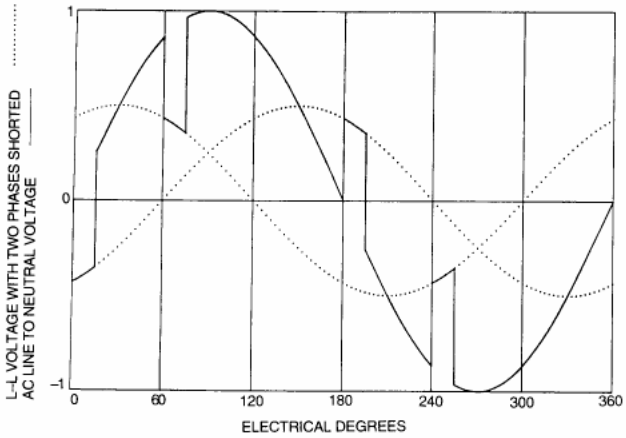


Figura 5.7

Ranuramiento de tensión del rectificador α = 30°

La fórmula para armónicos de corriente permitiendo ángulos de retraso α (delay) y traslape μ (conmutación) considerando corriente libre de rizo es la ecuación 5.3:

$$I_h = I_{dc}\left[\sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{A^2 + B^2 - 2AB\cos(2\alpha + \mu)}}{h[\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu)]}\right] \qquad \text{Ec. 5.3}$$

donde

$$A = \frac{sen\left[(h-1)\frac{\mu}{2}\right]}{h-1} \qquad \text{Ec. 5.4}$$

Nota: para h=1 y A=μ/2, h entero y μ 0 (ángulo de traslape)

$$B = \frac{sen\left[(h+1)\frac{\mu}{2}\right]}{h+1} \qquad \text{Ec. 5.5}$$

μ es el ángulo de conmutación o traslape
α es el ángulo de retraso / delay
I_{dc} es

Las figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 sirven para mostrar el efecto de la variación de retraso α (tensión de dc) y traslape μ (impedancia).

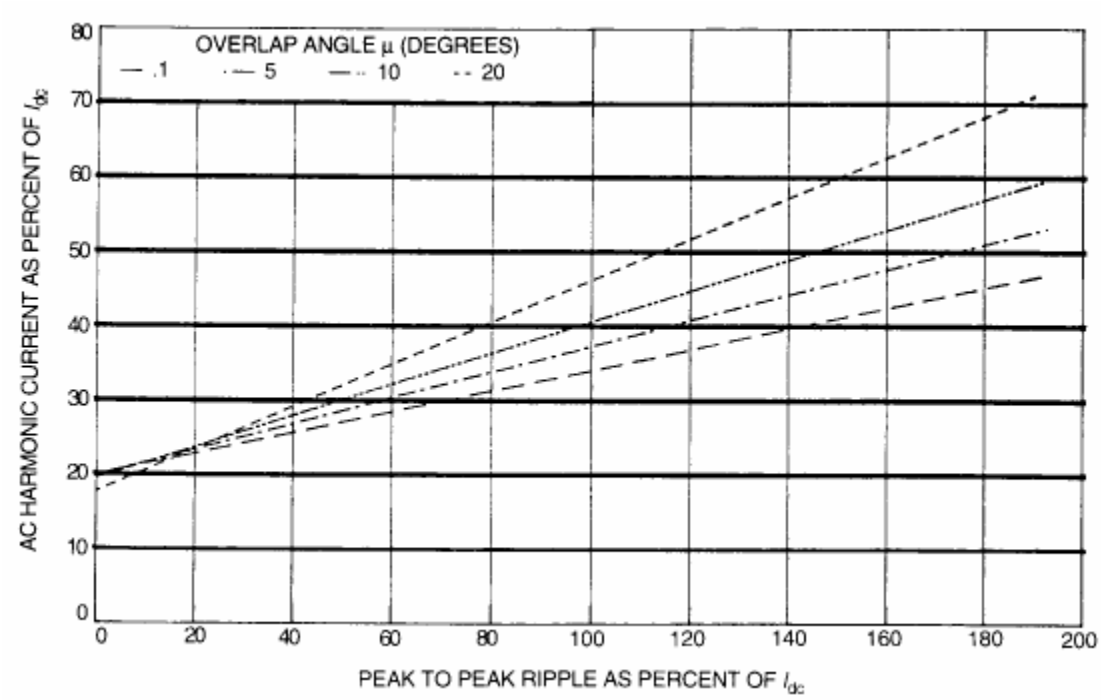


Figura 5.8
Rectificador trifásico de seis semiconductores (pulsos) con rizo de directa
Quínto armónico como función del rizo de dc

5.2.1.4 Ranuramiento o escalonamiento de tensión (voltage notching)

El ranuramiento de tensión (notching) de ac es causado por la acción de conmutación del circuito rectificador en cada una de sus fases, la forma de onda es resultado del ranuramiento (notching), la forma de onda es utilizada como base del análisis de armónicos y el ranuramiento (notching) de tensión es calculado de las caídas I·Z de los armónicos de corriente, la profundidad de la ranura o muesca (notch) en puntos cercanos a la fuente de potencia es proporcional a la impedancia del sistema en ese punto, el ancho de la ranura o muesca (notch) es el ángulo de conmutación μ. Ecuaciones 5.6 y 5.7.

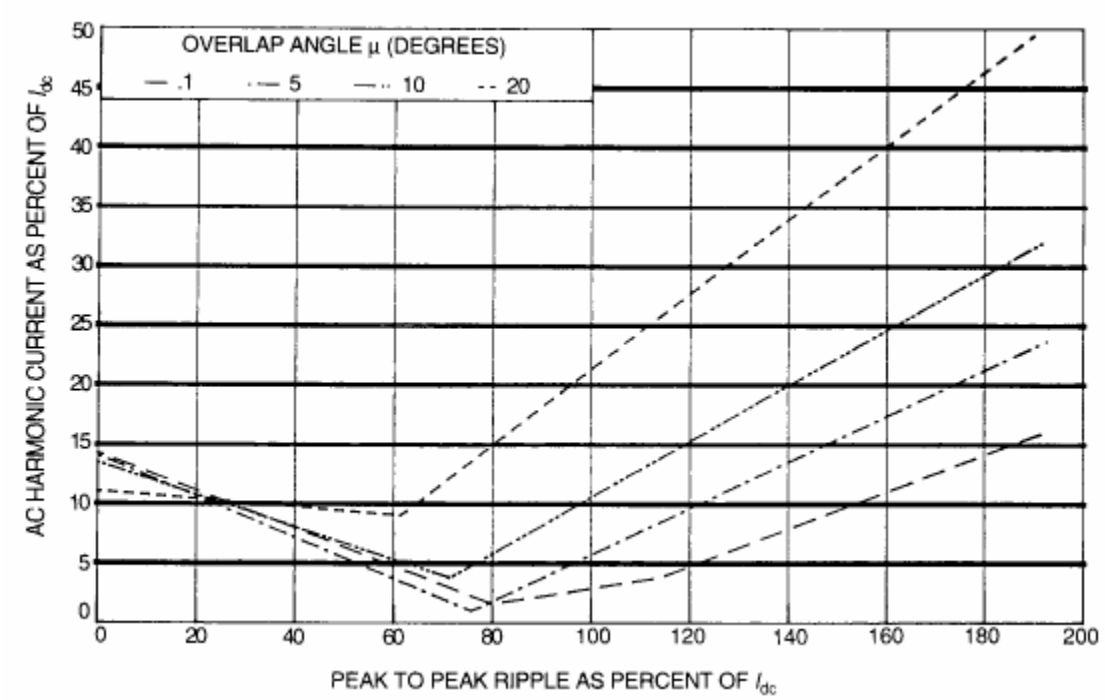


Figura 5.9
Rectificador trifásico de seis semiconductores (pulsos) con rizo de directa
Séptimo armónico como función del rizo de dc

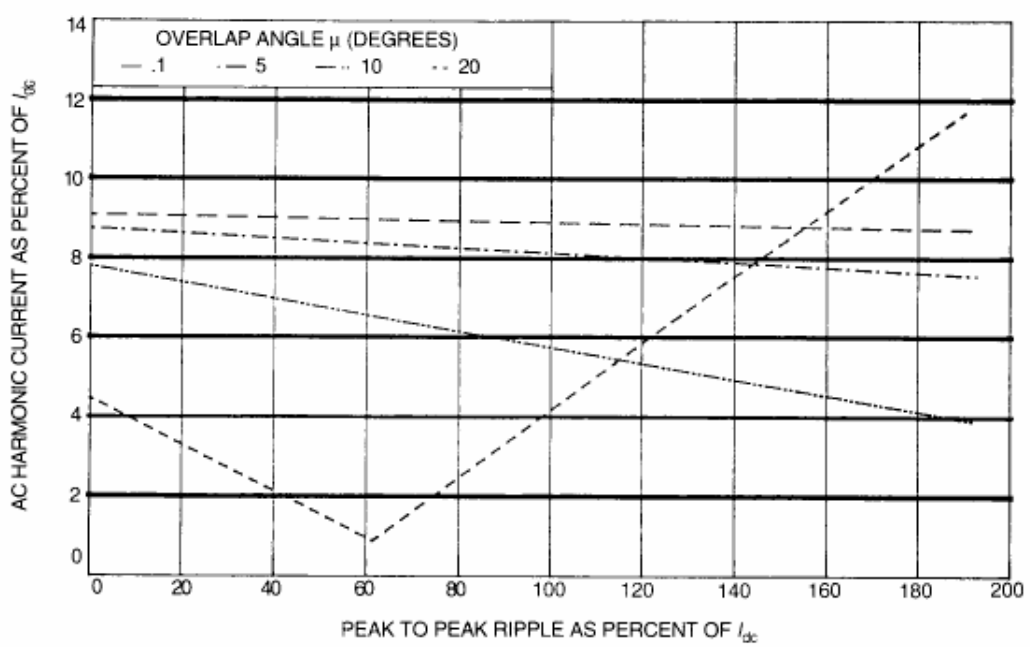


Figura 5.10
Rectificador trifásico de seis semiconductores (pulsos) con rizo de directa
Décimoprimer armónico como función del rizo de dc

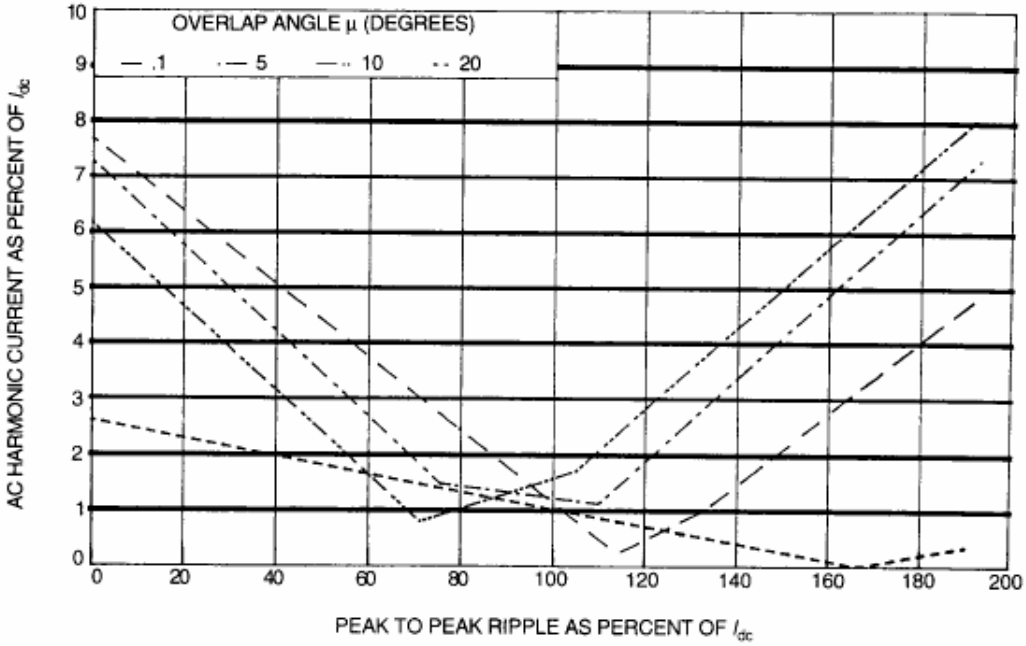


Figura 5.11
Rectificador trifásico de seis semiconductores (pulsos) con rizo de directa
Décimotercer armónico como función del rizo de dc

$$\mu = \cos^{-1}\left[\cos\alpha - \left(X_s + X_t\right)I_d\right] - \alpha \qquad \text{Ec. 5.6}$$

$$\cos\mu = 1 - \frac{2E_x}{E_{d0}} \qquad \text{Ec. 5.7}$$

donde

X_s reactancia del sistema en por unidades en base del convertidor

X_t reactancia del transformador del convertidor en por unidades en base del convertidor

I_d corriente de dc dado en por unidades en base del convertidor

E_d caída de tensión directo causada por la reactancia de conmutación

E_{do} Tensión directo teórico (tensión directo promedio sin carga o transición ligera de carga, asumiendo control de fase cero

E_x Tensión

5.2.1.5 Armónicos en el lado de dc del convertidor

Alguna carga de dc que tiene baja inductancia (una constante de tiempo baja) tal como un motor de dc no emite corriente libre de rizo, los armónicos en la onda de tensión producen una corriente de rizo significativa en la forma de corriente dc, los armónicos están relacionados con el número de semiconductores (pulsos) del circuito convertidor (sexto a seis pulsos, décimosegundo a doce pulsos).

5.2.1.6 Armónicos en la línea

Una fórmula que contiene las definiciones mostradas en la figura 5.12 para armónicos de corriente Ih en un puente rectificador trifásico alimentando una carga es la ecuación 5.8

$$I_h = I_c \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\left[\frac{sen\frac{h\pi}{3}\,senh\frac{\mu}{2}}{h^2\frac{\mu}{2}} + \frac{r_c g_h \cos\frac{h\pi}{6}}{1 - sen\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\mu}{2}\right)}\right] \qquad \text{Ec. 5.8}$$

donde

$$g_h = \frac{sen\left[(h+1)\left(\frac{\pi}{6}-\frac{\mu}{2}\right)\right]}{h+1} + \frac{sen\left[(h-1)\left(\frac{\pi}{6}-\frac{\mu}{2}\right)\right]}{h-1} - \frac{2sen\left[h\left(\frac{\pi}{6}-\frac{\mu}{2}\right)sen\left(\frac{\pi}{3}+\frac{\mu}{2}\right)\right]}{h} \qquad \text{Ec. 5.9}$$

Nota: cuando (h-1) = 0, el segundo término de g_h es ($\pi/6-\mu/2$)

g_h ¿?

I_h componente armónica de corriente del orden indicado por la h

I_c valor de la corriente al final de la conmutación

r_c $\Delta i / I_c$

Los armónicos característicos producidos por un convertidor estático de potencia requieren impedancias balanceadas en el sistema de ac y disparos iguales en los thrystores, si los circuitos de disparo no operan simétricamente la conmutación de cada dispositivo no es correcta y son producidos armónicos no característicos, normalmente pequeños, pero con alguna resonancia en paralelo (si existiera) en uno o varios de ellos puede ser amplificado a un valor tal que cause problemas.

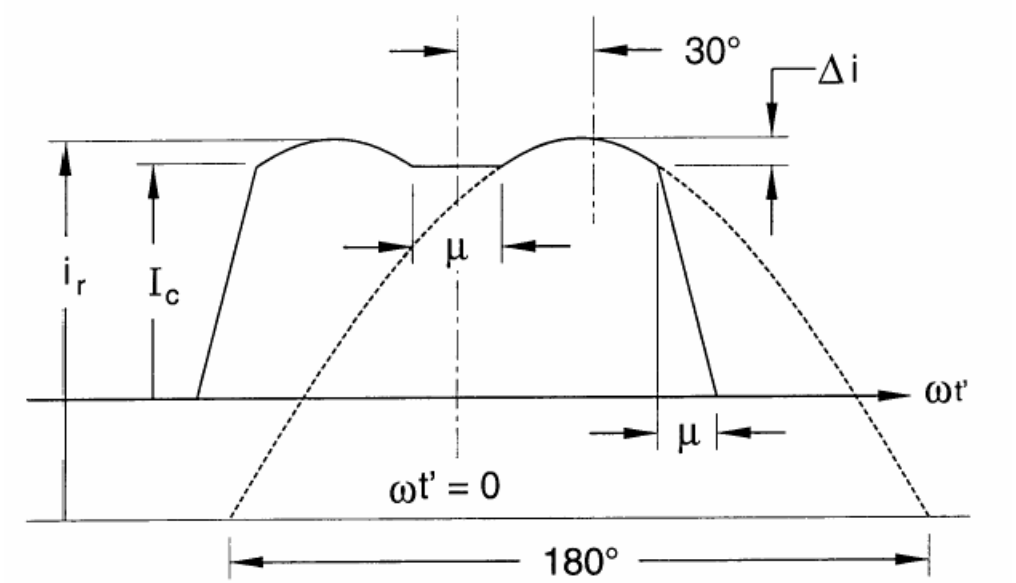


Figura 5.12
Definiciones de los valores de la ecuación 5.8 y 5.9

5.2.1.7 Multiplicación de fase (phase multiplication)

Pueden ser producidos armónicos por medio de multiplicación de fases, si existen *m* secciones del rectificador de seis semiconductores (de 6 pulsos) y:

- Tienen la misma relación de trasformación
- Tienen transformadores con impedancias idénticas
- Están defasados en fase exactamente 60/m grados entre cada una
- Estan controlados a exactamente al mismo ángulo de retraso
- Comparten ecualitativamente la corriente de dc

Entonces estarán únicamente presentes armónicos de orden kq±1, el armónico característico 6m es llamado número de pulsos y es dado por el símbolo ‘q’. Nunca son idénticas dos secciones de rectificación, por tanto, siempre se presentan armónicos no característicos a grado tal que los requerimientos hasta ahora mencionados no contemplan.

Por ejemplo 2 secciones de rectificación que están defasadas 30°resulta en un pulso 12 con armónica mínima en el 11ro, 3 secciones de rectificación están defasadas 20° resulta un pulso 18 armónica mínima en el 17mo y 4 secciones están defasadas 15° resulta un pluso 24 y armónica mínima en el 23ro

5.2.1.8 Corrientes de rizo de dc desde fuentes independientes del rectificador

Cargas tales como inversores tanto de frecuencia constante como ajustable y sistemas de recuperación deslizable de rotor devanado tienen fuentes de corriente de dc con corriente de rizo independiente del rizo del rectificador, esas corrientes de rizo algunas veces están en sincronía con el rectificador y otras veces no, los armónicos debidos a ese tipo de carga no pueden ser reducidos por multiplicación de fases, tales cargas pueden generar subarmónicos en el circuito de ac.

5.2.2 Hornos de arco

Los armónicos producidos por hornos eléctricos de arco (arc furnaces) usados en la producción de acero son impredecibles dada la variación del arco ciclo a ciclo, particularmente cuando se funden los desechos utilizados, la corriente de arco no es periódica y su análisis revela un espectro continuo de frecuencias armónicas de ordenes

enteros y no enteros, sin embargo las mediciones de armónicos han mostrado que frecuencias armónicas de orden entero, particularmente de bajo orden comienzando en el segundo y terminando en el séptimo, predominan sobre los no enteros. También muestran que decrece su amplitud con el orden, conforme crece un depósito de metal derretido el arco llega a ser estable resultando de ello corrientes mucho muy estables con menos distorsión y menos actividad armónica. La corriente puede llegar a ser simétrica alrededor del eje cero eliminando (o minimizando) los armónicos.

La tabla 5.1 ilustra el contenido típico de armónicos de corriente en un horno de arco en dos etapas del ciclo de derretido de un proceso de producción de acero, se debe enfatizar que otros hornos de arco exhibirán patrones de corrientes armónicas algo diferentes.

	Harmonic Current % of Fundamental				
	Harmonic Order				
Furnace condition	2	3	4	5	7
Initial melting (active arc)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refining (stable arc)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

Tabla 5.1
Contenido armónico de corriente de un horno de arco (arc furnace)
En dos etapas de un ciclo de derretido

5.2.3 Compensador estático de potencia reactiva VARes

El reactor controlado por thrystores (TCR) ha sido utilizado de forma extensiva como un compensador de derivación (shunt compensator) para sistemas de distribución de potencia, hornos de arco, así como para otras aplicaciones en las que se debe de mantener los niveles de tensión y reducir el efecto de variaciones aleatorias de parpadeo (centelleo) de corriente a la salida (flicker) mejorando el factor de potencia, corrigiendo el desbalance de fase y mejorando la estabilidad del sistema de potencia.

El diagama uifilar de la figura 7.7 es un esquemático de un circuito típico TCR, el reactor de corriente solo contiene una componente pequeña en fase debido a pérdidas de potencia retrasos de tensión cercanos a los 90°, la corriente de conducción es senoidal, el retraso en la red de disparos de los thrystores solo reduce la magnitud de la corriente, eso altera la forma de onda, las corrientes armónicas producidas por conducción parcial serán todas de orden impar, si el ángulo de disparo está balanceado en ambos thrystores (por par), el valor $_{RMS}$ de la componente armónica está dado por la ecuación 5.10.

$$I_h = \frac{4}{\pi}\frac{V}{X}\left[\frac{sen(h+1)}{2(h+1)}\alpha + \frac{sen(h-1)}{2(h-1)}\alpha - \cos\alpha\frac{sen\alpha h}{h}\right] \qquad \text{Ec. 5.10}$$

donde

h 3, 5 , 7 …(orden de armónico)

V tensión línea línea de la fundamental

X reactancia inductiva total de los reactores en cada fase

α ángulo de avance / retraso / delay

La tabla 5.2 muestra las máximas amplitudes de armónicos hasta el 25to, se puede notar que la máxima amplitud no ocurre al mismo ángulo de retraso, asumiendo condiciones balanceadas los valores que son expresados en porciento de la amplitud de la fundamental a carga completa son las mismas para las corrientes de fase y línea, los valores entre paréntesis son lo triple de los que estarán presentes en las corrientes de fase no así en las corrientes de línea, siempre que sea un sistema balanceado. Sin embargo en una aplicación típica de horno de arco en que se presentan condiciones de desbalance que prevalecen durante periodos de arco inestable, algunos valores aparecerán triplicados de corrientes de línea, donde están desbalanceadas las corrientes de fase, aparecerán armónicos individuales de fase en las corrientes de línea como suma de fasores armónicos de fase en su propio dominio armónico.

Harmonic Order Present		Harmonic Order Present	
1	100	3	(13.78)
5	5.05	7	2.59
9	(1.57)	11	1.05
13	0.75	15	(0.57)
17	0.44	19	0.35
21	(0.29)	23	0.24
25	0.20		

NOTE: Those harmonics in parentheses are triplens.

Tabla 5.2
Amplitudes máximas de corrientes armónicas en un TCR

5.2.4 Inversores de generación dispersa

El surgimiento de fuentes de energía alterna renovables ha resultado en la utilización de muchas y variadas topologías como acondicionadores de potencia o inversores en operaciones de red de suministro añejas. Esos inversores están disponibles tanto monofásicos como trifásicos, sus salidas pueden ser senoidales muy limpias con factor de potencia cercano a la unidad o pueden tener calidad de potencia inaceptable en la red de suministro de potencia o interferir con sus relevadores o controles.

Los inversores pueden actuar como fuentes de corriente atadas o engachadas a un sistema de potencia o como fuentes de tensión atadas al sistema a través de una impedancia en serie, comúnmente un inductor, para limitar la corriente entre el inversor y la salida del sistema de potencia eléctrico.

Mencionaremos varias topologías de inversores y de armónicos asociados con cada uno de ellos, dichos tipos de inversor incluyen:

1. Línea conmutada
2. Modulación por ancho de pulso (PWM auto conmutado)
3. Enlace de alta frecuencia autoconmutado
4. Amplificador auto conmutado de conmutación de pulso programado

5.2.4.1 Inversores monofásicos

Los inversores monofásicos comunmente usados están relacionados a potencias menores de 10 kW, tipicamente en un sistema de distribución pequeño no podrían causar problemas, conforme se incrementa su presencia un gran número de ellos encadenados a un mismo alimentador pueden causar problemas si sus armónicos son excesivos.

5.2.4.2 Inversores trifásicos

Los inversores trifásicos están relacionados con potencias de entre 10 kW y hasta 1 MW es más posible que causen problemas en la forma de onda haciendola inaceptable si las salidas de los mismos contienen altos porcentajes de armónicos, de la misma forma (que los inversores monofásicos) pueden ser topologías de línea conmutada auto conmutados (llamados de conmutación forzada), también, los armónicos a la salida son funciones dependientes de varias variables.

Para fuentes de energía renovable el nivel de tensión de dc varía sobre un amplio rango, dichas variaciones dependen del ambiente, hora del día, temperatura, algoritmos de arrastre (tracking algoritms), envejecimiento de colectores, y muchos otros factores no controlables, los sistemas de potencia de ac pueden tener efectos no deseados a la salida del inversor

Variables tales como:

- Armónicos del ambiente de operación del sistema
- Tensiones de línea desbalanceadas
- Separación de fase desigual
- Niveles altos o bajos de tensión de ac
- Impedancias en la línea

Son algunas de las variables que afectan la salida de los inversores mediante armónicos.

5.2.5 Control electrónico de fase

El control de potencia hacia las cargas por control de fase empleando thrystores crea corrientes armónicas, cargas que se calientan, que tienen un factor de desplazamiento de potencia cercano al 100% algunas veces son controlados por medio de un control de thrystores, pero solo los armónicos de orden impar se producirán aunque con diferentes magnitudes. Excepto en una aplicación TCR, sección 5.2.3, allí generalmente las cargas están cerca de resistencia pura o de inductancia pura, en general para casos de las cargas con factores de potencia entre 0 y 100 % las magnitudes máximas de armónicos quedan entre los límites marcados por los casos ideales.

5.2.6 Armónicos de cicloconvertidor (cycloconverter)

Las expresiones para las corrientes armónicas de un cicloconvertidor son extremadamente complejas pues varían como funciones de la relación de frecuencia del mismo, la ecuación 5.11 muestra las frecuencias presentes, el primer término representa los componentes de un convertidor de 6 semiconductores (pulsos) y el segundo denota las frecuencias características de banda lateral.

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6nf_0 \qquad \text{Ec. 5.11}$$

donde

f_h es la frecuencia armónica impuesta en el sistema
k y n son enteros
f_0 es la frecuencia a la salida del cicloconvertidor
f_1 es la frecuencia

5.2.7 Fuentes conmutadas

Son fuentes de potencia económicas que no son afectadas por cambios menores de tensión en el sistema de potencia, éstas alimentan un capacitor que suministra la tensión

a la circuitería electrónica por lo que la fuente vista desde el sistema es un capacitor, la corriente a la fuente es discontinua, es decir que fluye solamente parte de medio ciclo, la figura 5.13 muestra la forma de onda y el espectro de corrientes armónicas se muestra en la tabla 5.3.

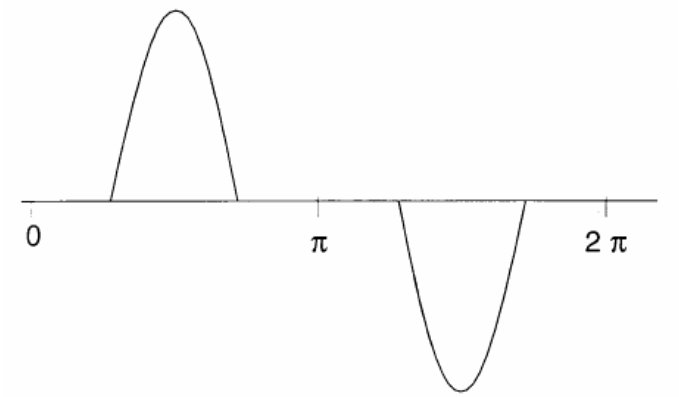


Figura 5.13
Forma de onda de una fuente conmutada de potencia típica

Harmonic	Magnitude	Harmonic	Magnitude
1	1.000	9	0.157
3	0.810	11	0.024
5	0.606	13	0.063
7	0.370	15	0.079

Tabla 5.3
Espectro de una fuente conmutada de potencia típica

5.2.8 Controlador de modulación por ancho de pulso (PWM Drive)

Ese controlador concatenado de dc es diferente de los circuitos estáticos de conversión de potencia puesto que tiene un diodo rectificador que da un factor alto de desplazamiento de potencia, tiene un capacitor grande en el lado de la red de dc que regula la tensión en la propia red, como resultado a grandes cargas de entre 30 y 50 % la corriente fluye solamente cuando la tensión de salida del diodo rectificador está arriba de la tensión del capacitor, en cargas ligeras la corriente en el circuito de ac es discontinua, la figura 5.14 muestra la forma de onda, ésta es similar a la de fuente conmutada de potencia excepto que ésta que se presenta es de un circuito trifásico con alta corriente armónica en el 5to armónico, conforme la carga en el controlador se incrementa la corriente llega a ser discontinua, el punto al que la corriente llega a ser discontinua está determinado por el tamaño de la inductancia de red.

5.3 Características de respuesta del sistema

5.3.1 General

El efecto de una o más fuentes de armónicos en un sistema de potencia dependerá primeramente de las características de respuesta en frecuencia del mismo, los dispositivos no lineales descritos en la sección 5.2 generalmente pueden ser

representados como fuentes de armónicos por tanto la distorsión armónica de tensión en el sistema de potencia dependerá de como sean vistas las características de impedancia v.s. frecuencia por dichas fuentes. Las características de respuesta en frecuencia se ven afectadas por varios factores los cuales deben ser considerados cuando se lleven a cabo análisis para sistemas en específico.

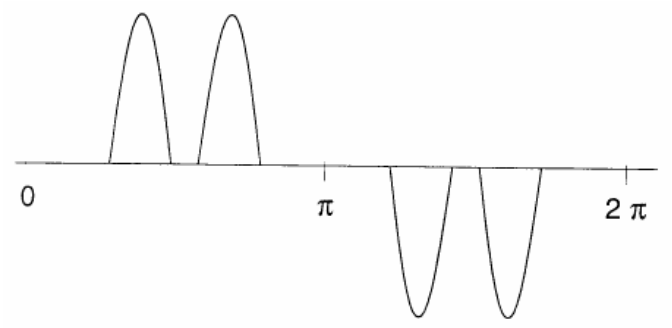


Figura 5.14
Forma de onda de una fuente de potencia de modulación por ancho de pulso PWM
de seis semiconductores (pulsos) bajo carga ligera (corriente discontínua)

5.3.1.1 Capacitancia del sistema en corto circuito

Es un indicador de la impedancia del sistema a frecuencia fundamental en un punto cualquiera del sistema, para alimentadores de inductancia simple, también es, una medida de la impedancia del sistema a frecuencias armónicas cuando es multiplicada por el orden de cada armónico, sistemas de grandes capacidades de cortocircuito tienen baja distorsión de tensión para el mismo tamaño de fuente de corriente que sistemas de bajas capacidades de cortocircuito.

5.3.1.2 Bancos de capacitores y cables forrados (aislados)

Los bancos de capacitores utilizados para control de tensión y mejoramiento de factor de potencia así como los cables forrados son los mayores componentes que afectan las características de respuesta en frecuencia en un sistema, los capacitores pueden causar condiciones de resonancia tanto en serie como en paralelo que pueden aumentar los niveles de armónicos (sección 5.3.2). Los bancos de capacitores son utilizados como fuentes de tensión para conmutación de algunos convertidores estáticos de potencia, pueden ser considerados en paralelo con el sistema cuando se calcula la reactancia de conmutación incrementando así la *di/dt* de conmutación.

Las capacitancias de línea de carga de las líneas de transmisión y cables forrados también están en paralelo con la inductancia del sistema, por tanto, son similares a

capacitores en derivación con respecto a la afectación de las características de respuesta en frecuencia.

5.3.1.3 Características de carga

La carga del sistema tiene dos efectos importantes en las características de respuesta en frecuencia:

1. La parte resistiva de la carga provee amortiguamiento que afecta la impedancia del sistema cerca de frecuencias resonantes, reducce el aumento de niveles armónicos cerca de las frecuencias resonantes paralelas.
2. Las cargas tipo motor y otras cargas dinámicas que contribuyen a la capacidad de corto circuito del sistema pueden cambiar las frecuencias a las que ocurre resonancia, esas cargas aparecen en paralelo a las inductancias de corto circuito del sistema cuando se calculan frecuencias resonantes, los motores no proveen amortiguamiento de los picos de resonancia. (sección 5.3.3)

5.3.1.4 Condiciones de sistema balanceado v.c. desbalanceado

Cuando las condiciones del sistema (esfuerzo del sistema, bancos de capacitores, carga, características de la línea, fuentes de armónicos en un sistema industrial) están completamente balanceadas, pueden ser empleados modelos de secuencia positiva para evaluar las características de respuesta en frecuencia del sistema, bajo esas condiciones, es decir, balanceadas las corrientes armónicas tendrán características de secuencia dadas según la tabla 6.1.

Cuando las condiciones del sistema no son completamente balanceadas ya sea en el sistema de transmisión o de distribución, tiene que aplicarse análisis desbalanceado, dichas condiciones podrían incluir fuentes desbalanceadas de armónicos en el sistema como fuentes y capacitores monofásicos o fuentes de carga desbalanceadas, en algunos casos aún los desbalances introducidos por líneas de transmisión no transpuestas pueden ser importantes, en todos esos casos es importante utilizar para el análisis de la representación trifásica en ellas se representa cada fuente de armónicos mediante una secuencia cero, una positiva, y una negativa

5.3.2 Condiciones de resonancia

Las condiciones de resonancia del sistema son los factores más importantes que afectan los niveles de armónicos del sistema, la resonancia paralela es una alta impedancia para el flujo de la corriente armónica, mientras que la resonancia serie es una baja impedancia, cuando las condiciones de resonancia no son un problema el sistema tiene capacidad para absorber cantidades significativas de corrientes armónicas.

Ocurre distorsión significativa en tensión y amplificación de corriente solo cuando esas condiciones de altas impedancias (debidas a resonancia paralela) existen, por tanto es importante poder analizar las características de respuesta en frecuencia del sistema y evitar los problemas de resonancia.

5.3.2.1 Flujo normal de corrientes armónicas

Las corrientes armónicas tienden a fluir desde las cargas no lineales (fuentes armónicas) hacia las de baja impedancia (fuentes de distribución) ver la figura 5.15, la impedancia de la fuente de suministro generalmente es mucho más pequeña que las derivaciones paralelas ofrecidas por las cargas, sin embargo las corrientes armónicas se dividirán dependiendo de la relación de impedancia, altos armónicos fluirán para los capacitores que están como bajas impedancias para altas frecuencias.

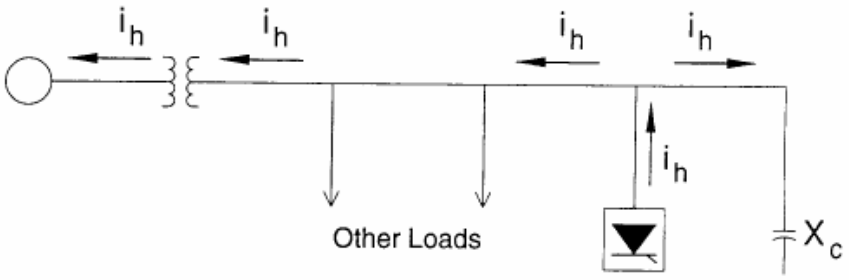


Figura 5.15
Flujo normal de corrientes armónicas

5.3.2.2 Resonancia paralela

Ocurre resonancia paralela, figura 5.16, cuando son iguales las reactancias inductiva y capacitiva a alguna frecuencia, si la combinación de los bancos de capacitores y de las inductancias del sistema resultan en resonancia paralela cerca de los armónicos característicos generados por carga no lineal, la corriente armónica exitará el circuito tanque (que se forma) causando una corriente amplificada que oscila entre las energías

almacenadas en la inductancia y la capacitancia, esa alta corriente oscilatoria puede causar distorsión de tensión e interferencia telefónica donde el circuito de distribución y el circuito de telefonía esten cercanos físicamente.

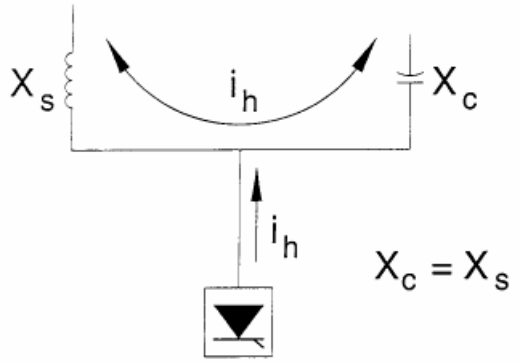


Figura 5.16
Condiciones de resonancia paralela

5.3.2.3 Resonancia serie

Resulta de la combinación serie de los bancos de capacitores con las inductancias de los transformadores o líneas, presenta una derivación de baja impedancia para las corrientes armónicas y tiende a capturar alguna corriente armónica a la que está sintonizada, la resonancia serie puede resultar en distorsión por niveles de alta tensión entre la capacitancia y la inductancia en un circuito serie, un ejemplo de circuito serie ver la figura 5.17 así aparece como un circuito serie cuando es visto desde el secundario del transformador.

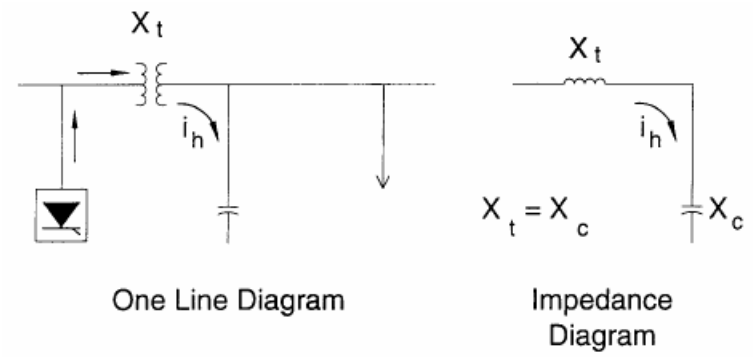


Figura 5.17
Banco de capacitores resultante en resonancia en serie

5.3.3 Efecto de la carga del sistema

Las cargas no tienen un efecto importante en las características de respuesta en frecuencia del sistema excepto cerca de frecuencias resonantes, la figura 5.18 muestra

las componentes de carga importantes del sistema tal como son vistas por el primario del sistema de distribución, cada una de las que pueden llegar a ser importantes para el análisis armónico.

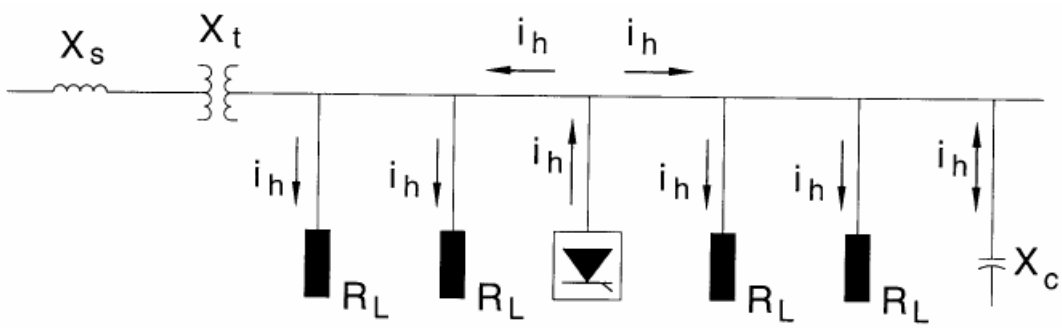


Figura 5.18
Representación de la carga para análisis de sistemas

5.3.3.1 Transformador reductor (step-down transformer)

Es representado por su reactancia serial de dispersión y su resistencia en el circuito, a bajos ordenes de armónicos la reactancia de disprsión es pequeña comparada con la impedancia de carga (resistencia), sin embargo, a altos ordenes de armónicos la reactancia del transformador llega a ser muy grande comparada con la carga, el transformador esencialmente aísla la carga a altas frecuencias armónicas.

5.3.3.2 La componente resistiva

La componente resistiva de la carga llega a ser muy importante para la resonancia del sistema, la trayectoria que ofrece a baja impedancia, cuando existe resonancia paralela, es tomada por los armónicos, altos niveles de carga en el sistema resultan en baja impedancia cercana a resonancia paralela. La respuesta del sistema con variados niveles de carga son ilustrados en la figura 5.19 para un sistema con resonancia paralela cerca del 4to armónico.

5.3.3.3 La componente de motor

La componente de motor aparece primordialmente inductiva a frecuencias armónicas, la representación correcta para motores a frecuencias armónicas es una impedancia de corto circuito (un corto circuito) como un subtransitorio de motor a rotor bloqueado, esa inductancia no provee amortiguamiento significativo de los picos de resonancia, pero defasará un poco la frecuencia de resonancia porque está esencialmente en paralelo con

la fuente de inductancia. Esto es importante si la resonancia cercana a los armónicos es un problema, variaciones en la carga del motor resultarán en variaciones en la frecuencia de resonancia armónica, la carga del motor es particularmente importante en sistemas industriales y en sistemas de distribución tanto comercial como residencial con alto porcentaje de cargas de aire acondicionado que representan una parte significativa de la carga total del sistema.

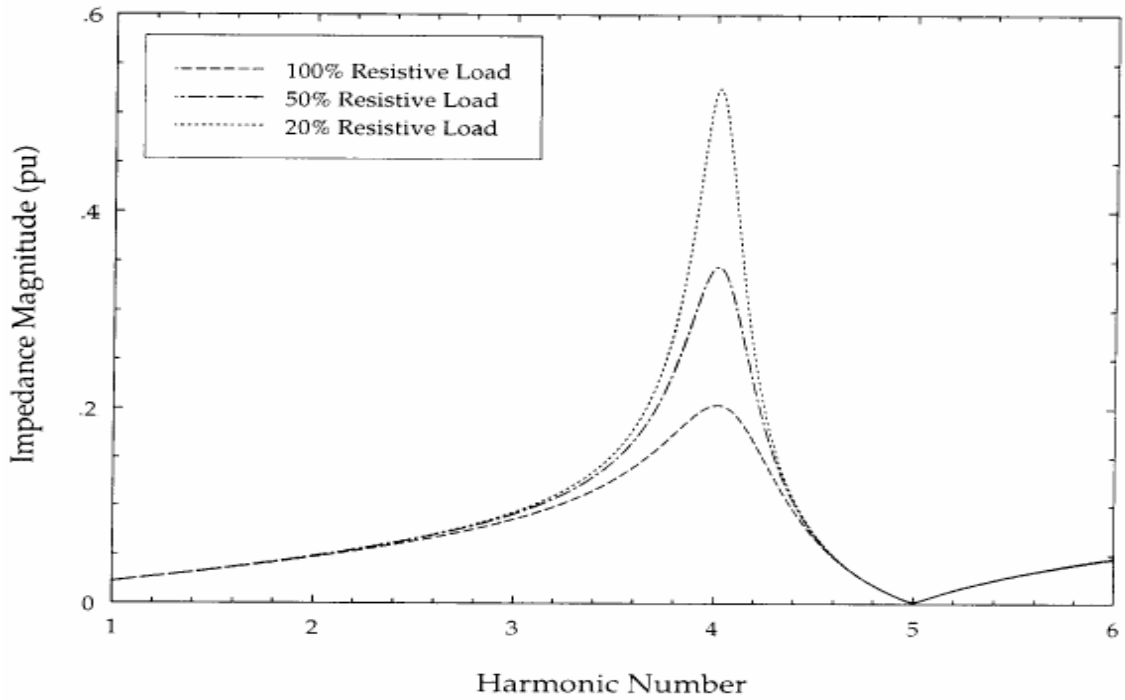


Figura 5.19
Respuesta de un sistema ilustrando el efecto de la carga resistiva en un pico de resonancia paralela

5.3.4 Características de un sistema típico

Resulta demasiado complicado desarrollar una característica de respuesta en frecuencia para algún sistema típico dado el número de factores que intervienen en la afectación de la propia respuesta, sin embargo es bueno mostrar algunas características básicas para diferentes tipos de sistemas así como sus causas, las características básicas junto con sus formas de cálculo son mostradas en la sección 8.2 y pueden ser usados para determinar si se requiere de análisis detallados o no.

5.3.4.1 Sistema de distribución

Las características de respuesta en frecuencia de un sistema de distribución son dominadas por la interacción de la capaitancia de derivación y las inductancias del sistema como muestra la figura 5.20. El amortiguamiento provisto por las cargas del

sistema es importante además los bancos de capacitores y la capacitancia de los cables forrados pueden influenciar en la resonancia del sistema.

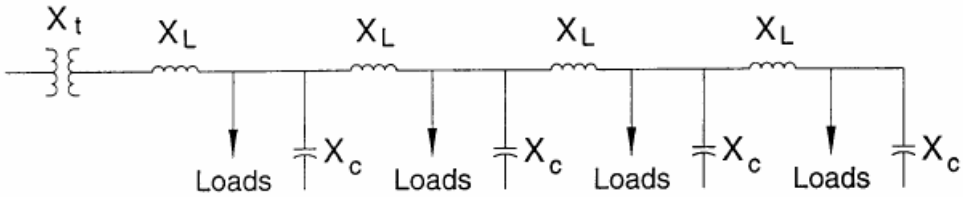


Figura 5.20
Distribución típica de las características de un sistema

Condiciones severas de resonancia ocurren cuando un banco de capacitores grande es el medio primario de la compensación de derivación en el sistema, como un banco de capacitores grande en una subestación; en tal caso, hay un punto de resonancia en el sistema y pueden ocurrir distorsión y amplificación de las corrientes armónicas si dicha resonancia corresponde a corriente armónica generada por cargas no lineales, es bastante común que dicha resonancia ocurra cerca del quinto armónico, como es el caso de la respuesta en frecuencia ilustrada en la figura 5.19.

Cuando un número (cantidad) de bancos de capacitores pequeños son aplicados a lo largo del sistema de distribución, habrá diferentes frecuencias de resonancia, si esos capacitores son conmutados las características de respuesta en frecuencia son más difíciles de determinar, cada una de dichas resonancias tendrá menor magnitud que la magnitud asociada con la de la resonancia mayor, por tanto, el efecto de los capacitores de distribución alrededor del sistema puede reducir los problemas potenciales debido a una resonancia mayor. La localización de un capacitor introduce una resonancia adicional paralela que podría interactuar con las corrientes armónicas. La distorsión de tensión armónico generalmente es peor cuando los capacitores en servicio están cercanos a los alimentadores resultando en una inductancia grande desde la línea, la cual se sintoniza con las resonancias de frecuencias más bajas e incrementa la distancia que la corrientes armónicas fluirán.

El amortiguamiento provisto por las cargas es muy importante en sistemas de distribución, a menudo, éstas cargas son el factor que previene condiciones de resonancia que son problemas significativos que causan los armónicos. La componente resistiva de la carga es el factor más importante. Análisis de sistema balanceado no es aplicable en muchos casos, sin embargo, éste provee información utilizable en casos con grandes fuentes armónicas trifásicas o en casos en que son desconocidas las ubicaciones de fase de cargas monofásicas, algunas de las condiciones siguientes pueden resultar en la

necesidad de analizar la respuesta del sistema de distribución con una representación trifásica completa.

1. Fuentes armónicas monofásicas grandes (cargas no lineales)
2. Características de carga desbalanceada significantemente
3. Bancos de capacitores monofásicos en el sistema

Nota: Análisis desbalanceado requiere que la fase a la que haya sido conectada alguna carga o capacitores sea conocida.

5.3.4.2 Sistemas industriales

Los sistemas de potencia industriales asemejan sistemas de distribución compactos, como el ejemplo de la figura 5.21 con unas cuantas diferencias:

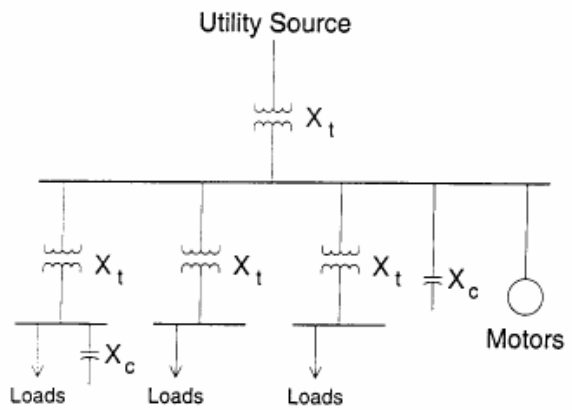


Figura 5.21
Sistema de potencia idustrial típico

1. La respuesta en frecuencia generalmente es dominada por los bancos de capacitores relativamente grandes e inductancias de cortocircuito. A menudo la resonancia asociada está cercana a los armónicos de bajo orden bebido a las características de factor de potencia de las cargas industriales. A menudo son despreciables las impedancias de los cables y de las líneas.

2. A menudo el porcentaje de armónicos producidos por las cargas es mayor que el de los sistemas de distribución, la mayor cantidad de cargas pueden ser cargas no lineales.
3. A menudo es muy pequeña la carga de tipo resistiva para proveer amortiguamiento cerca de la frecuencia de resonancia, si la resonancia está cercana a los armónicos generados resulta una distorsión armónica más severa. Las cargas tipo motor resultan importantes porque cambian las frecuencias de resonancia.

4. Muchos sistemas industriales pueden ser analizados por modelado balanceado, las cargas generalmente son cargas trifásicas balanceadas incluyendo las fuentes armónicas y pueden ser utilizados bancos de capacitores trifásicos.

5.3.4.3 Sistemas de transmisión

Las características de respuesta en frecuencia de los sistemas de transmisión son muy complicadas y virtualmente imposibles de generalizar, las capacitancias de los cables y las líneas de transmisión no pueden ser ignorados en el análisis, son importantes y determinan las resonancias del sistema, deben ser aplicadas ecuaciones hiperbólicas para línea larga lo mismo para los cables que para las líneas para así determinar la representación correcta, transposición de línea debe ser tomada en cuenta.

A niveles de transmisión de tensión llega a ser más y más común encontrar grandes capacitores, tienen un efecto dramático en la respuesta en frecuencia de los sistemas, cuando son conmutados la característica de resonancia del sistema cambia. El análisis armónico del sistema de transmisión requiere de representaciones caras y su análisis sin un sistema de cómputo resulta imposible, de hecho aún con el sistema de cómputo es muy difícil predecir la respuesta del sistema dados los cambios en las características del sistema y desconocidos en el modelo.

Uno de los elementos más importantes en la representación de los sistemas de transmisión es el modelo de la carga, la carga está definida no solo como incluyendo plantas industriales para los sistemas de transmisión sino incluyendo también al sistema de distribución, Todas las inductancias y las capacitancias contribuyen al modelo de carga, como no es fija la representación de la carga no pueden ser consideradas predicciones muy exactas de respuesta en frecuencia para los sistemas de transmisión a menos que el modelo incluya niveles de alimentación. Un ejemplo de un flujo predicho de corriente armónica en un sistema de transmisión se encuentra ejemplificado en la figura 5.22 ilustra la complejidad del flujo de corriente, aún para sistemas muy simples.

Podrían ser usadas simulaciones de características de respuesta en frecuencia de un sistema de transmisión para proveer un amplio rango de posibles características del sistema, parámetros importantes como la carga y los bancos de capacitores, pueden ser variados para determinar sus efectos, también un cierto número de diferentes condiciones de contingencia pueden ser analizados, con carencia de mejor información el peor caso de análisis puede ser ejecutado usando ese rango de características del sistema, el rango de características también puede ser ejecutado para propósitos de filtrado de diseños, si

los niveles de armónicos son inaceptables, la gran capacitancia de derivación de las líneas a menudo causa características de frecuencia de resonancia del sistema dentro de los armónicos 5to y 13ro armónico.

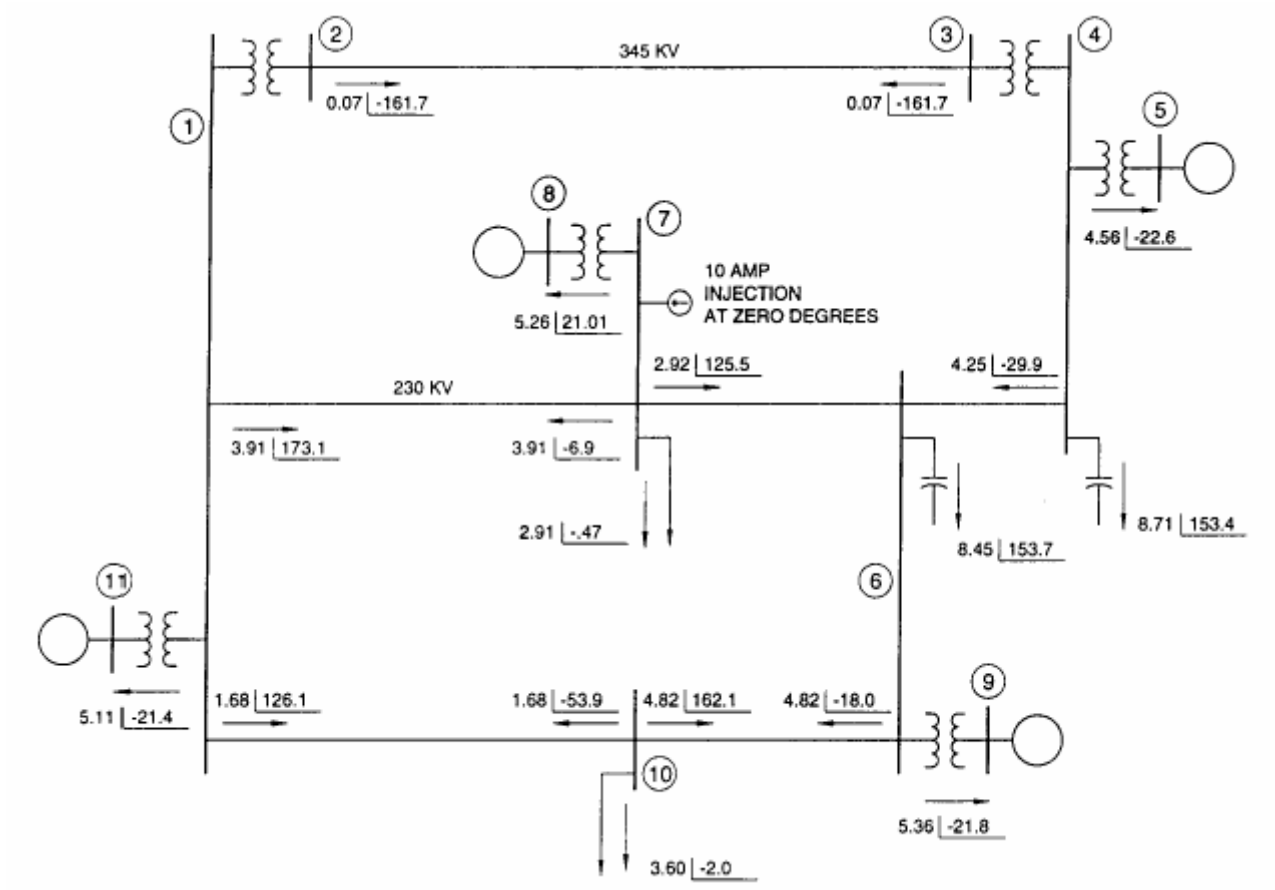


Figura 5.22
Flujo de la quinta corriente armónica en una red de transmisión (de potencia eléctrica)
Debido a una inyección de 10 A en la barras colectoras (bus) número 7

Capítulo 6 Efectos de los Armónicos

6 Efectos de los Armónicos

6 Efectos de los Armónicos

6.1 General

El grado en que los armónicos pueden ser tolerados está determinado por la sensibilidad del sistema de suministro y de la carga. El tipo de equipo menos sensible es aquel en que su función principal está en o tiene que ver con calentamiento, como un horno. Generalmente en ese caso la energía de los armónicos es utilizada, por tanto son bastante tolerables. El tipo equipos de mayor sensibilidad son aquellos cuyo diseño asume una perfecta o casi perfecta onda senoidal en el suministro de potencia, los equipos que regularmente caen dentro de ésta categoría son los de procesamiento y administración de datos así como los equipos de telecomunicaciones y sus equipos suministradores de energía. El tipo de equipos que caen entre dentro de esos dos extremos de sensibilidad son los motores, ellos son tolerantes a armónicos.

6.2 Motores y Generadores

El mayor efecto de tensiones y corrientes de armónicos en máquinas de inducción y síncronas (máquinas rotativas) es el incremento de calor debido a pérdidas en el cobre y en el acero a frecuencias de armónicos, afectando la eficiencia de la máquina y por tanto el par (torque) desarrollado.

Las corrientes armónicas en un motor elevan su emisión de ruido (ruido propio o natural), comparando (el mismo) con el ruido generado debido a una onda seniodal pura en su exitación. También produce un flujo resultante en el entrehierro el cual causa un fenómeno que consiste en variaciones de par (torque) y de velocidad causadas por variaciones de flujo impidiendo así un arranque suave y uniforme (cogging), o un fenómeno en los motores de inducción que consiste en un muy alto deslizamiento (crawling o rampeante).

Pares de armónicos como el quinto y el séptimo tienen potencial para crear oscilaciones mecánicas en sistemas como el motor-carga y / o el turbina-generador, resultando torques oscilatorios causados por la interacción de corrientes armónicas y la frecuencia fundamental del campo magnético, exitan una frecuencia mecánica resonante. Los armónicos quinto y séptimo pueden combinarse para producir un estímulo torsional en el rotor de un generador en la frecuencia del sexto armónico. Si existe la resonancia mecánica y su frecuencia está cercana a la frecuencia del estímulo eléctrico se pueden desarrollar fuerzas mecánicas altamente fatigantes.

La tabla 6.1 define los órdenes de los armónicos característicos derivados en un convertidor de seis semiconductores (pulsos) y ejemplifica el efecto causado cuando cada uno es aplicado en las terminales de una máquina rotativa.

Harmonic Order	Frequency Hz	Sequence Network	Stator Harmonic	Harmonic Rotation	Rotor Harmonic
1	60	+	1	Forward	—
5	300	-	5	Backward	6
7	420	+	7	Forward	6
11	660	-	11	Backward	12
13	780	+	13	Forward	12
17	1020	-	17	Backward	18
19	1140	+	19	Forward	18
23	1380	-	23	Backward	24
25	1500	+	25	Forward	24

Tabla 6.1
Armónicos en un convertidor de seis semiconductores (pulsos)

Otra situación de gran interés es el flujo de corrientes armónicas en el rotor, el flujo de cada corriente en el estator producirá su fuerza electromotriz en el entrehierro, que inducirá un flujo de corriente en el rotor, Cada armónico característico puede definirse como una secuencia positiva o negativa, definiendo así su rotación respecto a la rotación del rotor. El quinto armónico girará en dirección negativa, entonces se inducirá una corriente armónica en el rotor con una frecuencia correspondiente a la diferencia neta rotacional entre la frecuencia fundamental del entrehierro y la del quinto armónico; es decir 5 + 1 (quinto más una) o 6 (sexto armónico).

El séptimo armónico girará en dirección positiva, entonces se inducirá una corriente armónica en el rotor con una frecuencia correspondiente a la diferencia neta rotacional entre la frecuencia fundamental del entrehierro y la del séptimo armónico; es decir 7 - 1 (séptima menos una) o 6 (sexto armónico). Así desde un punto de vista de calentamiento, combinados el quinto y el séptimo armónico producen una corriente en el

rotor con frecuencia del sexto armónico; de la misma forma se combinan los armónicos 11ro y 13 ro produciendo una corriente en el rotor con frecuencia del armónico 12 do, de la misma manera va sucediendo con pares de armónicos de orden mayor (en frecuencias arriba y debajo de las que son múltiplos de 6).

Las mayores preocupaciones respecto a esos armónicos en el rotor son:

1. Calentamiento resultante en el rotor
2. Pares (torques) reducidos o pulsantes

El calentamiento del rotor que puede ser tolerado así como el calor incurrido en un caso dado depende del tipo de rotor envuelto en la aplicación. La maquinaria de rotor devanado sufre de afectación mayor que las de jaula de ardilla. Las pérdidas en los devanados generalmente son mayores que las del núcleo, la suma de efectos de los armónicos resulta en reducción de la eficiencia y de la vida de la máquina, Tampoco la reducción es pronunciada por el contenido de armónicos normalmente encontrados, pero el calentamiento por armónicos reduce típicamente la eficiencia a entre el 90-95% de la que tiene la máquina con una senoidal pura aplicada. El contenido de armónicos normalmente encontrados son los que vienen referidos en la tabla 10.1. La aplicación de motores en sistemas de distribución entegan un contenido de armónicos permisible, pero no aplican específicamente a la razón de un motor para ser controlado por un inversor de frecuencia ajustable.

Los armónicos también pueden causar un par (torque) pulsante a la salida, eso puede afectar la calidad del producto donde las cargas del motor son sensibles a esas variaciones, en casos en que una inercia considerable (freno) es acoplada al eje del motor como en sistemas moto-generador o máquina-generador los armónicos pueden exitar una resonancia magnética, las oscilaciones mecánica resultantes pueden causar fatigamiento y envejecimiento acelerado en el eje y las partes interconectadas al mismo.

6.3 Transformadores

Con excepción de que los armónicos aplicados a los transformadores pueden resultar en un incremento del ruido audible, los efectos regularmente aumentan el calentamiento parásito. Los efectos de los armónicos en transformadores son de doble parte, primera: las corrientes armónicas causan incremento en las pérdidas tanto en el cobre como por flujos parásitos, segunda: las tensiones armónicas causan un incremento en las pérdidas

en el núcleo. El efecto global es un incremento en el calentamiento del transformador, comparado al calentamiento normal que tendría con una senoidal pura.

A corriente nominal el límite superior del factor de distorsión de corriente es de 5%, las recomendaciones prácticas dan también los sobretensiones $_{RMS}$ máximos que deben poder resistir en estado estable, 5% a carga nominal y 10% en vacío, las corrientes armónicas en la tensión aplicado no deben resultar en una tensión $_{RMS}$ total que exceda esos márgenes.

Las pérdidas en el transformador causadas por armónicos son dependientes (funciones) de la frecuencia, aumentan conforme aumenta la frecuencia, en el calentamiento del transformador son de mayor importancia las componentes de mayor frecuencia que las de menor frecuencia, los armónicos de frecuencias mayores tienen menores amplitudes tienden cancelar sus efectos, sin embargo una situación dada puede exhibir grandes amplitudes inesperadas a ciertas frecuencias altas.

Las pérdidas en un transformador pueden ser consideradas como pérdidas de la carga y pérdidas que no son de la carga, a su vez las pérdidas de la carga se componen de pérdidas en el cobre o pérdidas en los devanados y de pérdidas parásitas, las pérdidas parásitas son de especial importancia cuando se realiza la evaluación del calentamiento adicional debido al efecto de una forma de onda de corriente no seniodal.

Las pérdidas por corrientes parásitas debidas a flujo electromagnético parásito en los devanados del núcleo, armadura, blindajes antimagnéticos (magnetic shields), tanque de refigeración, y otras partes estructurales del transformador se llaman pérdidas parásitas, en los devanados incluyen pérdidas por corrientes parásitas en los conductores y pérdidas debidas a corrientes circulantes entre los conductores o circuitos devanados paralelos, así las pérdidas aumentarán en proporción al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, la temperatura aumentará en las partes estructurales por corrientes parásitas, conforme el cuadrado de la corriente de la carga y con el cuadrado de la frecuencia.

6.4 Cables de suministro de potencia

Los cables de suministro de potencia envuelven en el sistema resonancia como describe la sección 5.3.1.2, puede ser resultado de esfuerzo de tensión y corona, el cual puede llevar a falla dieléctrica del aislamiento, los cables que están sujetos a niveles ordinarios

de corrientes armónicas son propensos a calentamiento. El flujo de corriente no senoidal en un conductor causa calentamiento adicional por encima del que tiene a valor $_{RMS}$, debido a dos fenómenos efecto superficial (efecto Kelvin) y efecto de proximidad, ambos varían como funciones de la frecuencia, también con el calibre y el espaciamiento, como resultado de ambos efectos la resistencia efectiva de ac R_{AC} queda por encima de la resistencia de dc. R_{DC}. Especialmente para conductores largos. Cuando una forma de corriente rica en armónicos de alta frecuencia esta fluyendo en un cable la R_{AC} equivalente para el cable está muy alta amplificando las pérdidas de I^2R_{AC} . Un ejemplo de curvas típicas de reducción de la capacidad nominal para seis cables se muestra en la figura 6.1.

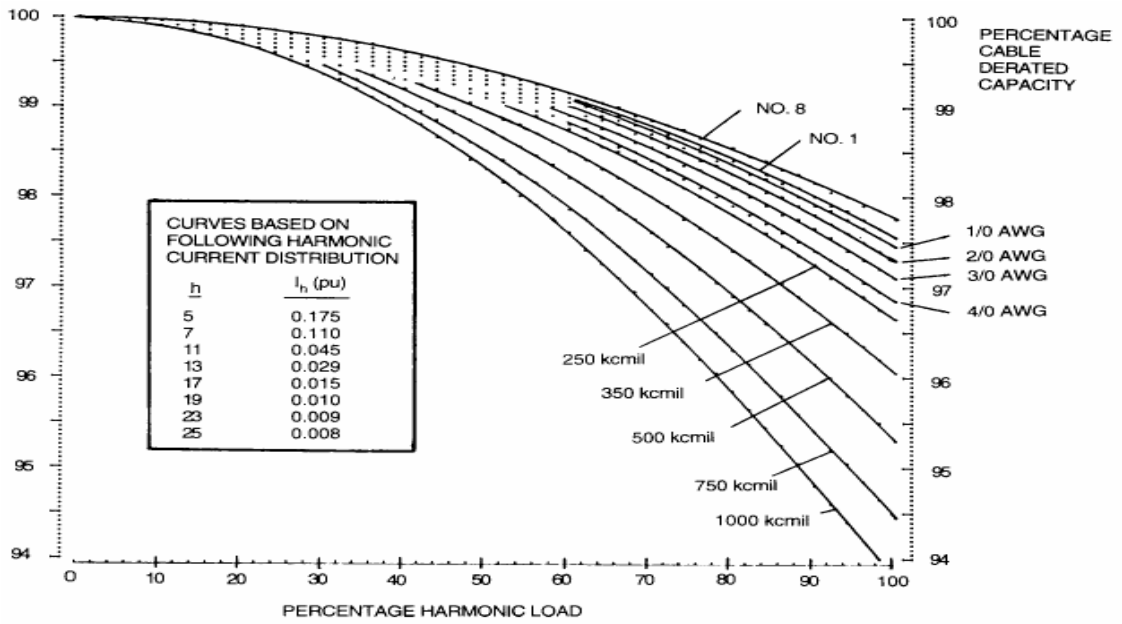


Figura 6.1

Reducción de la capacidad nominal (derating) de cable v.s. armónicos con distribución de corriente armónica de seis semicondutores (pulsos)

Se puede ver que el calentamiento por armónicos en cables normalmente no importa, sin embargo, un diseño prudente podría proveer a la red de la capcidad nominal requerida.

6.5 Capacitores

La mayor preocupación resultante del uso de capacitores en un sistema de potencia es la posibilidad de resonancias, ese efecto impone tensiones y corrientes considerablemente mayores que las que puede haber en el caso sin resonancia, la reactancia de un banco de capacitores se decrementa con la frecuencia, por tanto actúa como pozo para altas corrientes armónicas, ese efecto incrementa el calentamiento y el esfuerzo dieléctrico, la

conmutación frecuente de componentes magnéticos no lineales como reactores y trasformadores puede producir corrientes armónicas que se suman a las cargas de capacitores, el resultado del incremento de calor y del esfuerzo por tensiones armónicas es un acortamiento de la vida del capacitor.

6.6 Equípo electrónico

El equipo electrónico de potencia es susceptible de mala operación causada por distorsión armónica, esos equipos a menudo dependen de aspectos de la forma de onda así como de la exacta determinación de los cruces por cero y de otros aspectos de la forma de onda, la distorsión armónica puede resultar en un cambio del cruce por cero de la tensión o del punto en el cual una tensión fase-fase llega a ser más grande que otro tensión fase-fase, ambos son puntos críticos para muchos tipos de circuitos electrónicos de control, y puede resultar de esos cambios un mal funcionamiento o mala operación.

Otros tipos de equipos electrónicos pueden ser afectados por transmisión de armónicos de la fuente de potencia o por acoplamiento magnético de componentes internos, computadoras y equipos relacionados como los controladores programables PLCs frecuentemente requieren de fuentes de alimentación con factor de distorsión armónica no mayor del 5%, con valor para el armónico más grande siendo no mayor del 3% de la fundamental, altos niveles de armónicos resultan en funcionamientos lijeros y erráticos de los equipos que pueden en algunos casos tener consecuencias serias, los equipos de instrumentación pueden ser afectados de igual forma dando datos errados o presntar funcionamientos impredecibles, siendo los más serios los equipos de instrumental médico, en consecuencia muchos equipos médicos están provistos con acondicionadores de potencia de línea.

Pueden ser observados efectos de armónicos menos dramáticos que causan interferencia en equipos de radio de televisión, video grabadoras y sistemas reproductores de de audio, muchos equipos electrónicos son colocados a niveles de potencia menores que los niveles de potencia de los sistemas de distribución asociados, éstos frecuentemente son expuestos a los efectos del ranuramiento de la tensión , que frecuentemente introducen tanto frecuencias armónicas como no armónicas mayores que las que son exhibidas en sistemas de distribución de potencia de 5 KV y mayores, esas frecuencias están en el rango de radio frecuencias y pueden introducir efectos dañinos asociados con falsas radio frecuencias (spurious RF) , efectos que a menudo son de interferencia en la señal introducida en circuitos lógicos y de comunicación, los efectos de la ranuración (

ranuramiento) no tienen potencia suficiente para lograr sobrecargar los filtros de interferencia electromagnética y otros circuitos capacitivos similares sensibles a las altas frecuencias.

6.7 Equipo de medición

Los equipos de instrumentación y medición se ven afectados por componentes armónicos principalmente si existen condiciones de resonancia que resulten en corrientes y tensiones armónicas de alta frecuencia, los dispositivos de disco magnético por inducción como los wattmetros de disco normalmente solo son susceptibles a la corriente fundamental, sin embargo desbalances de fase causados por distorsión armónica pueden causar operación errada, de los mismos. Tanto errores positivos como negativos son posibles en la presencia de distorsión armónica dependiendo del tipo del instrumento de medición que se esté considerando y de los armónicos envueltos, de forma general para ser detectados errores significativos el factor de distorsión debe ser severo es decir mayor de 20%, son usuales (comunes) transformadores de instrumentación de 60 Hz para instrumentación no se ven afectados por los niveles de armónicos normalmente encontrados.

6.8 Relevadores e Interruptores (switchgear and relaying)

Igual que en otros dispositivos y equipos las corrientes armónicas pueden incrementar el calentamiento y las pérdidas en el conjunto de dispositivos de conmutación reduciendo la capacidad de transporte de corriente de estado estable y reduciendo la vida de otros componentes de aislamiento, los fusibles sufren de degradamiento a causa del calentamiento generado por los armónicos durante operación normal, no hay estándares actuales para el nivel de corrientes armónicas que los dispositivos de conmutación (interruptores) o fusibles requieren para interrumpir o fusionarse de hecho se ejecutan pruebas a frecuencias seleccionadas.

Generalmente los relevadores de protección no responden a algún parámetro identificable tal como el valor $_{RMS}$ de una cantidad primaria o la componente de frecuencia fundamental de la propia cantidad, la consideración del funcionamiento de un relevador relacionada a un conjunto de entradas de rango de frecuencia pura no es un indicador de cómo responderá a una onda distorsionada conteniendo esas frecuencias, el principio de superposición no resulta aplicable, relevadores de entrada múltiple pueden ser mayormente impredecibles que los de una sola entrada en presencia de una onda

distorsionada, la respuesta de un relevador bajo condiciones de distorsión puede variar de entre relevadores que tienen las mismas características a frecuencia nominal fundamental, no solo varían entre fabricantes diferentes sino que también presentan diferentes ventajas y desventajas que hay entre relevadores del mismo fabricante.

Un estudio realizado en Canada sobre los efectos de los armónicos en los relevadores arrojó que:

1. Exhiben una tendencia a operar lentamente y/o con altos valores de pico, antes que operar rápidamente y/o con bajos valores de pico.
2. Los relevadores estáticos de subfrecuencia son susceptibles a cambios sustanciales en características de operación.
3. En muchos casos, cambios en las características de operación son relativamente pequeños sobre el rango de distorsión esperado durante operación normal (5%).
4. Para diferentes fabricantes los relevadores exhiben diferentes cambios característicos en operación tanto a sobretensión como a sobrecorriente.
5. Dependiendo del contenido armónico los torques de operación algunas veces son revertidos, es decir, hay aflojamientos.
6. Los relevadores de impedancia a radiación electromagnética balanceada muestran extralimitaciones o limitaciones dependiendo de la distorsión.
7. Los armónicos a veces debilitan la alta velocidad de operación de diferentes relevadores, algunas pruebas demuestran que pueden exhibir limitación total.

Se requieren factores de distorsión de entre 10 y 20 % para causar problemas en la operación de los relevadores, la primera y segunda generación de interruptores con dispositivos de disparo de estado sólido respondían a picos de corriente, han respondido también a valores $_{RMS}$ de corriente, modelos anteriores pueden causar problemas de disparo.

6.9 Interferencia telefónica

La presencia de armónicos en circuitería asociada con equipos de conversión de potencia, puede producir tanto campos eléctricos como magnéticos que perjudican el funcionamiento satisfactorio de los sistemas de comunicaciones, equipo de suministro de energía para telecomunicaciones, que por su cercanía y sensibilidad pueden ser afectados (perturbados), la perturbación es función tanto de la amplitud como de la frecuencia (de ambas) y de las componentes de perturbación del aparato de conversión.

Una fuente primaria de interferencia es la presencia de corrientes o tensiones armónicas, en el sistema de potencia, es necesario revisar los factores que pesan sobre las componentes de frecuencias armónicas para mantenerlas actualizadas en sus registros mejorando el estado de los sistemas de comunicación, los pesos relativos (tablas) para varias frecuencias armónicas que indican perturbaciones de frecuencia en sistemas de comunicación de voz, donde, la inyección de una señal de frecuencia armónica en la red de comunicación producirá un efecto relativo al que podría ser producido por una señal de 1 KHz similarmente inyectada.

6.9.1 Factor de peso TIF

El factor de peso TIF es una combinación de las características de peso del C message el cual considera para efecto relativo la interferencia de varias frecuencias en la banda de voz (incluyendo la respuesta del teléfono y del oido), y de un capacitor, el cual provee un peso directamente proporcional a la frecuencia para tomar en cuenta el considerar la función de acoplamento, el TIF es una cantidad adimensional que indica la forma de onda, no la amplitud y es dada por las ecuaciones 6.1 y 6.2:

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum (I_f W_f)^2}}{X_t}$$ (Ec. 6.1) o su equivalente: $$TIF = \sqrt{\sum \left[\frac{X_f W_f}{X_t} \right]^2}$$ (Ec. 6.2)

donde
x_t = Tensión o corriente total $_{RMS}$
x_f = corriente o tensión $_{RMS}$ a frecuencia f, frecuencia única
w_f = peso $_{TIF}$ a frecuencia f, frecuencia única

La función de peso TIF, w_f, la cual refleja el peso del mensaje C presente y el acoplamiento (componente de proporcionalidad) normalizado a 1 KHz se encuentra dado por la ecuación 6.3:

$$W_f = 5 P_f f$$ (Ec. 6.3)

P_f = peso del mensaje C a frecuencia f
f = frecuencia en consideración

La interferencia telefónica a menudo es expresada como producto de la corriente y del TIF, llamada producto IT, donde I es la corriente $_{RMS}$ en amperes y T es el TIF, como forma alternativa a veces es expresada como producto de la tensión y del TIF, donde la

tensión es expresado en KV, es decir el producto kVT, los valores simples de TIF aparecen listados en la tabla 6.2 y son representados gráficamente en la figura 6.2.

FREQ	TIF	FREQ	TIF	FREQ	TIF	FREQ	TIF
60	0.5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3300	8090
360	400	1260	6050	2160	9080	3540	6730
420	650	1380	6370	2220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6560	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	2760	1620	6970	2580	10600	4260	2750
780	3360	1740	7320	2820	10210	4380	2190
900	4350	1800	7570	2940	9820	5000	840
1000	5000						

Tabla 6.2
Valores de interferencia telefónica TIF para cada frecuencia

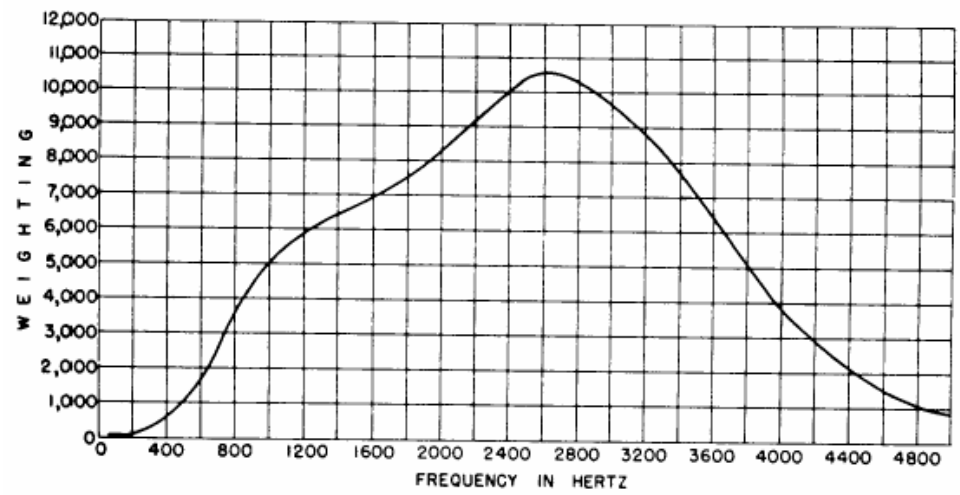


Figura 6.2
Valores de interferencia telefónica

6.9.2. Metodos de reducción de interferencia

Donde el equipo de conversión de potencia está directamente conectado al sistema de distribución, mucha de la interferencia resultará en perturbaciones de corriente y tensión armónicas localizadas sobre la red de servicio por el convertidor, debido a la proximidad y mayor exposición que tienen los circuitos de comunicaciones a dicha red, otras exposiciones a interferencia en el convertidor estan contenidas dentro de complejos industriales, sus efectos pueden ser considerados en niveles despreciables mediante la

colocación idónea y protección del cableado en la instalación, las perturbaciones al sistema de comunicación pueden ser reducidas por medio de:

6.9.2.1. Multifaseamiento en equipos de conversión (multiphasing of the conversión equipment)

Incrementando del número de fases (número de pulsos, es decir de elementos semiconductores) en el sistema de conversión se reducirán ciertos componentes armónicos en los conductores del convertidor.

6.9.2.2. Corrientes de retorno (tierra) o corrientes residuales

Los circuitos telefónicos son particularmente sensibles a la influencia de las corrientes de retorno (a tierra o residuales), se debe ejercer cuidado especial en mantener éstas en el mínimo absoluto, dentro de sistemas trifásicos balanceados entre más largos sean los conductores de un circuito telefónico tienen igual exposición a perturbaciones, los armónicos inducidos tanto de tensión como de corriente se tienden a cancelar.

6.9.2.3. Efectos de conmutación

La presencia de reactancia en la red de suministro y reactancia en los transformadores del convertidor contribuyen a la reactancia de conmutación del convertidor, ésta causará en los productos kVT e IT de las terminales de línea un incremento rápido con ángulo de fase de atraso, para minimizar la influencia inductiva, donde sea predecible, es deseable mantener el ángulo de fase de conmutación en atraso en el convertidor tan pequeño como sea posible.

6.9.2.4. Filtrado

La influencia de corrientes y tensiones en el sistema de distribución causados por componentes armónicos en el convertidor pueden ser reducidos mediante la elección correcta (juiciosa) de filtros reactivos en serie y en derivación localizados entre las (en) interfases entre dos sistemas, deben ser ejercidos, precaución y cuidado extremo en la aplicación de tales filtros para evitar posibles condiciones de resonancia resultantes de los armónicos inesperados que podrían aparecer a futuro en el sistema de distribución causando daños catastróficos.

6.10 Convertidores Estáticos de potencia

Generalmente los sistemas de conversión de potencia estáticos son perpetradores que generan armónicos como acompañantes de su funcionamiento, en muchas ocaciones, los convertidores se ven afectados por los armónicos tanto por los que han generado otros equipos como los que ellos mismos han generado, a menudo las otras fuentes generadoras de armónicos son equipos similares incluso idénticos que son conectados en paralelo a la fuente de alimentación (paralelizados).

Algunas de las topologías de conexión de convertidores son relativamente insensibles a los armónicos, normalmente los diodos rectificadores no se ven afectados, sin embargo, si usan capacitores en las redes de compartición de tensión (es decir diodos en serie en un rectificador de alta tensión), dichos capacitores pueden estar sujetos a esfuerzo térmico, situación que debe prevenirse y contemplarse desde la fase de diseño debido a las altas corrientes aplicadas en ellos por los armónicos en la fuente de alimentación, esos armónicos serán transferidos a la carga, los cuales pueden dañar o causar perturbaciones en los equipos de proceso alimentados por la dc.

Las dificultades que se presentan para los diodos rectificadores pueden ser encontradas por otros tipos de convertidores como con thrystores o inversores, los últimos tienen varias áreas adicionales sensibles, regularmente tienen circuitos capacitivos adicionales de amortiguamiento, filtros EMI, y filtros de la fuente de potencia, que por las corrientes armónicas están sujetos a esfuerzo térmico, muchos convertidores cuentan con varias características de fuente de alimentación (como las veces que cruza por cero) para su control.

Si la llegada de la fuente de alimentación es severamente distorsionada por armónicos, los convertidores pueden errar, fallar al conmutar, o generar armónicos no característicos, también los circuitos de control del convertidor, que incluyen también elementos lógicos es decir circuitos lógicos secuenciales como los flip-flops, los cuales son sensibles a los fenómenos de armónicos; es decir eventos de tensiones transitorios no deseados en una señal siendo procesada debido a expulsión de átomos o grupos de átomos desde un cátodo resultado del impacto de iones; de manera que la expulsión de átomos de la fuente envuelve un movimiento de un gran número de partículas en la fuente de manera que las colisiones entre partículas llega a ser significativa, lo que termina siendo un problema técnico.

Capítulo 7 Control de Armónicos y Compensación de Potencia Reactiva

7 Control de Armónicos y Compensación de Potencia Reactiva

7 Control de Armónicos y Compensación de Potencia Reactiva

7.1 Factor de potencia del Convertidor

El factor de potencia de un convertidor se encuentra formado por dos componentes; el desplazamiento y la distorsión, el efecto de ambos está combinado en el factor de potencia total, como se muestra la Fig. 7.1.

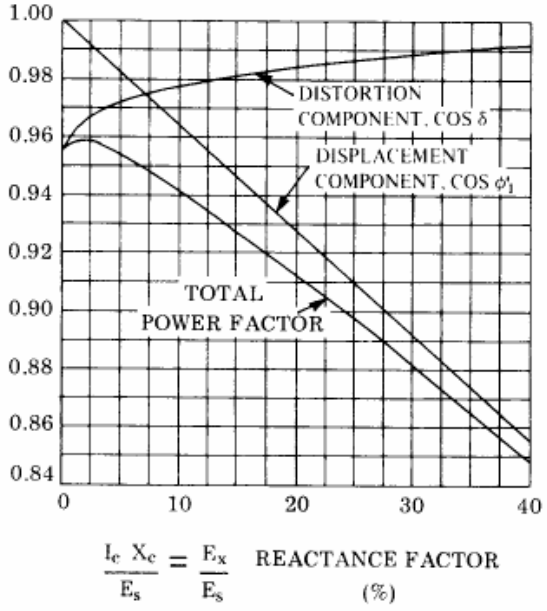


Figura 7.1
Relación entre Desplazamiento, Distorsión y Componenetes del Factor de Potencia Total

La componente de desplazamiento es la relación entre la potencia activa de la onda fundamental en Watts, respecto de la potencia aparente de la misma en Voltampers; éste es el factor de potencia visto por un watthorímetro y un varhorímetro.

La componente de distorsión es la parte asociada con las tensiones y las corrientes armónicas presentes y está definida como la razón de la componente fundamental de la corriente de línea de alterna respecto a la corriente de línea total (I_1/ I_L).

El factor de potencia máximo teórico está dado por la expresión, ecuación 7.1:

$$PFtotal = \frac{q}{\pi} sen\left(\frac{\pi}{q}\right) \qquad \text{(Ec. 7.1)}$$

donde
q número de pulsos (semiconductores) del convertidor
(π / q) ángulo en radianes
q $\neq$ 1

La expresión asume que no hay traslape de conmutación ni retraso de fase, desprecia la corriente de magnetización del transformador; para un convertidor de seis semiconductores (pulsos) la expresión se reduce a la ecuación 7.2:

$$PF = \frac{3}{\pi} = 0.955 \qquad \text{(Ec. 7.2)}$$

Un convertidor de doce semiconductores (pulsos) llega a un valor máximo de 0.988, considerando traslape de conmutación así como retraso de fase, la expresión queda conforme la ecuación 7.3:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{E_d I_d}{E_L I_L} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{f(\mu,\alpha)} \left(\cos\alpha - \frac{E_x}{E_{do}}\right) \qquad \text{(Ec. 7.3)}$$

donde
$E'_d = E_d + E_r + E_f$
$E'_d =$ Tensión ¿?
E_d = Tensión de directa promedio bajo carga
E_r = caída en la resistencia
E_f = caída total de realimentación por elemento del circuito
I_d = corriente total de cd suministrada por el convertidor, en amperes promedio
E_L = Tensión $_{RMS}$ línea-línea primario
I_L = corriente de línea en el primario $_{RMS}$ en amperes
α = ángulo de retraso de fase
μ = ángulo de conmutación o de traslape
E_{do} = Tensión de cd teórico
E_x = caída de tensión de directa debido a reactancia de conmutación

$$f(\mu,\alpha)=\frac{sen\mu[2+\cos(\mu+2\alpha)]-\mu[1+\cos\alpha\cos(\mu+\alpha)]}{[2\pi\cos\alpha-\cos(\mu+\alpha)]^2} \qquad \text{(Ec. 7.4)}$$

El factor de desplazamiento de potencia es el factor de potencia que es medido por los equipos de medición y es en aquel que se basa la cobranza o facturación del servicio eléctrico, asumiendo que no hay retraso de fase y despreciando la corriente de magnetización del transformador, queda la ecuación 7.5:

$$\cos\phi_1=\frac{sen^2\mu}{\sqrt{\mu^2 sen^2\mu-2\mu sen\mu\cos\mu}} \qquad \text{(Ec. 7.5)}$$

donde

$\cos\phi_1$ = factor de desplazamiento de potencia, no incluye corriente de magnetización del transformador

La fig 7.2 muestra la relación entre la reactancia del sistema y el factor de desplazamiento de potencia, ésta relación desprecia la corriente de magnetización del transformador; la corrección de la corriente de magnetización del transformador I_{mag} es aproximadamente la ecuación 7.6:

$$\cos\phi_1=\cos\left[\arccos\phi_1+\arctan\left(\frac{I_{mag}}{I_1}\right)\right] \qquad \text{(Ec. 7.6)}$$

donde

$\cos\phi_1$ = factor de desplazamiento de potencia

I_{mag} = Corriente de magnetización del transformador

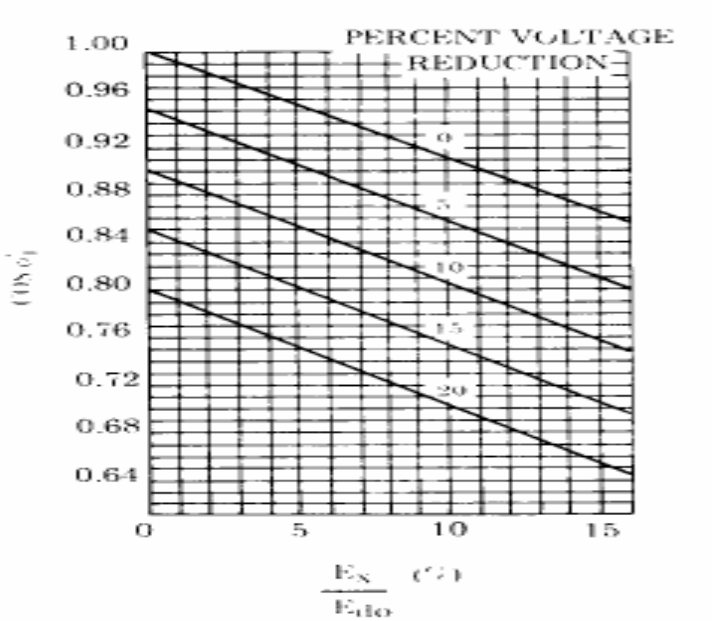


Figura 7.2
Desplazamiento del factor de potencia

(despreciando la corriente de exitación en el transformador)

La fig 7.3 muestra el factor de potencia total de un convertidor de doce semiconductores (pulsos) sin retraso de fase así como varios valores de corriente de magnetización del transformador.

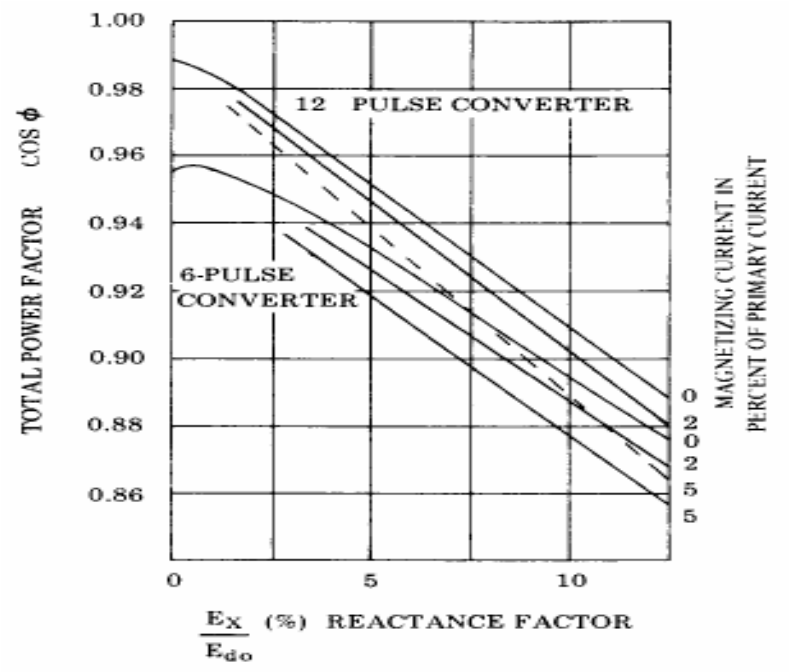


Figura 7.3

Factor de potencia total de un convertidor de seis semiconductores (pulsos) y de uno de doce pulsos α = 0°

Los convertidores estáticos de potencia de línea conmutada necesitan una fuente de potencia reactiva dependiendo si estan invirtiendo o rectificando, en ambos casos, el thrystor puede solo conectar la corriente después que la tensión ha llegado a ser más positivo que la tensión de fase previo, la operación más cercana (cerrada) es a cero volts dc, ver la figua 7.4 entonces es requerida la mayor cantidad de potencia reactiva con la misma corriente.

Los requerimientos de potencia reactiva de los circuitos convertidores de energía comúnmente usados es función de la carga y de la tensión de salida y puede ser calculada.

Es posible reducir los requerimientos de potencia reactiva de los convertidores estáticos de potencia de línea conmutada por:

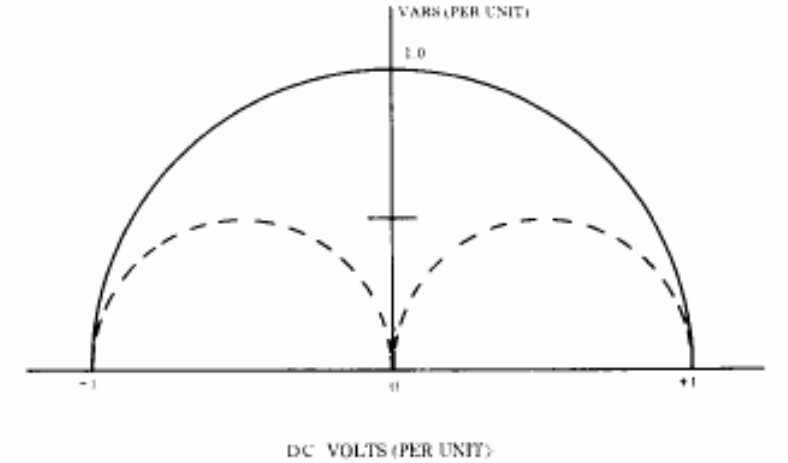


Figura 7.4
Potencia reactiva v.s.CD del convertidor

1. Limitando la cantidad de control de fase requerida (limitar α).
2. Bajando la reactancia del transformador del convertidor (limitar μ).
3. Control secuencial o asimétrico de los convertidores (limitar α).

7.1.1. Control del límite de fase

Los convertidores estáticos de potencia regularmente están diseñados para operar desde un sistema de potencia cuyo rango de tensión está entre el 10 y hasta el 5% de la tensión nominal, si el convertidor es un inversor, ellos están diseñados para operar con un +/- 10% de tensión, esto significa que la tensión del sistema de potencia puede variar sobre +/- 10% y aún tener operación satisfactoria.

Si es usado otro método de control de tensión para mantener la tensión del sistema en un rango estrecho o reducido, la tensión del secundario del transformador del convertidor puede ser elegido de forma que, durante operación normal, el convertidor esté operado lo mayormente cercano a totalmente en fase (menos retrasado).

Si la carga que el convertidor está alimentando requiere de un rango amplio de tensión, pueden ser colocadas derivaciones (taps) en el transformador para limitar la cantidad de control de fase utilizado por el convertidor.

7.1.2. Transformador de baja reactancia

Es requerida potencia reactiva para exitar tanto la reactancia de magnetización como la de dispersión de los transformadores, reduciendo la corriente de magnetización y la

reactancia de dispersión se reduce la potencia reactiva y el ángulo de conmutación μ, la reactancia de dispersión reducida puede introducir riesgos en los circuitos de protección.

7.1.3 Control asimétrico o secuencial

Por diseño de un convertidor estático de potencia para operar con dos secciones de conversión en serie, es posible tener la primera sección totalmente enfasada y la segunda sección adicionando o sustrayendo de la tensión de la primera sección. Porque una parte pequeña del total del convertidor estático está operando con control de fase, es requerida una pequeña cantidad de potencia reactiva, la fig 7.4 muestra los requerimientos reactivos de un solo convertidor (línea sólida) y dos convertidores en serie (en las líneas ashuradas).

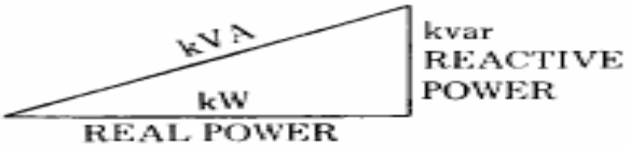
7.1.4 Otras consideraciones

La habilidad para reducir los requerimientos de potencia reactiva de un convertidor estático de potencia está limitada por el número de unidades envueltas y el factor o capacidad económica del empleo de alguno de los métodos anteriores, control de tensión por medio de un transformador regulador puede reducir el control de tensión requerido por retraso de fase en el convertidor, una pequeña reactancia en el transformador del convertidor puede resultar en corrientes de corto circuito inaceptables, si la aplicación requiere convertidores suficientemente grandes de manera que se implementen en dos secciones pueden ser económicos tanto el control secuencial como el asimétrico de manera que son necesarios dos convertidores seccionados.

7.2 Compensación de potencia reactiva

La relación de infraestructura de la red de suministro está formada de dos componentes principales, cambios en la demanda y carga de energía, la primera es el resultado de la inversión en equipos para proveer la cantidad de potencia (energía) total a los clientes, la segunda es el resultado del combustible o energético o caudal que debe ser gastado para generar la energía usada.

La carga total (kVA) está compuesta por dos componentes en cuadratura, la potencia activa (kW) y por la potencia reactiva (kVAR.), ver la figura 7.5, si es posible redicir los kVA a través del suministro de potencia reactiva de manera local así la demanda de carga puede ser disminuida.



Fgura 7.5
Triángulo de potencias

Las fuentes de suministro de potencia reactiva son:

1. Capacitores de estáticos potencia.
2. Máquinas síncronas.
3. Convertidores estáticos de potencia de conmutación forzada.

7.2.1 Compensación de potencia reactiva empleando capacitores estáticos de potencia.

Los capacitores de potencia son una fuente relativamente barata de potencia reactiva, proveen VARes proporcionales al cuadrado de la tensión aplicado, esa potencia reactiva causa un aumento en la tensión a través de la reactancia inductiva del sistema de potencia, eso aumenta el nivel de la tensión de operación, los capacitores deben ser conmutados en orden de controlar lastensiones y proveer potencia reactiva variable.

Cuatro métodos de control de VARes empleando capacitores en orden de su complejidad son:

1. Conectados por medio de interruptores de potencia o conmutador al vacío.
2. Conexión-desconexión de reactor de control de fase por medio de thrystores, pareados (espalda con espalda).
3. Conexión-desconexión de capacitores a corriente cero por medio de conmutador de thrystores, pareados, (espalda con espalda).
4. Reactor saturable en paralelo con el banco de capacitores.

7.2.1.1 Capacitores conectados por medio de interruptores de potencia

Para el control de potencia reactiva en una base contínua la conmutación de capacitores de potencia por medio de interruptores, o conmutadores al vacío requiere de un dispositivo de conexión / desconexión que pueda ser operado frecuentemente y pueda

interrumpir a corriente cero con una alta tensión a través de los contactos sin reignición, éste método es utilizado para conmutar grandes bancos de capacitores una vez o un par de veces al día, cuando la demanda de las cargas cambia de normal a baja, los dispositivos de conmutación tienen habilidades especiales de poder interrumpir a corriente que condusca la tensión por 90°, donde esas limitaciones no son desventajas de operación, éste método de operación es muy económico. Ver la figura 7.6.

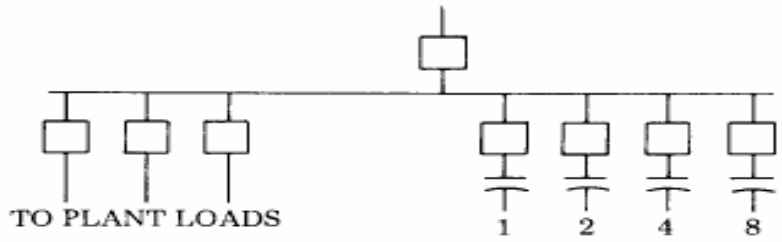


Figura 7.6
Capacitores conmutados en valores binarios

7.2.1.2 Conexión-desconexión de un reactor de control de fase por medio de thrystores, pareados, (espalda con espalda) en paralelo con el banco de capacitores

Tiene la ventaja de alisar el control de potencia VARes sobre el rango de tensión del equipo, los problemas relacionados a la conmutación del capacitor son evitados mediante la conmutación de la corriente al reactor, el control por thrystores de una carga trifásica balanceada causa armónicos por lo que los capacitores pueden ser divididos en dos o más secciones con reactores sintonizados para filtrarlos, para obtener control total la razón del reactor de potencia reactiva es igual a la del capacitor, pueden ser suministrados más capacitores si son necesarios más VARes para polarizar el sistema. Ver figura 7.7.

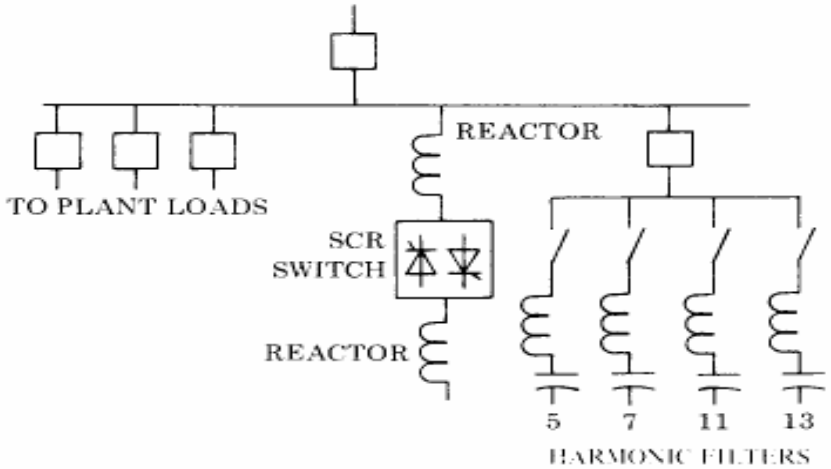


Figura 7.7
Compensador estático de potencia reactiva utilizando un reactor controlado por thystores pareados TSR

7.2.1.3 Conexión-desconexión de capacitores a corriente cero por medio de conmutador de thrystores, pareados (espalda con espalda) TSC (thrystor shifted capacitor).

Deja al capacitor cargado con tensión positivo o negativo por completo, el control fino por medio de thrystores permite la conmutación del capacitor cuando la tensión del sistema iguala la tensión del capacitor cargado, ésto elimina los transitorios en el sistema, los capacitores son conmutados en pasos finitos conforme va siendo necesaria la potencia reactiva, los capacitores conmutados pueden ser sintonizados con un reactor para filtrar los armónicos del sistema, éste puede ser utilizado con capacitores de polarizaciones fijas para proveer VARes base con capacitores y reactor controlado por thrystores que son usados para obtener VARes variables, una combinación de reactor y capacitores controlados por thrystores puede ser utilizada para obtener control por posiciones entre los pasos del TSC. Ver figura 7.8.

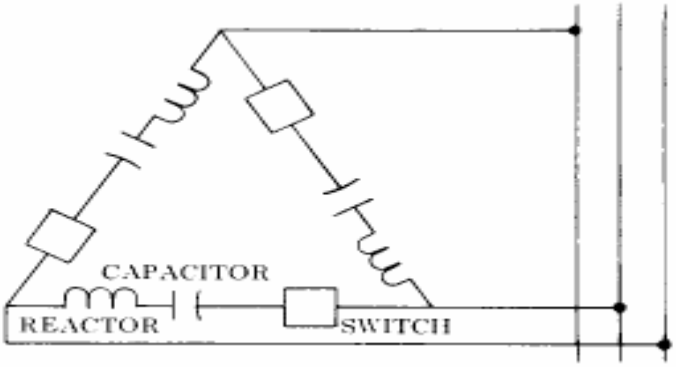


Figura 7.8
Capacitor conmutado por thystor TSC

7.2.1.4 Reactor saturable en paralelo con un banco de capacitores

Provee una fuente variable de VARes que no requieren circuitos de control externo, éste sistema consiste de un reactor autosaturable en paralelo a un banco de capacitores que pueden ser arreglados en circuitos serie sintonizados, el reactor autosaturable extrae las corrientes pesadas a sobretensiones de manera que la caída a través de la reactancia del sistema neutralice el aumento de la tensión en la carga.

Conforme la tensión del sistema se decrementa el rector extrae menos corriente y los capacitores paralelizados proveen los VARes necesarios en la carga, los armónicos generados por la saturación del hierro están algo compensados por configuración de

devanados, sin embargo, a menudo el capacitor paralelizado esta provisto con circuitos serie sintonizados para los armónicos 5to y 7mo, etc. Ver figura 7.9

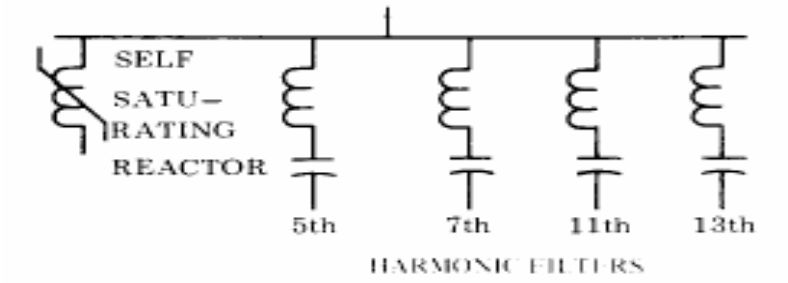


Figura 7.9
Compensación de potencia reactiva empleando un ractor autosaturable

7.2.2 Compensación de potencia reactiva empleando maquinaria rotativa

Pueden ser fabricadas máquinas síncronas para operar con factor de potencia en adelanto o atraso para controlar la exitación del campo, ésta propiedad puede ser utilizada para compensar bajo una base dinámica con una estrategia de control. Es llamado condensador síncrono cuando es dedicado solamente como compensador de potencia reactiva, no tiene carga mecánica, toda su capacidad está disponible como potencia reactiva.

A menudo un condensador síncrono es utilizado con un banco fijo de capacitores igual a los VARes de máquina (potencia reactiva), esto permite un rango total de operación desde cero hasta un par de veces la razón de máquina para VARes con ajuste propio de la exitación de campo, un motor síncrono puede ser dimensionado para proveer VARes, cuando son incluidos en el sistema, podrían ser tomadas en cuents consideraciones para ésta posibilidad porque el incremento en el costo de la provisión de VARes en adelanto puede ser bastante atractivo. Por lo que con una estrategia apropiada de control los VARes pueden ser ajustados a los requerimientos del sistema (regulador de factor de potencia).

Cuando son utilizadas máquinas síncronas para proveer compensación de factor de potencia se debe de considerar:

1. Perfil de comportamiento (gráficas, registros y tablas) en el tiempo de la demanda de las potencias reactiva y real en las barras colectoras (bus) del sistema a ser protegido.

2. Desviación de tensión permisible en dicho en las barras colectoras (bus) tanto en estado estable como en transitorio.
3. Perfil de comportamiento en el tiempo de la demanda de potencia reactiva que la máquina síncrona puede suministrar en orden de mantener la desviación de tensión permisible dentro se los límites. Nota: En virtud de la energía magnética almacenada en una máquina síncrona puede proveer compensación instantánea a perturbación de tensión, para proveer compensación complementaria debe ser ajustado, puede ser reducido el tiempo requerido en campo de forma forzada con un exitador de campo o convertidor estático de potencia.
4. Compatibilidad respecto a convertidores estáticos de potencia en áreas como
    i. Sensibilidad a desbalances de tensión
    ii. Calentamiento de la línea de ac por armónicos
    iii. Corrientes de interconexión o acoplamiento
5. Límites de control que eviten:
    i. Exceso de capacidad de torque en la máquina por torque (par) límite o motor crítico.
    ii. Exceso en el límite térmico de la máquina

7.2.3 Compensación de potencia reactiva empleando convertidores autoconmutados

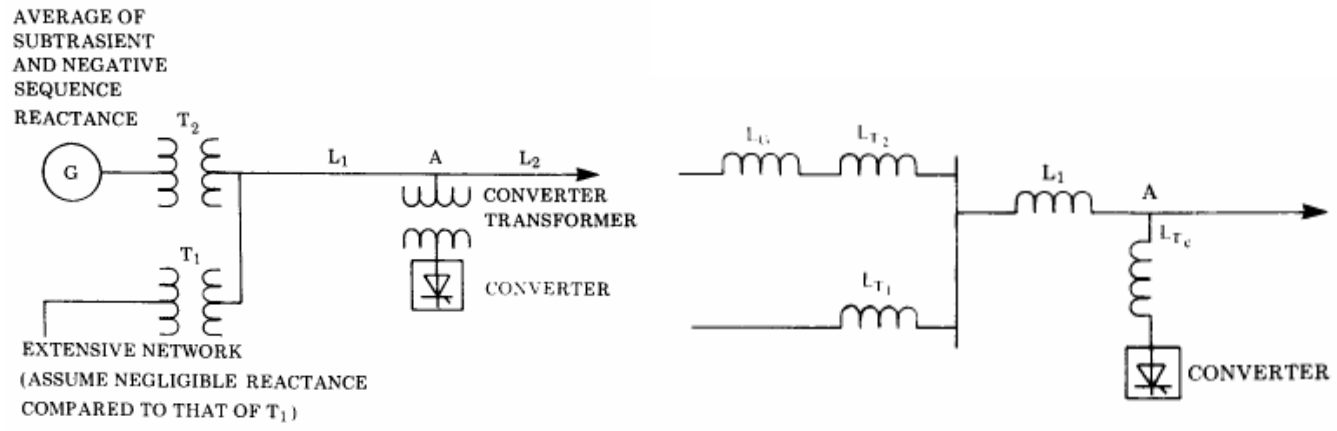
La técnica de forzar conmutación en fase diferente antes que la tensión ha llegado al mayor valor positivo produce VARes en adelanto, un ejemplo es un inversor que usa batería como fuente de energía. Los convertidores autoconmutados incorporan sus propios medios de conmutación y pueden conmutar independientemente de la tensión de línea como en la conversión por conmutación de línea, éste convertidor autoconmutado funciona cercanamente de la misma forma que un generador de sistema de distribución convencional, esto es, una fuente de tensión trás una impedancia. Los convertidores no tienen esencialmente inductancia en el lado de dc, pero requieren de inductancia adicional en el lado de ac, no es necesaria compensación de potencia reactiva.

La generación de armónicos de tensión puede ser controlada mediate el uso de un cierto número de técnicas, tales como multiplicación de pulsos, que cancelan los pares de armónicos de orden bajo, el tratamiento de los armónicos remanentes es bastante diferente con el convertidor de conmutación forzada, la inductancia en el lado de ac de ese tipo de convertidores ofrece una alta impedancia al paso de armónicos de corriente de alta frecuencia, en casos en que el sistema de ac es relativamente rígido a la

reactancia de ac, no es requerido control de armónicos de tensión en el las barras colectoras (bus) de ac.

7.3 Control de armónicos de corriente

La figura 7.10 muestra el suministro de un convertidor desde una fuente de potencia G sobre una línea trifásica L_1, la ractancia de la fuente $X_G + X_{T2}$ y la línea L_1 están en serie con la reactancia del transformador del convertidor X_t, Si una corriente armónica I_h fluye entre el convertidor y la fuente habrá una tensión armónico $E_h = I_h X_h$ en el punto A (X_h es la reactancia de la fuente a frecuencia armónica h), cuando hay una extensión, L_2 para suministrar energía a otras cargas la tensión armónico en A causará una corriente armónica que fluya sobre esa línea también, aunque la potencia para el rectificador es suministrada solo sobre la L_1, el más alto valor de X_h hará más grande el alto valor de la tensión armónico en A, y más grande la magnitud de las corrientes armónicas fluyendo sobre la línea L_2, las corrientes armónicas desde el convertidor pueden fluir dentro de una parte de un sistema de ac al cual estén conectados, determinados por las impedancias de los ramales del sistema a frecuencias armónicas. Pueden ser calculados tanto las corrientes como la tensiones armónicas



(a)
Diagrama esquemático

(b)
Diagrama de impedancias

Figura 7.10
Potencia en un sistema mostrando influencias de armónicos de tensión y corriente

Las corrientes armónicas pueden ser controladas por varias técnicas que incluyen:

1. Filtros de derivación (Shunt fiters)
2. Multiplicación de fase
3. Compensación de armónicos o inyección

7.3.1 Filtros de derivación (Shunt filters)

Los filtros de derivación para reducción de corrientes armónicas fluyendo dentro de un sistema de potencia consisten de uno o más circuitos LC sitonizados, el filtro comunmente usado en transmisión de directa (high voltage direct current HVDC) consiste de circuitos individuales sintonizados para los armónicos 5to, 7mo, 11ro y 13ro, más un filtro paso altas sintonizado cercanamente al 17mo armónico. Los filtros son a menudo dimensionados para proveer también mejoramiento en el factor de potencia como resultado el tamaño del filtro es suficiente no solo para controlar el flujo de los armónicos para los que fueron sintonizados sino también de mayor orden, la impedancia del filtro es baja respecto a la del sistema de potencia. En sistemas de baja tensión la razón X / R es pequeña, por tanto, un filtro sencillo es suficiente para amortiguamiento adicional, el factor de amortiguamiento es mayor con una razón X / R pequeña.

7.3.1.1 Diseño del filtro de derivación (shunt filter)

Son hechos con dos componentes el capacitor y el inductor CL, el capacitor debe ser capaz de aguantar la suma aritmética de los picos de tensión de la fundamental y de los armónicos a través del capacitor mismo, la corriente vista por el filtro es la tensión aplicado en el filtro dividido por la rectancia total del inductor y el capacitor sintonizados, la reactancia total es menor que la reactancia capacitiva, la corriente fundamental en el filtro será mayor que en el capacitor sin el reactor de sintonización, la tensión armónico a través del capacitor es la tensión debido a la corriente armónica a la que el filtro sintonizado está disponible desde la sintonía de la reactancia del capacitor a la frecuencia de sintonía.

El reactor debe poder aguantar la corriente $_{RMS}$ existente dentro del filtro, no incluye solo la corriente armónica a la que el filtro está sintonizado, sino que podrían estar presentes otras corrientes armónicas y también la fundamental.

7.3.2 Multiplicación de fase

Los convertidores monofásicos son usados comúnmente para baja carga, para minimizar los costos iniciales donde los requerimientos de corriente son pequeños pueden ser usados circuitos rectificadores de media onda la que produce armónicos pares que tienen

componentes de dc que saturan los transformadores, componentes que tienen que ser evitadas, por ello, puede ser utilizada rectificación de onda completa.

El convertidor polifásico básico es una unidad de seis semiconductores (pulsos), teóricamente una unidad de doce semiconductores (pulsos) eliminará los armónicos 5to, 7mo, 17mo y 19no; fases adicionales reducen otras corrientes armónicas. La multiplicación de fases es más efectiva para una instalación donde son usados convertidores de energía igualmente dimensionados con igual carga e igual retraso de fase.

Por ejemplo; un circuito de 24 semiconductores (pulsos) es construido con 4 puentes de 6 semiconductores (pulsos) cada uno defasados 15° cada semiconductor (pulso) por transformador cambiador de fase o por devanados adicionales en los primarios conectados en zigzag o en hexagono; ver figura. 7.11; si alguna unidad de 6 semiconductores (pulsos) está fuera de servicio la corriente armónica equivalente que corresponde a dicha unidad está presente, instalaciones robustas pueden requerir de la adición de filtros de derivación para minimizar las corrientes armónicas.

La multiplicación de fase es más efectiva para instalaciones en que son usados convertidores igualmente dimensionados con cargas y retrasos de fase iguales.

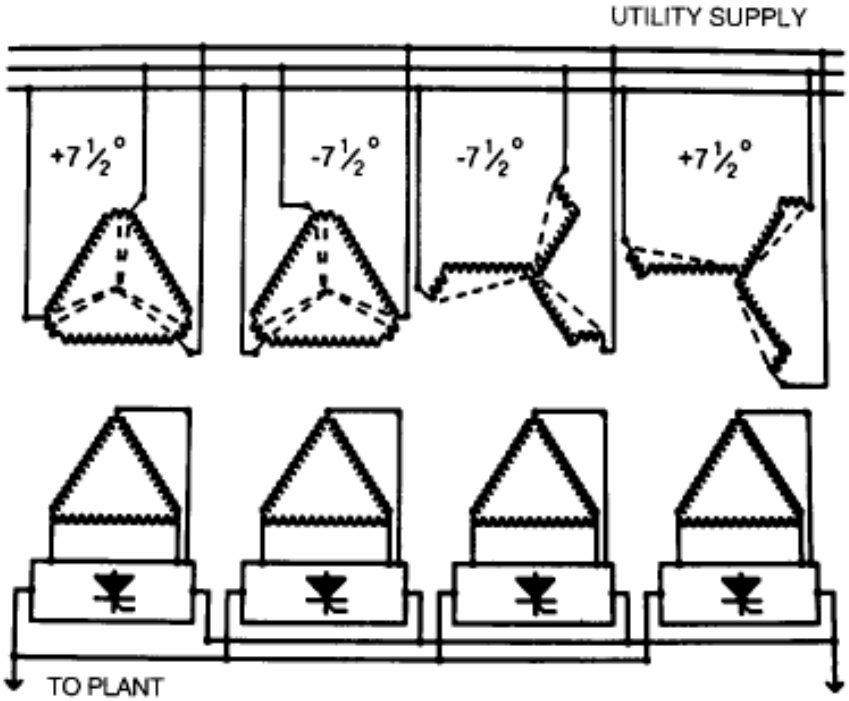


Figura 7.11
Conexiones de transformador para un sistema de 24 semiconductores (pulsos)

7.3.3 Inyección de armónicos

Las corrientes armónicas pueden ser eliminadas por inducción de flujos armónicos en el núcleo de un transformador con defasamiento de 180° de los flujos armónicos inducidos fluyendo en el secundario, son diseñados compensadores adaptables para monitorear constantemente la corriente de carga e inyectar una corriente igual y opuesta a la componenete de distorsión y así cancelarla.

Capítulo 8 Análisis de Armónicos

8 Análisis de Armónicos

8 Análisis de Armónicos

El cálculo de los niveles resultantes de las fuentes de armónicos de un sistema requiere de conocimiento de las características de las fuentes de armónicos y una representación de las características de respuesta en frecuencia del sistema.

8.1 Cálculo de corrientes armónicas

Para propósitos de análisis muchas de las fuentes de armónicos pueden ser representadas como fuentes de corriente ideales, en tal caso cada frecuencia armónica debe ser representada por una fuente similar a las de la figura 8.1, la aseveración que permite ésta reperesentación es que la tensión del sistema no está distorsionado (es decir es la base, de donde se parte), se debe asumir en ésta representación que no se distorsiona la tensión , para dispositivos no lineales la representación es bastante exacta, para niveles de tensión armónicos de al menos 10%.

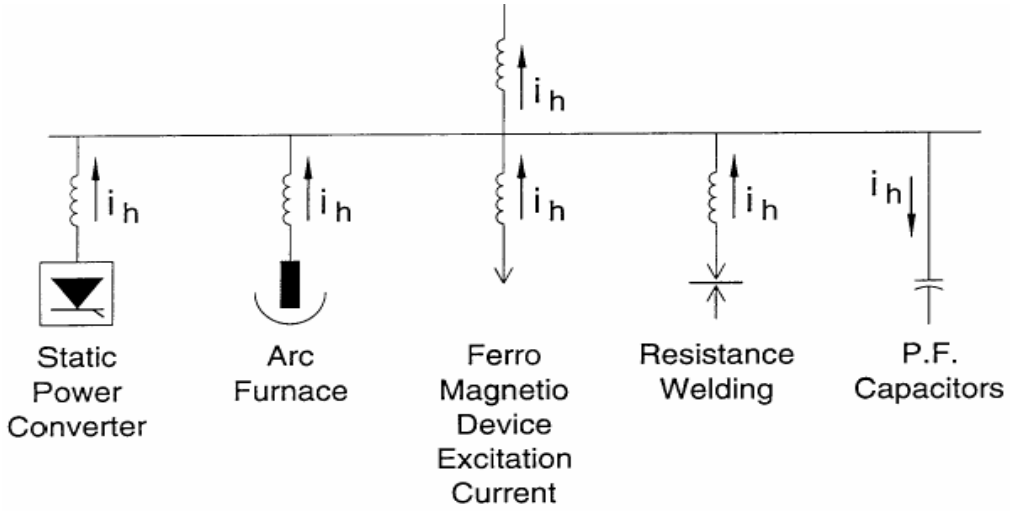


Figura 8.1
Modelado de cargas no lineales como fuentes de corriente

Las características de diferentes tipos de dispositivos no lineales están contenidas en la sección 5.2.

Los dispositivos no lineales caen en las categorías de:

1. Dispositivos electrónicos de potencia
2. Dispositivos de arco
3. Dispositivos ferromagnéticos

Para dispositivos electrónicos de potencia las características de generación de armónicos a menudo pueden ser determinadas analíticamente, para transformadores y dispositivos de arco es necesario usar características típicas, a menos que esté disponible mejor información.

8.2 Cálculo de respuesta en frecuencia del sistema

Una vez que las características de las fuentes de armónicos son determinadas puede ser calculada la respuesta en frecuencia del sistema, los elementos del modelo usado para ejecutar los cálculos incluyen:

1. Impedancia equivalente de corto circuito del sistema
2. Bancos de capacitores
3. Características de líneas y cables en el sistema
4. Características de la carga

El análisis del sistema puede ser ejecutado usando cálculos relativamente simples para algunos circuitos industriales y sistemas de distribución simples, sin embargo, algunos sistemas requieren de simulación por computadora ya que con ella se puede representar al sistema a múltiples frecuencias fácilmente.

8.2.1 Cálculos simples

Los cálculos manuales están limitados a problemas que pueden ser simplificados a circuitos como el que muestra la figura 8.2, éste es adecuado para analizar muchos circuitos industriales y muchos circuitos de distribución donde los capacitores se aplican en la subestación.

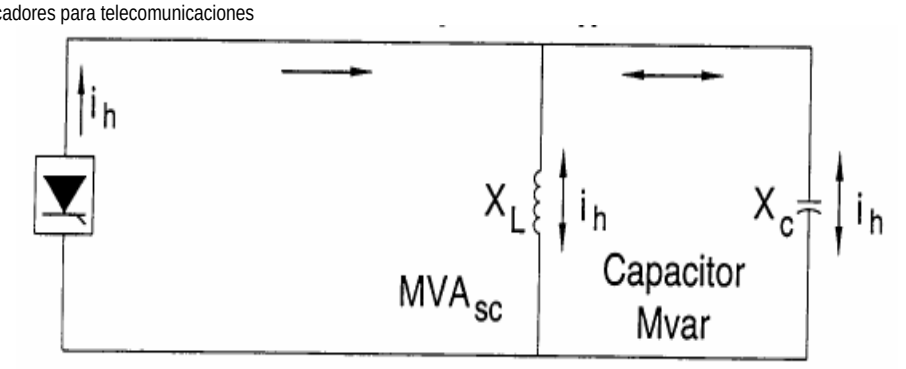


Figura 8.2
Circuito simple para cálculos manuales

La frecuencia de resonancia es el cálculo de mayor importancia en él, ecuación 8.1:

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{M\,\mathrm{var}_{cap}}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} \qquad \text{Ec. 8.1}$$

Donde

h_r	es la frecuencia de resonancia a un múltiplo de la frecuencia fundamental
MVA_{sc}	es el trabajo de corto circuito en el punto de estudio
$Mvar_{cap}$	es la relación del capacitor al tensión del sistema
X_c	es la reactancia capacitiva del banco de capacitores a la frecuencia fundamental
X_{sc}	es la reactancia de corto circuito a la subestación

Si la resonancia calculada está cercana a los armónicos característicos de la fuente, los problemas adicionales pueden ser evaluados. El siguiente paso es calcular la impedancia actual del sistema a cada armónico característico de la fuente siendo considerado, ecuación 8.2:

$$Z(\omega) = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 (LC) + j\omega RC} \qquad \text{Ec. 8.2}$$

$Z(\omega) = Z_h$	es la impedancia del sistema como función de la frecuencia $\omega = 2\pi f$
$R + j\omega L$	es la impedancia de la fuente como función de la frecuencia
$1 / j\omega C$	es la reactancia capacitiva como función de la frecuencia

Una vez que se obtiene una Z_h para cada armónico característico puede calcularse la magnitud de la tensión a cada armónico como, ecuación 8.3:

$$V_h = (I_h)(Z_h) \qquad \text{Ec. 8.3}$$

I_h	es la fuente de corriente en cada armónico característico
Z_h	es la impedanca del sistema a la frecuencia armónca característica

Pueden ser realizados cálculos adicionales usando tanto las corrientes como los tensiones armónicas individuales, los que son importantes para calcular la distorsión armónica total TDH y el producto IT de interferencia telefónica.

8.2.2 Simulaciones computarizadas

Cuando el sistema modelado es de mayor complicación al que aparece en la figura 8.2, las simulaciones computarizadas se pueden requerir, en una simulación pueden incluirse:

1. Exploración y análisis (scan) de respuestas del sistema a cada frecuencia.
2. Respuesta a múltiples fuentes de armónicos.
3. Soluciones de sistema desbalanceado multifase.

El método más comúnmente empleado en computadora es una solución de la matriz de admitancia a múltiples frecuencias, en él se modelan los dispositivos no lineales como fuentes de tensión o corriente ideales a las frecuencias armónicas, la dependencia de frecuencia de los elementos del sistema (transformadores, motores, líneas de transmisión, etc.) puede ser incluida en los cálculos aunque se asume que el sistema es lineal a cada frecuencia individual. Para muchos sistemas la matriz de admitancia es pobre permitiendo así que utilización de memoria y velocidad en la solución sean eficientes.

Otra aproximación para simulación de armónicos que ha sido utilizada se ha nombrado con el término flujo de carga armónica, una ecuación de flujo de carga es usada como opuesta a la solución directa de la matriz de admitancias, son incluidas las coacciones de potencia a la fuente y las fuentes de nodos, un método iterativo de Newton-Raphson para su solución, esa aproximación solo ha sido usada para sistemas balanceados, por lo general es mayormente aplicable a sistemas de transmisión más que para análisis de sistemas de distribución.

8.3 Directrices del modelo para análisis de armónicos

Son muy difíciles de desarrollar directrices generales para el modelado de sistemas para análisis de armónicos dado el número de parámetros que pueden afectar las características de la respuesta en frecuencia del sistema resulta valioso identificar las características de mayor importancia que afectan la misma.

8.3.1 Complejidad del modelo completo

Para sistemas industriales así como para sistemas de distribución generalmente es suficiente modelar el sistema en detalle solo en el lado de baja del transformador reductor para el sistema de transmisión, un equivalente de corto circuito en el lado de alta es suficiente porque la impedancia es dominada por el transformador mismo, en el lado de baja es importante incluir nodos y barras colectoras (buses) a todos los capacitores y cargas grandes, es usual ignorar la capacitancia de las líneas porque los bancos de capacitores dominan en el valor a bajas tensiones, sin embargo, la capacitancia de algunos cables forrados de longitudes largas puede ser importante, cuando se calcula el producto IT a altas frecuencias (por encima del 25to armónico) la capacitancia de las líneas resulta importante.

La existencia de un banco de capacitores cercano al primario del transformador reductor debe ser modelado desde el sistema de transmisión dado que la combinación de la reactancia del transformador en serie con el banco es como un filtro cuando es visto desde la fuente de armónicos en el lado del secundario del transformador.

Los sistemas de transmisión requieren de modelos más complejos que los sistemas de distribución para determinar con precisión las carcterísticas de la respuesta en frecuencia, es requerido representar con exactitud líneas de transmisión, cables, transformadores, bancos de capacitores, cargas y máquinas.

8.3.2 Modelo de sistema trifásico v.c. monfásico

Para muchos estudios armónicos un modelo con representación monofásica simple de secuencia positiva será suficiente, pero exceden esa regla los casos siguientes:

1. Interferencia telefónica es una afectación. Aquí la influencia de la corriente armónica residual en secuencia cero es importante, en tal caso las fuentes de armónicos desbalanceadas deben ser representadas para determinar con precisión las corrientes armónicas residuales.
2. Bancos de capacitores monofásicos. Los modelos monofásicos balanceados no son suficientes cuando hay bancos de capacitores monofásicos dentro del sistema, en tal caso es necesario realizar un modelo trifásico para determinar la respuesta del sistema.

3. Fuentes armónicas monofásicas o desbalanceadas. En tal caso el desbalance de las fuentes solamente puede ser representado en un modelo trifásico completo del sistema.
4. Fuentes de tensión armónico triplicadas. Es requerido un modelo trifásico completo para demostrar las altas impedancias al flujo de las fuentes de tensión armónico triplicadas.

8.3.3 Modelo de máquinas y motores

Las máquinas y motores son representados por sus reactancias subtransitorias, normalmente son utilizados promedios de las reactancias directas al eje y de cuadratura, los motores de inducción son representados por su impedancia a rotor bloqueado si las características subtransitorias son desconocidas, esas reactancias son multiplicadas por los ordenes de las frecuencias armónicas; es importante que las cargas grandes al motor sean modeladas con precisión.

8.3.4 Modelo de líneas y cables

Para bajas frecuencias y / o líneas cortas una simple impedancia en serie es una representación suficiente para las líneas, sin embargo, a menudo es importante incluir la capacitancia de derivación en la representación de cables y líneas cuando se ejecutan estudios en que son importantes frecuencias arriba del armónico 25to.

Para líneas de transmisión pueden ser empleados capacitancia distribuida y transposición (corección de línea larga) para representar correctamente las características de la línea, ver la figura 8.3, para modelos trifásicos se ejecuta de forma separada la corección de línea larga en los modos de propagación separada entonces es revertida en cantidades para fase es ejecutada corrección de línea larga en los modelos de propagación separadamente y entonces es reconvertida a cantidades de fase, esto es hecho por medio de un un análisis Eigen de vectores, para líneas balanceadas los modos pueden ser de componentes simétricos.

8.3.5 Modelos de trasformador

Tiene dos componentes concernientes:

1. Impedancia de dispersión

2. Impedancia de magnetización

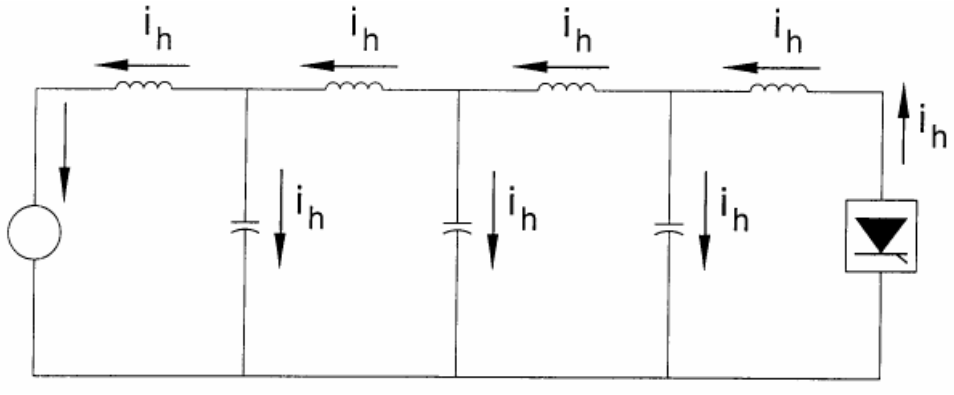


Figura 8.3
Circuito equivalente de una línea larga

Un modelo de impedancia concentrada es decir considerada en un solo punto aún cuando está presente en toda la línea generalmente es adecuado la para la impedancia de dispersión, sin embargo, es importante recordar que la componente resistiva de dicha impedancia no es constante sino que varía con la frecuencia, una aseveración conservadora utilizada para estudios armónicos de sistemas de distribución industriales es que la relación X/R es constante con la frecuencia y es igual a 10, para transmisión de potencia la relación típica X/R de transformadores es de entre 20 y 30, para sistemas de distribución entre 5 y 10.

Si el transformador no es una fuente significativa de armónicos la impedancia de magnetización puede ser despreciada, si la producción de armónicos del tranformador es significativa el afluente magnetomotriz puede ser modelado como una fuente de armónicos de corriente, para transformadores trifásicos las conecciones de los devanados son importantes para determinar el efecto de las componentes de secuencia cero del transformador, conexiones en delta aíslan esas corrientes de un nivel de tensión al otro.

8.3.6 Modelo de cargas

Los componentes importantes de carga en un estudio de armónicos un sistema son:

1. Transformador reductor
2. Componente resistiva
3. Componentes de motor

A altas frecuencias llega a ser importante el transformador reductor porque es una reactancia en serie con la carga, la componente resistiva provee amortiguamiento cuando la respuesta del sistema completo está cerca de una resonancia paralela (alta impedancia), las componentes de motor son importantes porque pueden cambiar ligeramente la resonancia del sistema, pues son una fuente cuya resonancia está en paralelo con la reactancia del sistema.

En general las cargas del sistema tienen un efecto mínimo en las características del sistema completo, a menos que el sistema esté cerca de la frecuencia de resonancia, cuando está muy cercana a ésa frecuencia, el efecto de la carga es para reducir la impedancia resonante de pico (amortiguamiento) o para cambiar la frecuencia resonante (inductancia de motor).

8.4 Interferencia telefónica

Son utilizadas dos ecuaciones:

8.4.1 Factor de influencia de tensión telefónico

El factor de influencia telefónica V_{TIF} es, ecuación 8.4:

$$V_{TIF} = \frac{\sqrt{\sum_{h-1}^{H} \left(T_h Z_h I_h\right)^2}}{V_1} \qquad \text{Ec. 8.4}$$

V_1 Tensión $_{RMS}$ fundamental línea-neutro
I_h corriente armónica en el sistema de potencia
Z_h impedancia del sistema de potencia al armónico de orden h
T_h factor de peso telefónico de interferencia (TIF)
H límite superior de armónicos

8.4.2 Producto IT

La otra ecuación 8.5 es utilizada frecuentemente corresponde al producto IT:

$$I \cdot T = \sqrt{\sum_{h=1}^{H} \left(I_h T_h\right)^2} \qquad \text{Ec. 8.5}$$

8.5 Cálculos de escalonamiento o ranuramiento de la línea

La figura 8.4 muestra un puente convertidor trifásico completo típico, los thrystores operan en pares para convertir tensión de ac a dc mediante conmutación de la carga por medio de varios pares de thrystores seis veces por ciclo, durante el proceso un breve corto circuito produce una ranura o muesca en la forma de onda de línea a línea.

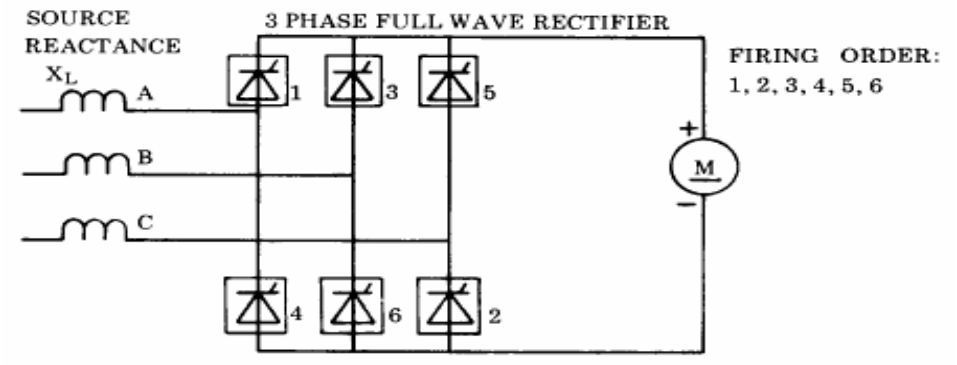


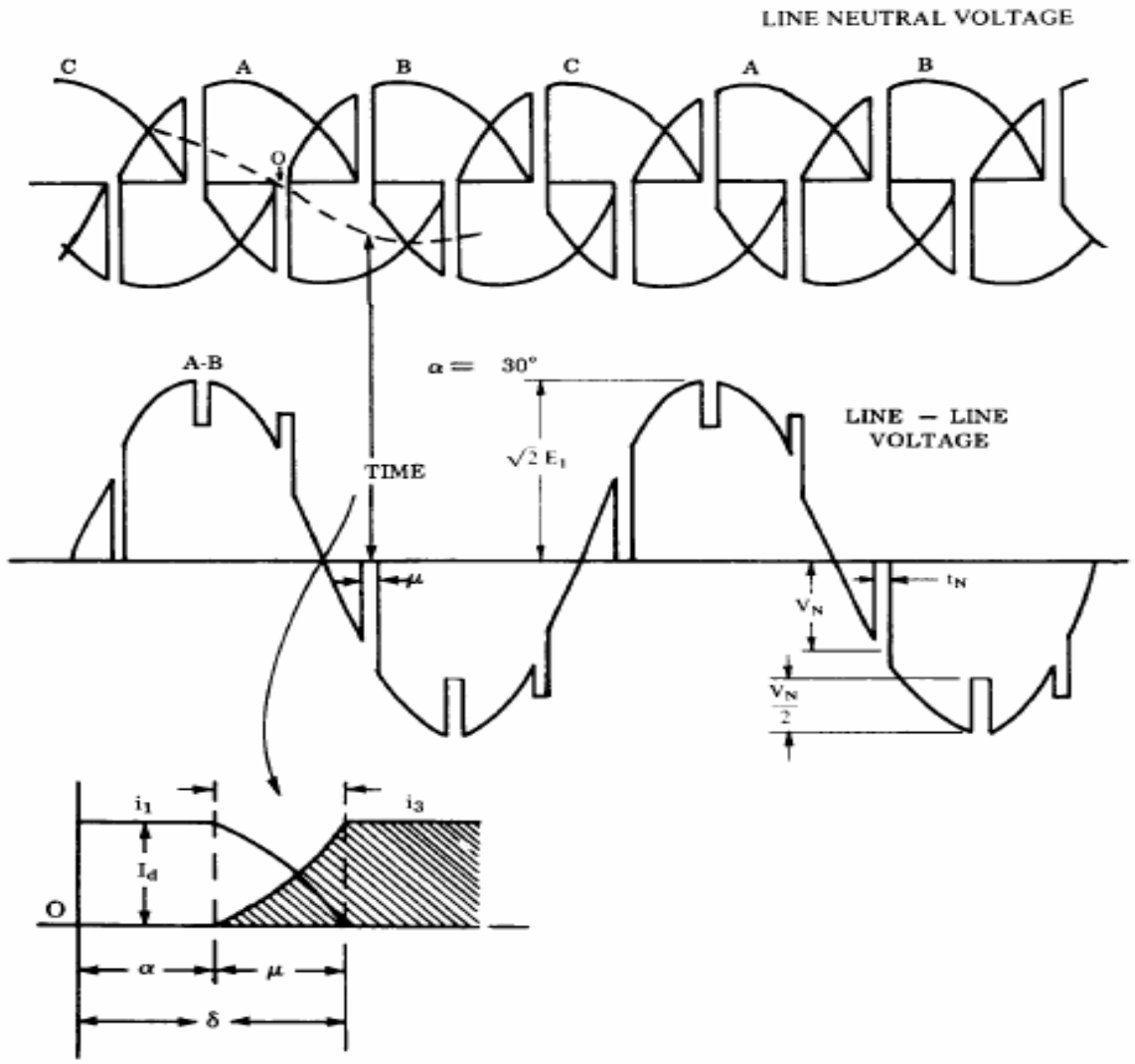
Figura 8.4
Convertidor trifásico de onda completa

La corriente ha estado fluyendo desde la fase A a través del thrystor 1, cuando el thrystor 3 se dispara hay que ver las figuras 8.5(a), 8.5(b), y 8.5(c);al tiempo t de 30° en la tensión base línea-línea, la corriente comienza a transferir de la fase A a la fase B, la reactancia de la fuente no permite la transferencia instantánea, así el tiempo de conmutación (ángulo μ) requerido llega a ser el ancho de la ranura, μ.

La ranura resultante es mostrada en base línea-neutro en la figura 8.5(a) y en base línea-línea en la figura 8.5(b), ésta última ilustra claramente la acción de corte cuando ambos thrystores 1 y 3 están conduciendo simultáneamente, las otras ranuras reflejan la acción del thrystor en otras fases de la circuitería de ac.

8.5.1 Cálculo del área de la ranura

El área de ranura es dependiente de los volt-segundos absorbidos en los circuitos desde la fuente al punto del circuito que es de interés, el área de ranura es un indicador (índice) del efecto que el convertidor estático de potencia tendrá sobre otras cargas. El área de ranura es calculada mediante las siguientes ecuaciones 8.6, 8.7 y 8.8 referidas a la figura 8.6:



NOTE: The two other phases are similar to A–B. The width of the notches is exaggerated and ringing is omitted for clarity.

Figura 8.5
Ranuras de tensión, (tensión notches)

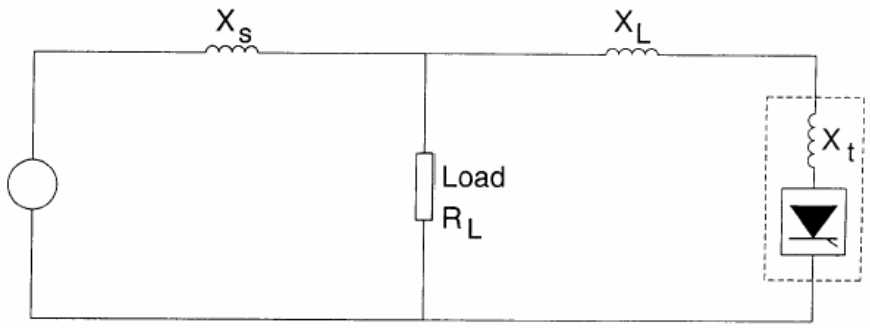


Figura 8.6
Diagrama de impedancias

$$V_N = \frac{L_L e}{L_L + L_t + L_s}$$ Ec. 8.6

$$t_N = \frac{2(L_L + L_t + L_s)I_d}{e}$$ Ec. 8.7

$$A_N = V_N t_N$$ Ec. 8.8

V_N profundidad de ranura en volts línea-línea de la ranura más profunda
t_N ancho de ranura en μseg
I_d corriente del convertidor en amperes
e Tensión instantáneo línea-línea justamente previa a la ranura en las líneas a ser conmutadas
L inductancia por fase en Henrys
A_N area de ranura en volts-μseg

también, ecuación 8.9.

$$e = \sqrt{2E_L}$$ Ec. 8.9

Combinando ambas, queda la ecuación 8.10:

$$A_N = 2I_d L_L$$ Ec. 8.10

8.5.2 Cálculos de inductancia de la fuente, inductancia del transformador (rango menor de 600V)

Transformadores secos utilizados en convertidores a éste tensión aproximadamente tienen igual reactancia que resistencia cuando se tienen en consideración las características de conmutación la ecuación siguiente puede aplicarse:

$$inducttransform = \frac{X}{(\sqrt{2})(2\pi f)} \cdot \frac{E_L}{\sqrt{3}I_1} \text{ Henrys}$$ Ec. 8.11

X inductancia del transformador en por unidad
E_L Tensión relacionado línea-línea
I_1 corriente ac relacionada a carga completa
f frecuencia de la línea

Lo anterior asume que $X_L = R_L$

8.5.3 Cálculo de inductancia de la línea

Típicamente la inductancia por fase de la línea en una línea trifásica puede ser considerada como de 0.3 μH/ft de línea o cerca de 1 μH/m.

8.6 Distorsión armónica total

La distorsión armónica total TDH se usa para definir el efecto de los armónicos en la tensión del sistema de potencia, es usado en sistemas de baja tensión , tensión medio y alta tensión, éste es expresado como un porcentaje de la fundamental y está definida según las ecuaciones 8.12 y 8.13 como:

$$TDH = \sqrt{\frac{sumadecuadradosdeamplitudesdtodoslosvoltajesarmónics}{cuadradodeamplituddelvoltajedelafundamental} \cdot 100\%}$$ Ec. 8.12

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^{\,2}}}{V_1}$$ Ec. 8.13

ver la sección 5.2 para armónicos específicos generados por diferentes tipos de cargas

8.6.1 Relación entre distorsión armónica total y el ranuramiento de la línea

Ver las figuras 8.5 y 8.7, para frecuencia f_1 = 60Hz y E_L = 460V, ecuaciones 8.14 a 8.20

$$V_h = \sqrt{\sum_{h=5}^{\infty}\left(V_h^{\,2}\right)} = \sqrt{\frac{2^{*}V_N^{\,2}t_N + 4^{*}\left(\frac{V_N}{2}\right)^2 t_N}{\frac{1}{f_1}}}$$ Ec. 8.14

* el 2 refiere a dos ranuras profundas y el 4 a cuatro

$$VH = \sqrt{3V_N^{\,2}t_N f_1}$$ Ec. 8.15

$$\rho = \frac{L_L + L_t + L_s}{L_L}$$ Ec. 8.16

$$V_{NMAX} = \frac{\sqrt{2}E_1}{\rho}$$ Ec. 8.17

$$A_N = V_N t_N$$ Ec. 8.18

$$TDH_{MAX} = 100\sqrt{\frac{3\sqrt{2}\cdot 10^{-6} A_N f_1}{\rho E_L}}\%$$ Ec. 8.19

donde

$$TDH_{MAX} = 0.074\sqrt{\frac{A_N}{\rho}}\% \qquad \text{Ec. 8.20}$$

ρ	razón de la inductancia total respecto de la inductancia común del sistema
f_1	frecuencia fundamental del sistema de potencia
V_H	suma de tensiones armónicas $_{RMS}$
V_N	profundidad de ranura en volts línea-línea de la ranura más profunda
t_N	ancho de ranura en µseg
I_d	corriente del convertidor en amperes
e	Tensión instantáneo línea-línea justo antes de la ranura en las líneas a ser conmutadas
L	inductancia por fase en Henrios
A_N	area de ranura en volts-µseg

8.7 Cálculos de sistema (baja tensión , debajo de 1000V)

Una distribución de planta típica se muestra en la figura 8.7(a) y un diagrama de impedancia 8.7(b), el sistema puede ser considerado como un circuito RLC, entonces el rectificador puede ser considerado como un corto circuito durante la conmutación, es reemplazado como un interruptor de cuchilla en el circuito amplificador, la impedancia equivalente del transformador debe ser incluida en el esquema simplificado.

8.7.1 Factor de amortiguamiento del sistema

En muchos sistemas el transformador del rectificador más la impedancia de línea son tan grandes como la impedancia del transformador de distribución de manera que el transformador de distribución puede ser despreciado en los cálculos del factor de amortiguamiento a frecuencia natural.

En un circuito resonante en serie se pueden emplear las siguientes ecuaciones 8.21 a 8.23:

$$factoramortiguamiento = \frac{R}{2}\cdot\sqrt{\frac{C}{L}} \qquad \text{Ec. 8.21}$$

$$frecuencianatural, \omega_N = \sqrt{\frac{1}{LC}}\ {}^{rad}\!/_{s} \qquad \text{Ec. 8.22}$$

$$frecuencianatural,\ f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}^{Hz} \qquad \text{Ec. 8.23}$$

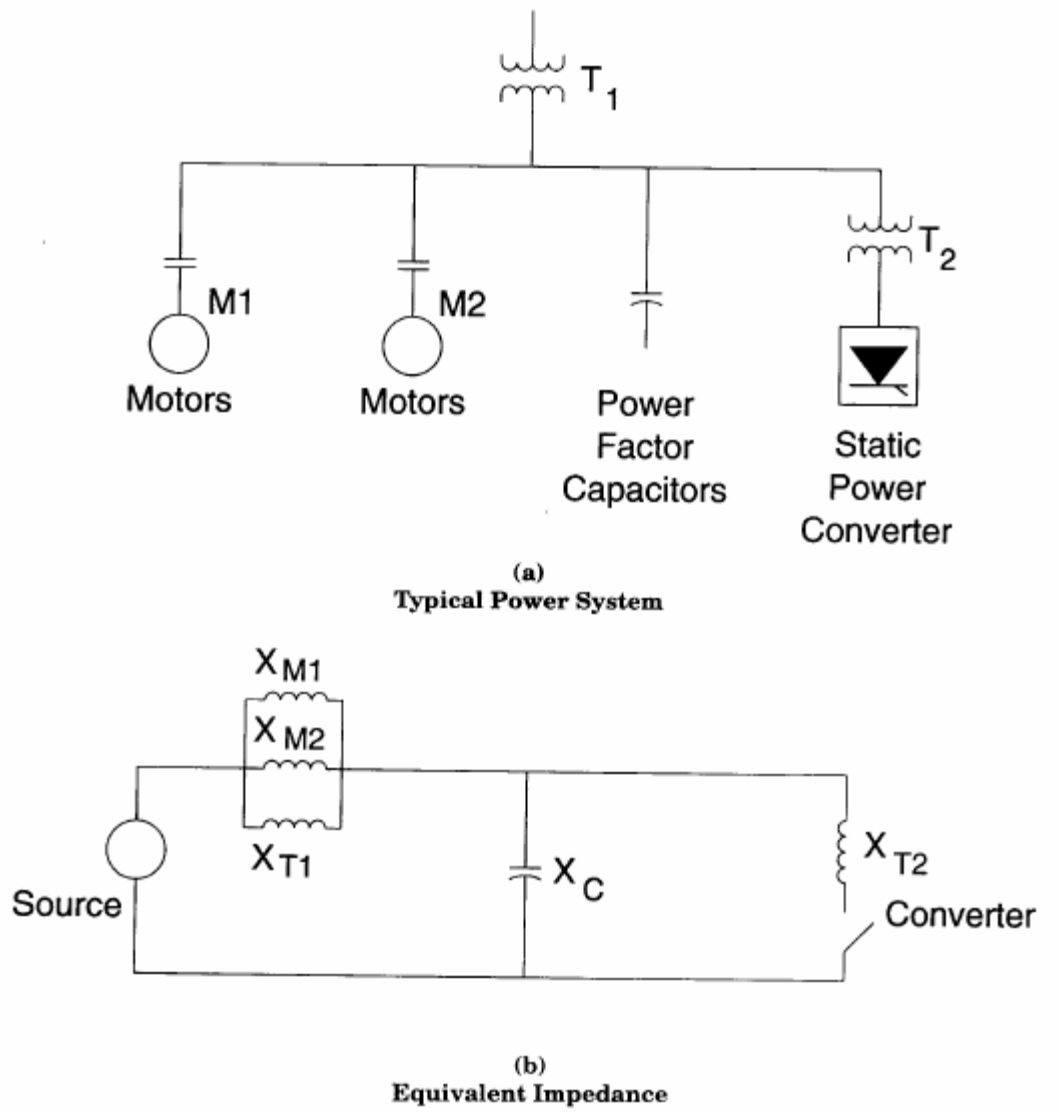


Figura 8.7
Sistema de potencia típico y su diagrama de impedancias

Para equipo de baja tensión , el factor de amortiguamiento en el sistema podría ser mayor que 0.5 cuando la frecuencia natural es menor de 2100 Hz (35to armónico de 60Hz), a frecuencias mayores del mismo se incrementan las pérdidas en el sistema tal como en el efecto Kelvin de tensión superficial proveyendo amortiguamiento adicional.

8.8 Cálculo de mejoramiento del desplazamiento del factor de potencia

Debido a que la potencia reactiva varía en un controlador de motor por thrystores, dependiendo de la velocidad de operación y del torque, los requerimientos pueden

incrementarse más del 100%, desde la mayor velocidad descendiendo hasta baja velocidad, no puede ser aplicado al controlador un solo valor de capacitancia con el objeto de mantener la potencia reactiva en un valor constante (o cercano a constante) a través de su rango de operación. (Convertidores PWM y con diodos rectificadores son la excepción).

Sin embargo un grupo de tal tipo de controladores puede reflejar un requerimiento más uniforme de kilovares, en un wattmetro y un varmetro los datos obtenidos sobre un periodo de tiempo representativo podrían establecer la viabildad de la aplicación de capacitores no conmutados para el mejoramiento del desplazamiento del factor de potencia. En muchos casos la compañía abastecedora de energía factura de acuerdo con el factor de desplazamiento del sistema, lo que proveerá información sobre el costeo de utilizar capacitores de potencia, así que debe ser evaluado cada caso particular relacionando la potencia reactiva.

Puede ser utilizado el conocimiento detallado del modo de operación de cada controlador individual para establecer un valor objetivo de kVARes a adicionar para compensación de la potencia reactiva. Cada valor de potencia real y reactiva a controlar es derivado de datos de carga y velocidad tomando en cuenta variaciones básicas en el modo de operación, sumando esos valores de kW y kVAR a lo largo con datos similares para otras cargas proveeran una base completa sobre la dimensión de la potencia reactiva requerida como suplemento, aún cuando los controladores fueran utilizados para otra aplicación diferente del control de motores deben ser requeridas consideraciones similares de carga en cada caso.

Ilustramos a continuación un ejemplo para ver la aplicación de ésta aproximación basados en una situación particular, en la lista se consolida y resume una situación de plantemiento de planta.

	kW	PF	Kva.
Motores de inducción			
	1200	0.8	900
	900	0.7	918
Controladores de Thystores			
	600	0.7	612
	1100	0.5	1902
Otras cargas	1300	0.9	630
Total:	5100	0.716	4965

La figura 8.8 ilustra un desplazamiento bajo del factor de potencia 0.7165 asociado con ésa carga y muestra que es necesario adicionar 3289 kVAR para el mejoramiento del desplazamiento del factor de potencia. La aplicación de la cantidad de compensación de potencia reactiva dependerá de la parte económica respecto a la utilidad que proporcionará a la compañía usuaria. Una relación de estructura dada puede hacer que un factor unitario de potencia sea económico.

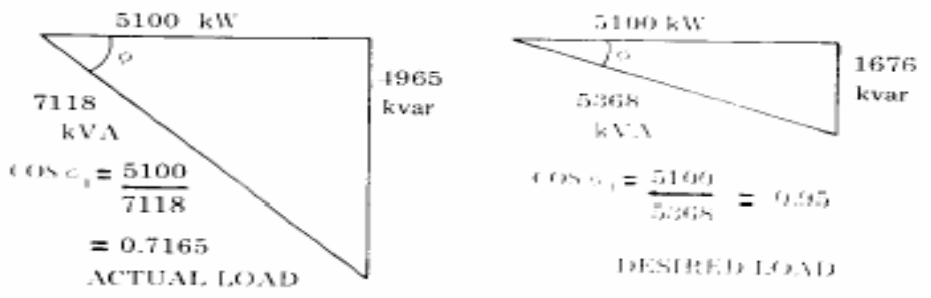


Figura 8.8
Triángulo de factor de potencia para su mejoramiento

Un banco de capacitores de 3300 kVAR es fabricado fácilmente a partir de unidades estándares, asumiendo que tal banco es aplicado a una planta con una barra colectora (bus) de suministro de 4160 V si la capacidad de corto circuito es de aproximadamente 80 MVA ocurrirá resonancia del 5to armónico. Según ecuación 8.24.

$$H_{res} = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{M\,\mathrm{var}_{cap}}} = \sqrt{\frac{80}{3.3}} = 4.92 \qquad \text{Ec. 8.24}$$

Similarmente, ocurrirá resonancia del 7mo armónico en aproximadamente 150 MVA. Según ecuación 8.25

$$H_{res} = \sqrt{\frac{150}{3.3}} = 6.74 \qquad \text{Ec. 8.25}$$

H_{res} armónico resonante

Dependiendo del nivel de corto circuito sobre el sistema, puede ser requerido un inductor sintonizado en cada fase, si es requerido podría ser seleccionado para supresión del 5to armónico, cambiando la dimensión del capacitor también puede ser controlado el punto de resonancia con algo de sacrificio (pequeño) en el desplazamiento del factor de potencia. El inductor sintonizado es dimensionado tomando en consideración el banco de

capacitores actual (medido) el cual puede estar 5% arriba del dato de placa, La reactancia del capacitor X_{cap} a frecuencia fundamental está dada por las ecuaciones 8.26 y 8.27:

$$X_{cap} = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{4.16^2}{(3.3)(1.05)} = 4.99\Omega \qquad \text{Ec. 8.26}$$

$$X_r = \frac{X_c}{h^2} = \frac{4.99}{25} = 0.20\Omega \qquad \text{Ec. 8.27}$$

donde
x_r = reactancia del inductor de sintonía a frecuencia fundamental
1.05 = tolerancia de los capacitores

Así el inductor sintonizado podría tener 0.20 W de reactancia por fase a frecuencia fundamental y una capacidad de corriente portadora al menos igual a la requerida por el capacitor.

El cuestionamiento es que a veces aumenta el efecto que el banco de capacitores tiene en la respuesta del convertidor, no se esperan efectos adversos en la respuesta en el dominio del tiempo tan grandes como cuando la resonancia armónica no esta presente para un armónico característico, un banco de capacitores fortalece la respuesta transitoria del sistema de potencia de alterna el cual podría teóricamente aumentar la respuesta en el dominio del tiempo.

Capítulo 9 Medición e instrumentación de armónicos

9 Medición en instrumentación de armónicos

9 Medición e instrumentación de armónicos

9.1 General

La medición de tensiones y corrientes armónicas es esencial para un sistema de distribución de energía eléctrica, las siguientes son razones de importancia resaltante para llevar a cabo su medición.

1. Monitoreo, verificación y registro de los valores existentes, comparación de los mismos contra una recomendación o norma, es decir, que los valores sean admisibles.
2. Prueba de los equipos que generan armónicos.
3. Diagnóstico y prevención de problemas o situaciones en las que el funcionamiento de los equipos sea inaceptable para el sistema de distribución o para el usuario.
4. Observación de niveles existentes de trasfondo y rastreables, tendencias en tiempo, tensiones y corrientes armónicas (patrones diarios, mensuales y temporales). Monitoreo, registro y comparación.
5. Estudios de medición para simulación o verificación que incluya flujo de cargas armónicas.
6. Mediciones de tensiones y corrientes armónicas con su respectivo ángulo de fase, pueden ser hechas con o sin parte de las cargas no lineales conectadas y pueden ayudar a determinar el punto de impedancia de control de armónicos en una localidad dada.

Las técnicas usadas para medición de armónicos difieren de aquellas utilizadas para medición de sistemas de potencia ordinarios, el ancho de banda de frecuencia de las mediciones de tensión, corriente y potencia ordinarios pueden ser perfectos con atención a una banda estrecha y reducida de frecuencias cerca de la frecuencia de distribución, sustancialmente amplios anchos de banda arriba de los 3 kHz son requeridos para el estudio de los armónicos del sistema de potencia.

9.2 Equipo básico utilizado para el análisis de tensiones y corrientes no senoidales

9.2.1 Osciloscopio

El despliegue de la forma de onda en un osciloscopio da información cualitativa inmediata tanto en el grado como en el tipo de distorsión, en ocasiones, casos de resonancia son identificados a través de la distorsión visible que se encuentra presente en las formas de onda de tensión y corriente.

9.2.2 Analizador de espectros

El analizador de espectros despliega la señal de distribución como función de la frecuencia, un rango de frecuencia es barrido y analizado (scanned) y todos los componentes armónicos e interarmónicos de la señal analizada son desplegados, ese formato puede ser grabado en una carta registro.

9.2.3 Analizador de onda o analizador de armónicos

Ese instrumento mide la amplitud y dependiendo su complejidad el ángulo de fase de funciones periódicas, esos instrumentos proveen el espectro de línea de la señal observada, la salida puede ser grabada y / o monitoreada con aparatos de medición analógica.

9.2.4 Analizadores de distorsión

Ese tipo de instrumentos entregan e indican la distorsión armónica total TDH directamente.

9.2.5 Equipo de medición digital de armónicos

El análisis digital puede ser ejecutado en base a dos técnicas:

1. Por medio de un filtro digital. Ese método es similar al filtrado analógico, los analizadores digitales de doble canal incluyen filtrado digital, en el ajuste para una medición en particular, el rango de frecuencia a ser medido ajusta los filtros digitales

para ese rango, el ancho de banda es variado para optimizar la captura de armónicos pequeños en la presencia de una fundamental muy grande.

2. Técnica de transformada rápida de Fourier. Éste es un método de tiempo real, métodos muy rápidos de ejecución, un análisis de espectro que permite la evaluación de gran número de funciones, la conversión analógica-digital multicanal así como micro y minicomputadoras son utilizadas para la adquisición de datos.

Cuando la forma de onda es grabada con ancho de banda adecuado usando ya sea técnicas analógicas o digitales en sitio, el cálculo de componentes armónicos por medio de la Transformada rápida de Fourier FFT, la conversión a unidades de ingeniería, los cálculos estadísticos y la impresión así como el trazado de los resultados puede realizarse fuera de sitio en el laboratorio utilizando las facilidades provistas en la computadora con periféricos e interfases.

9.3 Requerimientos para instrumentar la respuesta

Para las mediciones con exactitud de armónicos deben ser conocidos los siguientes requerimientos de los equipos, secciones 9.3.1 a 9.3.3.

9.3.1 Exactitud o presición

El instrumento debe ejecutar mediciones de una componente armónica en estado estable con un error compatible con los límites permisibles, es razonable utilizar un instrumento con una incertidumbre no mayor a 5% de los límites permisibles. Por ejemplo, asumamos que tenemos un sistema trifásico de 480V con 11ro armónico, V_{11} es menor de 1.94V, esto indica que el instrumento a utilizar puede tener una incertidumbre de menos de $\pm(0.05)(1.94) = \pm 0.097$ V.

9.3.2 Seleccionabilidad (Selectibility)

La seleccionabilidad de un instrumento es un indicador de su habilidad para separar las componentes armónicas de las diferentes frecuencias, una vía práctica para garantizar una buena selectibilidad es definir los requerimientos para una atenuación mínima de la frecuencia inyectada, mientras el instrumento está sintonizado a frecuencia f_h = 60 Hz. La tabla 9.1 da una atenuación mínima requierida.

Injected Frequency (Hz)	Frequency-Domain Instrument	Time-Domain Instrument
60	0	0
30	50	60
120 to 720	30	50
720 to 1200	20	40
1200 to 2400	15	35

Tabla 9.1
Atenuación máxima requerida (dB)

En muchas aplicaciones la corriente fundamental puede ser muy grande comparada con las corrientes armónicas las cuales pueden ser suficientemente significativas para causar perturbaciones serias, como sucede en las perturbaciones telefónicas, para la completa observación de armónicos en tales situaciones es importante el rango dinámico requerido, casi todos los instrumentos de medición de armónicos pueden medir un mínimo de 60 dB (0.1% de la fundamental), instrumentos de mayor costo logran 90 dB (0.00316%).

9.3.3 Promediamiento o fotografías instantáneas (averaging or snapshot)

Si los armónicos medidos varían en el tiempo, es necesario tener libre de obstrucciones la rapidez de los componentes de fluctuación sobre un periodo de tiempo, llegan a ser importantes dos factores el ancho de banda y la respuesta dinámica.

9.3.3.1 Respuesta dinámica

Si por ejemplo es deseable un promedio sobre un periodo de 3 entonces la respuesta del instrumento de medición a la salida debe ser idéntico a un filtro paso bajas de primer orden con una constante de tiempo de 1.5 ± 0.15 s.

9.3.3.2 Ancho de banda

El ancho de banda del instrumento afectará fuertemente la lectura especialmente cuando los armónicos son fluctuantes, es recomendado que sean usados instrumentos con un ancho de banda constante para un rango completo de frecuencias a ser estudiado. El ancho de banda puede ser de 3 ± 0.5 Hz en los puntos de -3 dB con atenuación máxima de 40 dBes una frecuencia de f_h + 15 Hz, en situaciones en que estén presentes interarmónicos y transitorios un ancho de banda grande causarán errores positivos grandes.

El concepto de variaciones libres de obstrucciones sobre un periodo de tiempo debe ser aproximado con un entendimiento claro del ciclo de carga de las cargas perturbadoras, por ejemplo, con una pala de pozo de mina de apertura eléctrica controlada por SCR los armónicos solo aparecen durante la pala llena en la posición más alta o al escabar en las posiciones de inicio o fin de la secuencia de operación, si hay una prueba para promediar tal evento armónico transitorio sobre un tiempo largo el resultado podría perder la información de armónicos, en un caso como el de la pala la habilidad para seleccionar una simple fotografía instantánea (snapshoot) de la tensión y la corriente durante la porción (espacio de tiempo) de la posición más alta la secuencia de la pala es esencial, las fotografías instantáneas repetidas de los armónicos durante la secuencia en la posición más alta producirá un indicador de los armónicos característicos del controlador de la pala.

La definición de los armónicos está basada en la periodicidad, por tanto, donde las cargas monitoreadas contengan transitorios es necesario visualizar una ventana en uno o más ciclos como una parte de una onda de estado estable periódica, el resultado de FFT puede ser considerado como un valor promedio de armónicos. Donde los armónicos no son pronunciados el promedio siempre es muy útil, un analizador digital de señal de doble canal tiene la ventaja de permitir la selección de un tiempo promedio variable o número de ciclos de manera que el usuario puede ajustar el promedio como sea necesario.

9.4 Presentación de datos de armónicos

Los datos medidos pueden ser presentados en dos formas en forma de tabla como en la tabla 9.2 o en forma gráfica. Como se muestra la salida del analizador en la figura 9.1 en dominio del tiempo. El despliegue del espectro de la figura 9.2 en el dominio de la frecuencia, dado en escala lineal, puede ser utilizada una escala logarítmica que revela las componentes armónicas bajo un 5% de distorsión más efectivamente.

Frequency (Hz)	60	180	420	540	660	780	1020	1140
Amplitude (A)	305	10.3	42.4	2.0	21.7	9.5	9.2	4.6

Tabla 9.2
Espectro de corriente armónica en forma de tabla

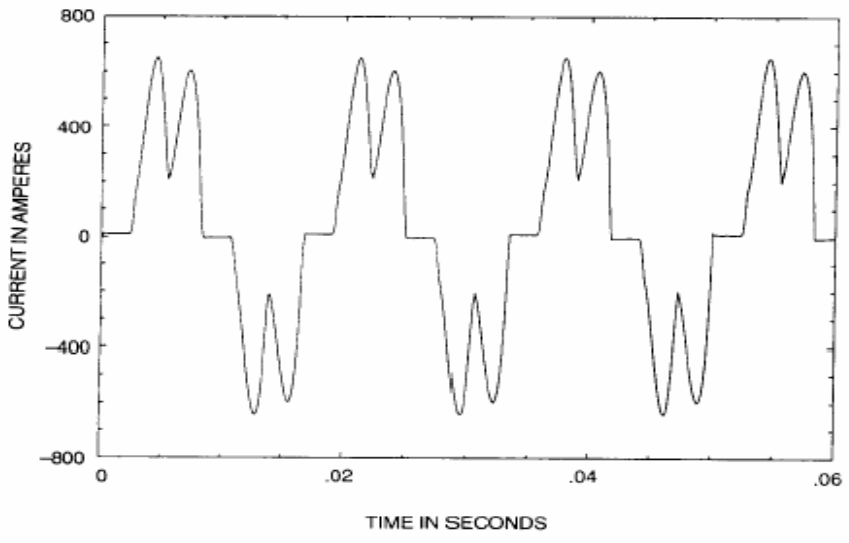


Figura 9.1
Analizador de espectros, espectro en el dominio del tiempo

Armónicos variables en el tiempo pueden ser presentados convenientemente como función del tiempo, ver la figura 9.2, las estadísticas dependientes del tiempo pueden ser definidas cuando los armónicos están fluctuando, si el periodo de adquisición de datos T_D es dividido en m intervalos, la observación total del tiempo será $mT = T_D$.

El valor de corriente principal par cada subintervalo es, ecuación 9.1:

$$\sum_{1}^{k} \frac{I_{kh}}{k} \qquad \text{Ec. 9.1}$$

donde durante el subintervalo T, fueron tomadas k mediciones
I_{kh} muestreo de la corriente armónica

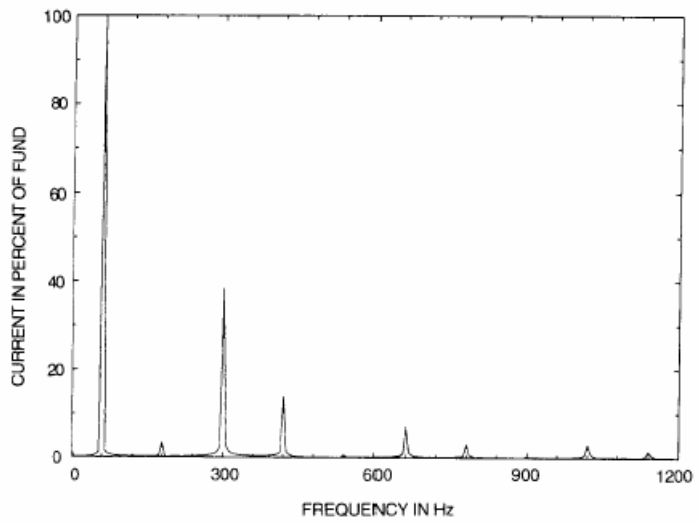


Figura 9.2
Analizador de Espectros, espectro en el dominio de la frecuencia

El valor principal cuadrado es, ecuación 9.2:

$$\sum_{1}^{k} \frac{I_{kh}^{2}}{k} \qquad \text{Ec. 9.2}$$

Los valores anteriores nos habilitan para computar la desviación estándar, ecuación 9.3:

$$I_h = \sqrt{I^2{}_{h\,\max} - I^2{}_{h\,\min}} \qquad \text{Ec. 9.3}$$

Los valores máximo y mínimo para cada subintervalo son parte del programa de adquisición de datos:

I_{hmax} máxima I_h sobre k mediciones
I_{hmin} mínima I_h sobre k mediciones

Distribuciones probabilísticas conocidas como histogramas, ver la figura 9.3, son gráficas de barras con repesentación del peso del evento (frecuencia de ocurrencia o importancia). Dicha información puede ser desplegada en forma conveniente de distribución inversa, ver la figura 9.4, dicha forma llega a ser una herramienta importante en la evaluación del efecto de los armónicos en los dispositivos o equipos como transformadores, motores o capacitores, etc.

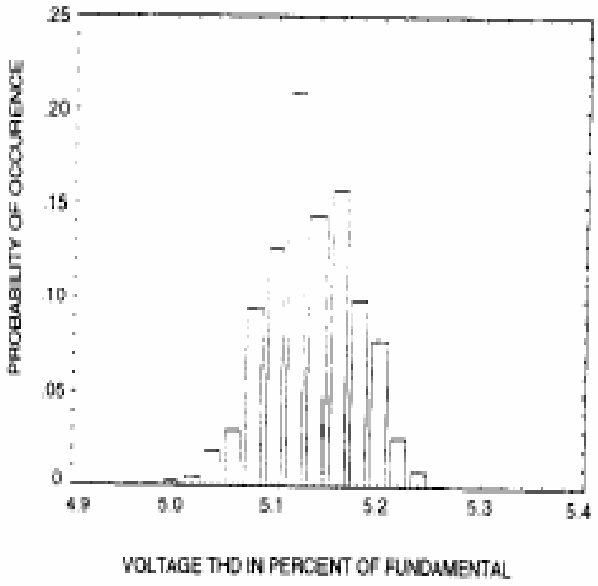


Figura 9.3
Histograma de armónicos de tensión TDH

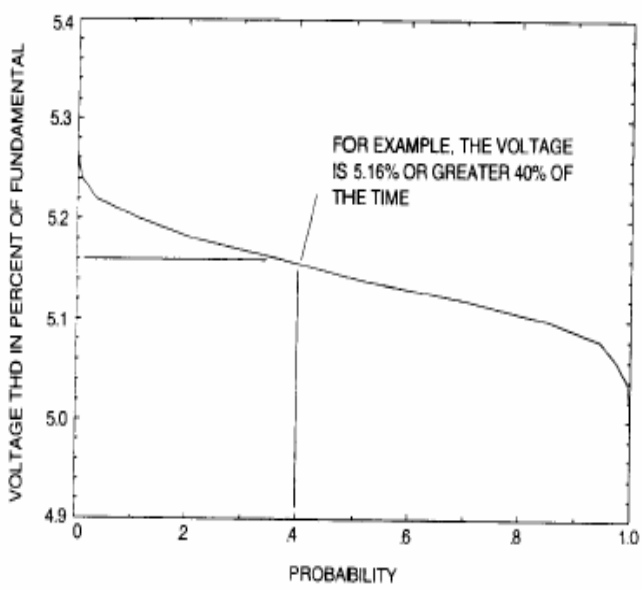


Figura 9.4
Curva de distribución de armónicos de tensión TDH

9.5 Transductores para medición de armónicos

9.5.1 Medición de corriente

9.5.1.1 Transformadores de corriente

Para medición de armónicos de corriente en un rango de frecuencia hasta 10 kHz, los transformadores normales de corriente que se utilizan para agregar dispositivos de conmutación en un sistema de potencia (motor, estación o red) medición y disparo de relevadores tienen exactitudes no mayores de 3%, Si el CT burden (la cantidad de potencia extraida del circuito conectado a las terminales secundarias de un transformador de instrumentación en VAs) es inductivo habrá un pequeño defasamiento en la corriente, el efecto Hall o los transformadores sujetadores están disponibles para sujetar alrededor de los conductores del transformador de corriente secundario para dar una señal de salida que pueda ser alimentada directamente en un instrumento.

Los conductores blindados como los cables coaxiales entregan mejores resultados, se realizan en ellos procedimientos de aterrizamiento y protección para evitar picos de tensiones parásitas. El cable coaxial es utilizado en distancias cortas, si se requiere de realizar mediciones a varios cientos de metros o si el sensor está cercano a alta tensión, es muy útil el empleo de convertidores de tensión a frecuencia para sensado, fibra óptica para su transmisión y retransformación de frecuencia a tensión en la recepción para evitar falsos picos de la señal y proporciona una barrera de seguridad.

9.5.1.2 Bobina exploradora

El campo magnético en la proximidad de un conductor o devanado porta información de los componentes de corriente que genera el campo, la amplitud de la tensión armónico inducido en una bobina exploradora, ver la figura 9.5, es proporcional a la amplitud del campo magnético armónico perpendicular para la superficie del devanado y a la frecuencia de los armónicos.

En tales mediciones el campo magnético medido puede aumentar con la contribución de más de una fuente, el campo magnético es inversamente proporcional a la distancia a la fuente. Donde es posible localizar la bobina exploradora a una distancia pequeña, d, del conductor, mientras otros conductores son localizados a distancias mayores de 20 d, los valores medidos en los conductores seleccionados no son alterados sustancialmente por los campos de otros conductores.

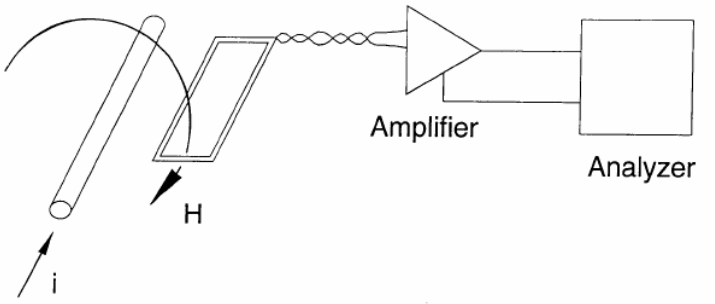


Figura 9.5
Esquema de una bobina exploradora

9.5.1.3 Devanados de Rogowski o bobinas de Maxwell

Éste tipo de dispositivos son devanados que están rodeados de árboles o ejes de plástico flexible de manera que pueden ser utilizados como dispositivos de sujeción. No tienen núcleo metálico de forma que son evitados los problemas de saturación del núcleo en la presencia de corrientes alternas muy altas tales como de entre 60 y hasta 100 kA o corrientes de directa.

9.5.2 Medición de tensión

En sistemas de baja tensión el analizador debe estar conectado directamente a las terminales donde deben ser determinadas las componentes de tensión, en sistemas de tensión alto y medios de atenuación deben ser utilizadas como se describe a continuación:

9.5.2.1 Transformadores magnéticos de tensión

Transformadores magnéticos de tensión que son de mayor disposición (más fáciles de encontrar) son diseñados para operar a frecuencia fundamental, frecuencia de resonancia armónica entre las espiras de la inductancia y las capacitancias pueden causar errores de fase y razón de transformación grande. La figura 9.6 presenta variaciones típicas de razón de transformación, para armónicos de frecuencias menores de 5 kHz la exactitud de los transformadores más potenciales está dentro de 3% lo cual es satisfactorio.

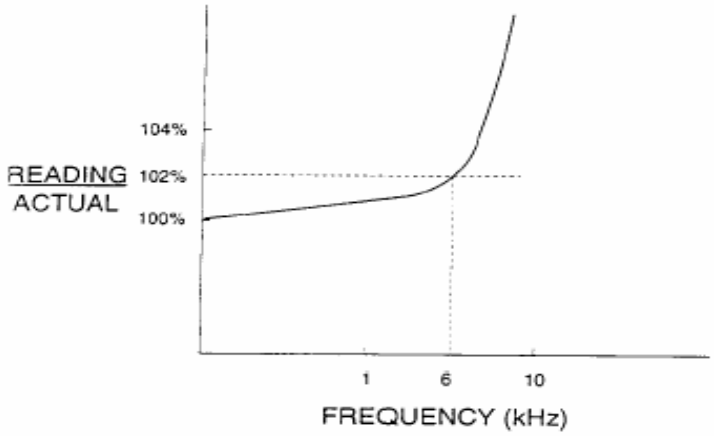


Figura 9.6
Exactitud en un transformador de potencial

9.5.2.2 Transformadores capacitivos de tensión

No pueden ser utilizados transformadores capacitivos de tensión para mediciones de armónicos pues típicamente los picos de resonancia de frecuencias menores aparecen a frecuencias menores de 200 Hz.

9.5.2.3 Divisores capacitivos de tensión

Los divisores capacitivos de tensión son fáciles de construir, ver la figura 9.7, en subestaciones de alta tensión aisladores de boquilla o cojinete o forro que son equipados con con una derivación (tap) capacitivo proveen un medio conveniente de las componentes de tensión medido, la alta impedancia de los amplificadores de instrumentación debe ser incluida en dicha instrumentación, para mejores resultados la entrada del amplificador puede ser operada con batería o podría utilizar una fuente aislada y protección adecuada. Los conductores desde los capacitores de baja tensión al amplificador de entrada pueden ser tan cortos como sea posible, en general conductores cortos desde el amplificador de entrada hacia el analizador reducirán grandemente el error de ángulo cuando se miden los ángulos de fase, Dichos dispositivos tienen un límite en carga que pueden suministrar sin saturación, por ello el requerimiento del amplificador de alta impedancia.

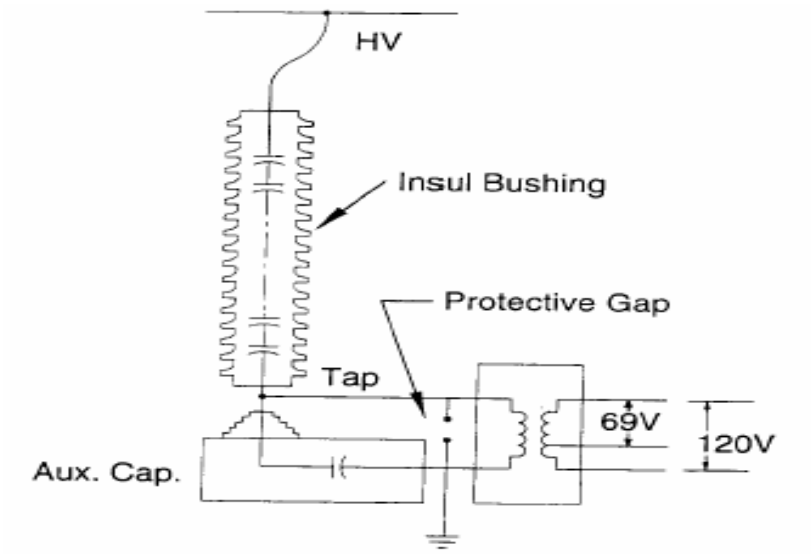


Figura 9.7
Divisor capacitivo de tensión

Capítulo 10 Directrices recomendadas para efectos prácticos y aplicaciones

10.1 General

Los factores que definen la calidad del servicio eléctrico incluyen la distorsión armónica adicionalmente a factores más familiares como protección a un incremento grande en corriente o tensión en un circuito eléctrico (surge), continuidad de servicio, regulación de tensión y parpadeo (centelleo o flicker), ésta parte establece directrices, recomendaciones para máxima distorsión de tensión en el punto de acoplamiento común (PCC point of common coupling) de cada consumidor de energía.

Los siguientes pasos pueden ser tomados en cuenta si son excedidos los límites mostrados (recomendados).

1. Ejecutar mediciones de armónicos en puntos seleccionados dentro del sistema de distribución, incluyendo el punto de acoplamiento común PCC, para los consumidores con convertidores de energía en operación (rectificadores, convertidores e inversores), que la distorsión de corriente quede dentro de los límites. Identificados (recomendados), tales consumidores, hay que mantenerles dentro de los límites mediante la instalación de filtros (o mediante otros medios) para reducción de generación de armónicos.
2. Instalación de filtros para control de armónicos.
3. Instalar un alimentador nuevo. Èste es muy efectivo en el fortalecimiento de la fuente y en el aislamiento de los problemas de armónicos. Pero no siempre es realizable por la base económica que sustenta las operaciones.

Se debe notar que es mayormente probable la adición de cargas nuevas al sistema de distribución, es decir adicionar una mayor cantidad de convertidores de energía a un sistema que presente ya contaminación por armónicos, haciendo más posible que éste salga de los límites recomendados, propiamente entonces debe ser previsto el diseño de filtros con anterioridad a ser agregadas más cargas al sistema.

Los límites de distorsión de corriente para consumidores de energía eléctrica individuales resultan de beneficio para las partes involucradas (consumidores y suministradores de energía), enfocados en el punto común de acoplamiento PCC con interfase entre el

consumidor y el sistema de potencia, se excluyen las ventajas del alta tensión en corriente directa HVDC y los sistemas de control de potencia reactiva estáticos SVC propios y operados por la red de distribución. Tales instalaciones generalmente son de grandes razones de MVA con sustancial y potencial impacto en la operación.

Tanto los factores económicos como la efectiviadad de control de armónicos deben ser balanceados, algunos efectos armónicos son inevitables en algunos puntos, las recomendaciones presentadas logran reducir los efectos de armónicos en cualquier punto del sistema estableciendo los límites de ciertos índices de corriente y tensión en el punto PCC, un punto de medición, o un punto en que el consumidor y la red de distribución puedan accesarse para medición de índices de armónicos, se pueden estimar los índices de armónicos en el punto de interferencia POI por medio de métodos mutuamente congruentes. Dentro de plantas industriales el PCC es el punto entre las cargas no lineales y otras cargas.

Los buenos índices de armónicos son caracterizados por:

1. Los valores dados por los índices de armónicos podrían ser físicamente significantivos y fuertemente correlacionados con la severidad de los efectos armónicos.
2. Debe ser posible determinar por mediciones si los límites de los índices armónicos son significativos o no lo son.
3. Los índices armónicos deben ser simples y prácticos para ser utilizados ampliamente y con facilidad

Los índices armónicos recomendados son:

1. Profundad de ranura, area total de ranura y distorsión RSS (root sums of squares)de la distorsión de las barras colectoras (bus) de tensión por ranuras de conmutación en sistemas de baja tensión .
2. Distorsión total e individual de tensión.
3. Distorsión total e individual de corriente.

Como se describe el capítulo 6 los efectos de armónicos difieren sustancialmente dependiendo de las carácterísticas del equipo afectado, por lo que la severidad de los efectos armónicos impuestos en todo tipo de equipos no puede ser perfectamente correlacionado a unos cuantos indices simples, las características del circuito del sistema de distribución vistas desde el PCC a menudo no son conocidas con precisión, son

requeridos buenos juicios ingenieriles en una base caso por caso y la recomendación no tiene tal alcance.

Es razonable considerar que el sistema cambia con cierta constancia, a menudo con rexaminación justificada, debe ser ejecutada la medición de armónicos periódicamente para determinar el comportamiento del sistema y ejecución de los equipos, así el usuario confirmará:

1. Capacitores de corrección de factor de potencia o filtros de armónicos no sobrestrezados por exceso de armónicos.
2. No hay presencia de una resonancia serie o paralela dañina.
3. Nivel de armónicos en el PCC y en los puntos de conexión (de utilización del sistema) no son excesivos.

10.2 Para servicios de distribución

10.2.1 Adición de armónicos

La forma de onda de la corriente de ac está determinada por el ángulo de retraso (delay) al que inicia la conmutación y por el ángulo de traslape (overlap), los componentes de corriente armónica generados por un convertidor de energía no pueden estar en fase con los componentes de corriente armónica generados por otro que se encuentre conectado al mismo alimentador, se puede decir lo mismo respecto a las componentes de las caídas de tensión de las impedancias armónicas. Las contribuciones adicionales de tensiones y corrientes armónicas desde convertidores de energía múltiples es conceptualmente simple, pueden aplicarse las leyes de Kirchoff para los fasores de cada frecuencia armónica, en la práctica la adición rigurosa de componenets armónicas probablemente sea imposible, podría ser coleccionada una cantidad de datos de fase y ser analizados estadísticamente variaciones para diferentes horas del día.

Es recomendado un método de adición simple y conservador de aproximación para la resolución del circuito, para cada fuente armónica separadamente, con el objetivo de determinar las corrientes de bifurcación o ramal y las tensiones de nodo causadas por las fuentes, entonces aritméticamente adicionando uno a la vez, pueden ser utilizados los factores coincidentes de las cargas de convertidor de energía para reafinar los cálculos.

Las mediciones de armónicos pueden ser ejecutadas de tiempo en tiempo (periódicamente) en puntos seleccionados en los que son esperados altos niveles de distorsión armónica para determinar el comportamiento del sistema y confirmar que:

1. No están siendo sobre estrezados por exceso de armónicos los capacitores, filtros, cables y transformadores.
2. No ocurre un daño de consideración (grado) por resonancia serie o paralelo.
3. El nivel de armónicos está dentro de los límites.

Podría ser hecho el análisis de armónicos basado en factores coincidentes de cargas de convertidor de energía para evaluar las mediciones (los resultados) y extrapolar resultados para el clasificación y estudio de los efectos de nuevos convertidores de energía a ser instalados, No se recomendada la confianza única en una adición extensiva y analítica de armónicos.

10.2.2 Armónicos de corta duración

Dispositivos como un controlador de tecnología basada en thystores aplicados a un tren de laminación genera pulsos eléctricos excepcionalmente grandes de corrientes armónicas de corta duración conforme el material pasa a través del tren, La generación de armónicos intermitentes y la tensión de esfuerzo resultante en capacitores, transformadores y otros aparatos de potencia es a veces más tolerable que el esfuerzo causado por los armónicos generados de forma constante, los armónicos intermitentes así como los constantes causarán efectos similares hasta el punto de interferencia armónica para los circuitos de control, circuitos de comunicaciones, y equipo electrónico, probablemente en éste caso el parpadeo o centelleo es el mayor problema y los problemas de armónicos resultan secundarios, Una solución al parpadeo o centelleo puede eliminar los problemas de armónicos.

10.2.3 Condiciones anormales por problemas de armónicos

Algunas de las menos comunes condiciones conocidas que pueden causar problemas de armónicos son la resonancia natural de la línea de transmisión, la sobre exitación de transformadores, y la resonancia armónica en secuencia cero.

Cada línea de transmisión tiene una alta frecuencia resonante determinada por su longitud, su geometría y su terminación, la impedancia de entrada de una línea de

transmisión puede llegar a ser cercana a cero y resistiva (prácticamente resistiva, resonancia serie) o infinitamente grande (resonancia paralela) a las frecuencias resonantes naturales, si una frecuencia resonante serie es cercana a uno de los armónicos generados por los convertidores, hay un riesgo de interferencia armónica severa, la cual, puede ser corregida mediante el cambio de la frecuencia natural de la línea de transmisión (por el cambio de la terminación de la línea o cambiando su longitud) o por medio de la prevención del flujo de corriente armónica en la línea con un filtro de bloqueo en serie o un filtro derivación (shunt filter), o ambos (desafortunadamente eso es caro).

Las características del núcleo del transformador, como la sobrexitación del transformador generan armónicos de orden impar, hay una tendencia a operar circuitos de alta tensión con tensión sustancialmente mayor que el nominal por medio de la conmutación en bancos de capacitores de acuerdo con los incrementos de carga diarios, éstos aseguran un flujo de carga deseado y estabilidad de tensión, pero pueden causar problemas de armónicos, la potencia reactiva excesiva durante condiciones de carga ligera pueden causar problemas similares.

Puede ocurrir resonancia armónica en un circuito de secuencia cero bajo las condiciones siguientes:

1. Neutros del generador conectados en estrella aterrizados por medio de reactores.
2. Los generadores son conectados a los alimentadores directamente o por medio de transformadores con devanados conectados en estrella, en el lado del generador, que son aterrizados solidamente o a través de reactores neutrales.
3. Capacitores de corrección de factor de potencia conectados en un arreglo en estrella aterrizada son aplicados a lo largo de un alimentador.

Esas condiciones pueden ser satisfechas en un sistema pequeño aislado, la tensión del generador siempre contiene tensiones armónicas de secuencia cero, los cuales actúan como fuentes de tensión dada la pequeña impedancia interna envuelta. Las fuentes de tensión armónico son conectadas a una combinación en serie de una reactancia inductiva y una capacitiva, si las dos son similares en magnitud en alguna de las frecuencias armónicas, fluirá una gran cantidad de corrienes armónicas en el lazo y pueden causar problemas inusuales como altas tensiones, operación erronea de los medidores de kWh para consumidores monofásicos, y operación falsa de relevadores aterrizados de sobrecorriente, una solución es quebrar el lazo de tierra por medio del cambio de los

esquemas para generadores y capacitores, el uso apropiado de una conexión en delta de los devanados de los transformadores elevadores de tensión también el lazo de tierra.

10.2.4 Límites de distorsión de tensión

Los límites recomendados para distorsión de tensión vienen en la tabla 10.1y son los siguientes:

Bus voltage at PCC	Individual voltage distortion (%)	Total voltage distortion (%)
Below 69 kV	3.0	5.0
69 kV to 138 kV	1.5	2.5
138 kV and above	1.0	1.5

Sistemas de alta tensión pueden tener más de 2% de TDH donde la causa sea un HVDC terminal
Tabla 10.1
Límites de distorsión de tensión

THD RSS distorsión de tensión armónico total en porciento de la tensión nominal a frecuencia fundamental.

Los límites listados en la tabla pueden ser utilizados como valores de diseño para el peor caso de operación normal para condiciones de operación por un tiempo mayor a una hora, para periodos de corta duración, durante inicialización o condiciones inusuales, los límites pueden ser excedicos por más de 50%.

10.2.5 Límites de interferencia con circuitos de comunicaciones

Es difícil establecer límites específicos en influencia telefónica que puedan infligir los armónicos de corriente y tensión generados por sistemas de conversión de energía. La interferencia en los sistemas de comunicaciones de voz que están en la proximidad de sistemas de suministro de potencian es dependiente de un cierto número de factores bajo control del diseñador del sistema de conversión. Esos factores variarán de localidad en localidad y de hora en hora (durante el día, o temporada del año; tiempo seco o lluvioso) así como de la habilidad en progresos de coordinación de inductancias.

Hay datos que relacionan el IT contra en nivel de ejecución de grandes convertidores utilizados en sitios telefónicos para carga de baterías, disponibles en la tabla 6.2 (ver sec. 6.9.1), los valores de la tabla 10.2 son mostrados como recomendados y no como

requerimientos, los valores mostrados son aplicables a distribución secundaria dentro de edificios telefónicos. El IT en sistemas primarios podría ser reducido por la relación de vueltas en el transformador del distribuidor la cual normalmente anda dentro del rango de 40:1 a 60:1. La tabla 10.3 contienene valores típicos de IT para convertidores resonantes de 48V. Convertidores de seis semiconductores (pulsos) con derivaciones de cambio de fase que permiten que operen en paralelo dos convertidores en una base de 12 semiconductores (pulsos) o cuatro para formar una base de 24 semiconductores (pulsos).

El IT en transmisión primaria es de mayor interés para los ingenieros en una compañía telefónica que coordinan el valor de inductancia, aunque no hay requerimientos específicos la experiencia con problemas de interferencia sobre los años ha provisto algunas dirctrices para ser utilizadas resumidas en la tabla 10.4.

Three-Phase Line-to-Line Voltage	Rectifier Full Load Output Current Rating	*I·T* on Secondary Distribution
208/240 V	400	25 000
	800	50 000
	1600	100 000
480 V	400	12 000
	800	25 000
	1600	50 000

NOTE: For the case of ferroresonant units that do not utilize phase shifting, the *I·T* is typically much lower, as indicated in Table 11.3.

Tabla 10.2
Valores típicos de IT para convertidores de 48 Vdc

Three-Phase Line-to-Line Voltage (Secondary)	Converter Full Load Output Current Rating	*I·T* on Secondary Distribution
208/240 V	100*	750
	400	1500
480 V	100*	350
	400	750

*Single-phase rectifiers

Tabla 10.3
Valores típicos de IT para convertidores ferroresonantes de 48 Vdc

Category	Description	$I \cdot T$
I	Levels most unlikely to cause interference	Up to 10 000*
II	Levels that might cause interference	10 000 to 25 000
III	Levels that probably will cause interference	greater than 25 000

NOTE: These values of $I \cdot T$ product are for circuits with an exposure between overhead systems, both power and telephone. Within an industrial plant or commercial building, the exposure between power distribution in cables and telephone lines in cable with twisted pairs is extremely low and no interference is normally encountered. $I \cdot T$ products similar to those of Table 11.2 should be used within plants and buildings.

* For some areas that use a ground return for either telephone or power circuits, this value may be as low as 1500.

Tabla 10.4
Directrices de IT balanceada para instalación de convertidores, líneas de enlace (suministro)

Una instalación sensible al ruido cae en la categoría I, edificios comerciales y plantas industriales en la II y areas no restringidas en la III. Puede ser verificado, que las directrices son aplicables a componentes balanceadas de sistemas de potencia en lugar de componentes residuales. La tabla 10.4 provee directrices representativas para líneas eléctricas que enlazan instalaciones de convertidores comerciales e industriales para distribución primaria y redes de transmisión.

10.3 Para consumidores individuales

10.3.1 Límites de distorsión de corriente

Los límites para armónicos que se presentan son para:

1. Limitar la inyeccion de armónicos para consumidores individuales de manera que no cause niveles de distorsión inaceptables para sistemas de características normales.
2. Limitar la distorsión armónica total de los sistemas de tensión que son suministrados por la fuente.

Para desarrollar los límites de inyeccion de corriente armónica para distorsión armónica total en consumidores individuales primero es necesario establecer que significan características de un sistema normal. Se asumirá que el sistema puede ser caracterizado por una impedancia de corto circuito y se desprecia el efecto de los capacitores, típico o conservador a altas frecuencias donde los capacitores proveen una trayetoria de baja impedancia para armónicos. A bajas frecuencias las condiciones de resonancia pueden causar que la impedancia del sistema sea tan grande que se asuma la impedancia de

corto circuito, el efecto de las cargas también es despreciable, y el efecto más importante de las cargas es proveer amortiguamiento cerca de las frecuencias de resonancia, por lo tanto, la reducción de la impedancia vista por la fuente de corriente armónica.

La distorsión armónica de tensión será función de la corriente armónica total inyectada y de la impedancia a cada una de las frecuencias armónicas, la corriente armónica total inyectada dependerá de los consumidores individuales en cuanto a la cantidad que sea su aportación dada su dimensión (como consumidor), una aproximación razonable para la limitación de corrientes armónicas para cada consumidor es hacer los límites dependientes sobre la dimensión del propio consumidor. Grandes consumidores tendrán límites más estrictos porque representan una gran proporción de carga en la carga total del sistema.

La tabla 10.7 expresa la dimensión del consumidor conforme a la razón (relación) de la capacidad de corriente de corto circuito en el punto de acoplamiento común PCC entre el consumidor y el sistema de suministro respecto de la máxima corriente de la carga del propio consumidor, los límites de corriente armónica individual son expresados en porcentaje de la máxima corriente de carga demandada.

Los objetivos de los límites de corriente son limitar la máxima frecuencia individual de la tensión armónico máximo a 3% de la fundamental y el TDH de tensión a 5% para sistemas sin una resonancia paralela mayor que una de las frecuencias de armónicos inyectados.

Los límites desarrollados para distorsión de corriente asumen diversidad entre las corrientes armónicas inyectadas por los diferentes consumidores, la cual puede ser formada por diferentes componenetes armónicas siendo inyectadas, diferencias entre los ángulos de fase de las corrientes armónicas individuales, o diferencias en la injeccion de armónicos v.s. los perfiles de tiempo. Los límites de corriente se dan para que no sea excedida la máxima frecuencia individual de tensión armónico causada por un consumidor simple en reconocimiento de la diversidad, los límites son demarcados en la tabla 10.5 para sistemas caracterizados por una impedancia de corto circuito.

Si los consumidores individuales conocen los límites de distorsión y no hay suficiente diversidad entre las injecciones de armónicos individuales, puede ser necesario implementar alguna forma de filtro en el sistema de distribución para limitar los niveles de distorsión de tensión, es más probable que los problemas de distorsión sean causados por características de respuesta en frecuencia que resultan en un aumento de corriente

armónica a una frecuencia armónica particular. Ese cambio de características de impedancia v.s. frecuencia es resultado de la configuración física de los sistemas, situación que ha sido resuelta en el sistema de distribución tanto por cambio en la localización de los capacitores o sus dimensiones como por el diseño de filtros de armónicos.

SCR at PCC	Maximum Individual Frequency Voltage Harmonic (%)	Related Assumption
10	2.5–3.0%	Dedicated system
20	2.0–2.5%	1–2 large customers
50	1.0–1.5%	A few relatively large customers
100	0.5–1.0%	5–20 medium size customers
1000	0.05–0.10%	Many small customers

Tabla 10.5
Límites basicos para armónicos de corriente

10.3.2 Límites en ranuras de conmutación

La profundidad de la ranura, el factor de distorsión armónica total THD y el área de la ranura de tensión de línea-línea en el PCC pueden ser limitados como muestra la tabla 10.6. Esos límites son recomendados para sistemas de baja tensión en que el área de la ranura es fácilmente medible en un osciloscopio, puede notarse que el factor de distorsión de tensión está relacionado al área total de la ranura A_N se ve en la ecuación 8.20.

	Special Applications*	General System	Dedicated System†
Notch Depth	10%	20%	50%
THD (Voltage)	3%	5%	10%
Notch Area (A_N)‡	16 400	22 800	36 500

NOTE: The value A_N for other than 480 V systems should be multiplied by V/480

*Special applications include hospitals and airports.
†A dedicated system is exclusively dedicated to the converter load.
‡In volt-microseconds at rated voltage and current.

Tabla 10.6
Límites de distorsión y clasificación de sistemas de baja tensión

$$TDH_{MAX} = 0.074\sqrt{\frac{A_N}{\rho}}\% \qquad \text{Ec. 8.20}$$

ρ razón de la inductancia total respecto de la inductancia común del sistema

La figura 10.1 define el àrea de la profundidad de la ranura.

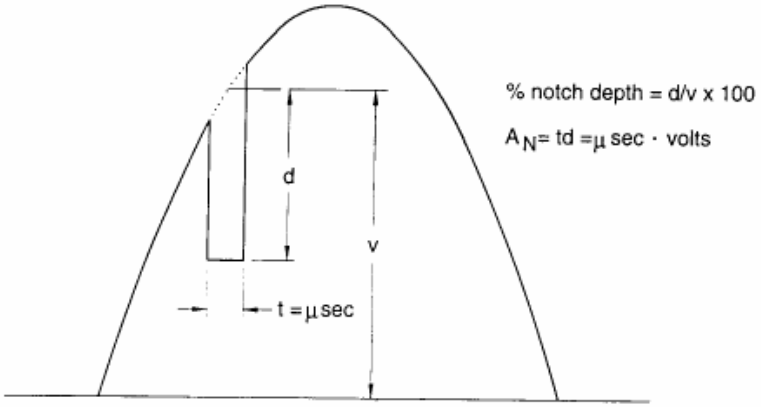


Figura 10.1
Definiciones de profundidad y área de ranura

10.3.3 Límites de distorsión de corrientes

Idealmente la distorsión armónica causada por un solo consumidor puede ser limitada en un nivel aceptable en algún punto del sistema y el sistema entero puede estar operando sin distorsión armónica sustancial, los límites establecen la máxima distorsión de corriente permisible para un consumidor, y conciernen al índice:

TDD Distorsión total demandada (RSS), distorsión de corriente armónica en % de la corriente de carga demandada (15 o 30 minutos de demanda).

Los límites que se enlistan en las tablas 10.7, 10.8 y 10.9, pueden ser usados como valores de diseño para el peor caso de operación normal (condiciones mayores de una hora de operación), para periodos cortos, durante condiciones inusuales o arranque los límites pueden exceder un 50 %. Las tablas son aplicables para rectificadores de seis semiconductores (pulsos) y situaciones generales de distorsión, sin embargo, cuando son empleados transformadores defasadores o convertidores con un número mayor de semiconductores (pulsos) que seis, los límites para ordenes de armónicos característicos son incrementados por un factor de $(q / 6)^{1/2}$ proveyendo que las amplitudes de los armónicos de orden no característico sean menores de 25% de los límites especificados por las tablas.

Maximum Harmonic Current Distribution in % of Fundamental						
Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.						
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L.						
Where I_{sc} = Maximum short circuit current at PCC. and I_L = Maximum load current (fundamental frequency) at PCC.						

Tabla 10.7
Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución en general (rango 120 V hasta 69 000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.						
Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.						
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L.						
where I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC. I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.						

Tabla 10.8
Límites de distorsión de corriente para sistemas de subtransmisión en general (rango 69 001 V hasta 161 000 V)

La tabla 10.7 lista los límites para corrientes armónicas basados en las dimensiones de la carga respecto a la dimensión del sistema de potencia al que es conectada, la razón I_{SC}/I_L es la razón de corriente de corto circuito disponible en el punto común de acoplamiento PCC a la máxima corriente de carga fundamental, es recomendado que la corriente de carga I_L sea calculada como el promedio de corriente de demanda máxima por un periodo de 12 meses, así, como la dimensión de carga de un usuario se decrementa respecto de la dimensión de un sistema, el porcentaje de corriente armónica que es permitida al usuario inyectar dentro del incremento del sistema, lo que protege a otros usuarios

conectados al sistema en el mismo alimentador también en el sistema de distribución, el cual requiere proveer cierta calidad de tensión a sus consumidores. Toda la generación conectada a la distribución, subtransmisión o sistema de transmisión es tratada como un sistema de distribución y por tanto toma las directrices recomendadas

Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	THD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L.

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Tabla 10.9
Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión en general (> 161 001 V)

10.3.4 Aplicación probabilística de límites de distorsión armónica

Es reconocido que la distorsión de corriente fija puede ser exedida por periodos de tiempo sin causar daño a los equipos, cuando se evalua el acotamiento del usuario con los límites de fijamiento es recomendado que una +distribución probabilística sea trazada y analizada mediante el registro de los datos. Si los límites solo son excedidos para un periodo corto de tiempo, las condiciones podrían ser consideradas aceptables. La figura 10.2 describe una dibujo probabilístico para corriente armónica en un alimentador de distribución.

10.3. 5 Centelleo o parpadeo

Es un fenómeno resultado de la aplicación de una carga a un convertidor y retirarla entonces reaplicarla un tiempo después, el convertidor en sí mismo no causa parpadeo (centelleo), si éste proceso es llevado a cabo a una frecuencia a la que el ojo humano es susceptible, y si la tensión resultante del sistema cae suficientemente, será detectada una modulación de nivel ligero en las lámparas incandescentes o fluorescentes, ese es el efecto que da al fenómeno ese nombre.

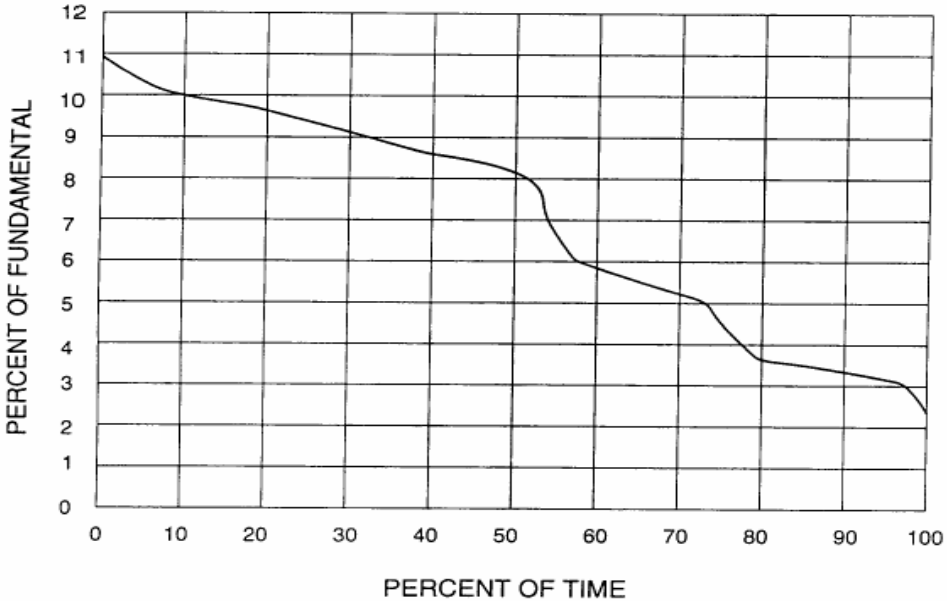


Figura 10.2
Probabilidad de distribución de corriente TDH

En aplicaciones de sistemas de potencia modernos puede haber otros aparatos como las computadoras, equipos de comunicación, o de instrumentación, que sufren efectos de deterioro, efectos que pueden existir aún cuando el parpadeo o centelleo de las lámparas no sea disernible ni visible.

La medición del parpadeo o centelleo es comprendida por la cantidad de variación de la tensión del sistema envuelto y la frecuencia a la que la variación ocurre, la frecuencia puede ser una frecuencia simple y pura pero más a menudo es una banda, las fuentes de parpadeo o centelleo pueden ser variaciones aleatorias de carga tipificadas por un horno de arco o la fundición de acero de desecho o el paro e inicio de un motor de elevador, una fuente de parpadeo o centelleo puede estar cercana a ser periódica como en el caso de avance poco a poco o soldado de puntos en forma manual, como un soldador de puntos automático.

Intensidad del parpadeo o centelleo, ésto es la magnitud de la variación de tensión, es determinada por la impedancia del sistema de potencia y los requerimientos de pico de potencia de la carga, cuando se planea instalar convertidores de semiconductores (pulsos), el efecto de semiconductores (pulsos) de carga en otras partes del sistema de distribución podrían ser calculados, lo que requiere del conocimiento de:

1. Requerimientos de voltampers de las cargas pulsantes, magnitud y frecuencia.

2. La(s) impedancia(s) de la(s) fuentes dentro del sistema de distribución devuelven una fuente de tal rigidez que la variación puede ser controlada realmente sin consecuencias.
3. Si hay o no aparatos que son susceptibles al parpadeo o centelleo dentro del sector de distribución expuesta y el grado de sensibilidad.

10.3.6 Límites de parpadeo o centelleo

El grado de sensibilidad realmente no es determinable, la figura 10.3 es como una guía para la planeación de las aplicaciones, es derivada de estudios empiricos realizados en varias fuentes, varias de tales curvas tienen aproximadamente la misma escala vertical.

10.3.7 Compensación de parpadeo o centelleo

Existen métodos de compensación de parpadeo o centelleo (o potencialmente) lo mismo que los utilizados para compensar perturbaciones subtransitorias, tal como los evidenciados para corrientes armónicas o ranuramiento. La técnica más simple y generalmente más efectiva es proveer una fuente de potencia de consistencia suficiente de manera que el efecto sea despreciable en el punto donde la fuente de parpadeo o centelleo esté aislada del resto del sistema de distribución de potencia. Son utilizados métodos para emular la fuente de consistencia, pueden ser utilizados capacitores en serie, thystores de conmutación de inductores con capacitores de shunt (control estático de VARes), inductores de derivación saturados, capacitores de derivación de thrystor saturado, para mantener relativamente la tensión de estado en el punto de enlace, como en casos en que tales esquemas son usados para proveer compensación de subtransitorios, la posibilidad de inestabilidad del sistema de distribución completo debe ser investigado a fondo antes de que se pueda aplicar la técnica.

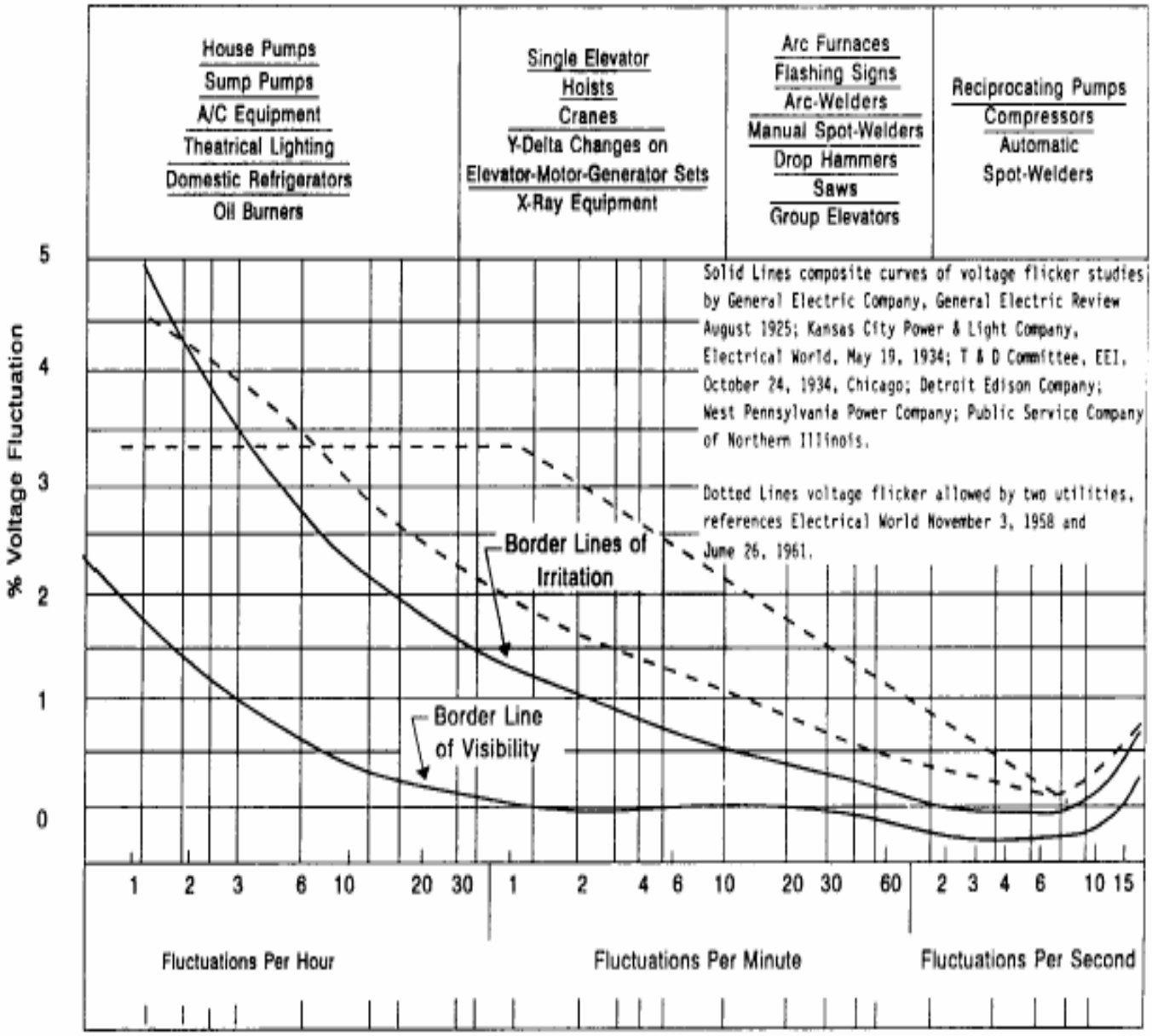


Figura 10.3
Fluctuaciones máximas permisibles de tensión

Capítulo 11 Problema práctico

11 Problema práctico

11.1 Introducción

Cuando una interrupción de servico se presenta en algún tipo de sitio de telecomunicaciones se generan problemas para la firma que proporciona el servicio (de telefonía o de enlaces) con sus clientes, dichos problemas, en ocaciones son demasiado costosos puesto que la interrrupción del servicio a fin de cuentas se traduce o significa no poder cobrar a los clientes por simplemente estar conetados a su red o por la utilización del servicio (lo cual no siempre es cierto).

Actualmente dentro de un mercado que está demasiado competido las firmas de telecomunicaciones en sus concursos (licitaciones) para establecer que firmas serán los suministradores de los equipos (ganadores de un contrato de compra de infraestructura) con los que se conformarán los sitios procuran la obtención de ciertas y muchas ventajas, ventajas que en ocaciones resultan no solamente en grandes descuentos y precios realmente muy bajos (a mercado mexicano, el cual en realidad es bastante alto), algunas de ellas son:

1. Periodos de garantía extendidos, es decir que, consiguen mayores periodos de garantía a los tradicionales (de 1 o 2 años; que son los periodos de soporte para los que están preparadas en infrastructura la mayoría de las grandes firmas, aún cuando a decir verdad las firmas en México no lo están en general) llegando a ser de hasta 5 años.
2. Refaccionamiento para los talleres que las propias firmas de telecomunicaciones tienen prácticamente sin pago por las mismas, es decir, que son absorbidas las refacciones por las propias marcas que venden los equipos de fuerza.
3. Responsabilidad de respuesta los 365 días las 24 hrs en cualquier punto geográfico del país por remoto que sea en un plazo no mayor de un par de horas luego de la realización de una llamada sin importar el rango del reportante (ni su conocimiento real y auténtico sobre los conceptos básicos de funcionamiento de los equipos de la planta de fuerza que tiene en el sitio) y sin importar las dificultades reales de transporte al sitio.

A consecuencia de ello las firmas fabricantes de equipos y comercializadoras se ven en problemas que van más allá de lo convencional, puesto que en la realidad no existen esos niveles reales de compromiso (auténtico) sobre los equipos vendidos ni sobre el personal que presta en servicio, de ésta forma surgió el problema objeto de estudio en el presente trabajo, que en primera instancia dio a pensar en la firma de telecomunicaciones que tenía que realizar un reclamo a la firma fabricante y comercializadora de los equipos de fuerza que había comprado en un proyecto grande de expansión de sitios y de sustitución de equipos ya existentes (aproximadamente 1500 plantas de fuerza); eximiendose la firma usuaria o compradora de su propia responsabilidad (que al final será descrito a detalle la razón y el porque lo expreso de esa forma).

11.2 Planteamiento

Al cabo de entre nueve y diez meses de estar ya en operación una planta de fuerza en un sitio celular en la cuidad de México, fue recibida la notificación de un problema en el departamento de servicio y soporte de la firma fabricante, en el que según el reporte realizado por los ingenieros de operaciones de la empresa de telecomunicaciones celulares usuaria, los rectificadores (llamados por la tecnología comprada unidades de conversión de potencia PCU) de la planta de fuerza del sitio (primero) se salían de operación y necesitaban apagarlos y sacarlos de la planta de fuerza para reestablecerles en su funcionamiento y volver a rehubicarles en su posición respectiva en la planta de fuerza (haciendoles un reset), lo anterior sucedía solamente a dos rectificadores de la planta de fuerza y con una frecuencia llamemos menor (dos veces cada dos semanas) al inicio de las observaciones y notas al respecto de la firma usuaria.

Al paso del tiempo la frecuencia del fenómeno fue en aumento (llamemos mediano) a tres o cuatro veces a cada tres semanas y de igual manera en una cantidad mayor de rectificadores (PCUs), llegó el momento en que se presentó ya con una frecuencia (llamemos mayor) de cinco o seis veces en las mismas tres o cuatro semanas, obviamente el problema se presentaba ya ante los ojos del usuario como un tema grave (recuerdo que había comprado aproximadamente 1500 plantas), dentro de las observaciones realizadas al respecto del problema, el fenómeno de falla coincidía con el periodo de lluvias y de la misma forma el aumento en frecuencia coincidía con el aumento del caudal de las mismas así como la intensidad de los fenómenos de descargas atmosféricas.

De la misma forma (como es lógico en un área de soporte de una firma de sumistro) se recibieron reportes de fallas encontradas en otros sitios de la misma empresa de telecomunicaciones celulares (como resulta lógico de una empresa con más de 2 mil sitios operando), dos sitios más en la ciudad de México y otros dos ya en el interior del país, uno en una zona de altas lluvias pero el otro en una zona de lluvias moderada, al realizar las recepciones de los datos de los lugares se observó que cuatro de ellos se encontraban dentro de edificios de Teléfonos de México y uno en un edificio de tienda Sanborns (5 sitios). La localización de los sitios celulares en cuanto a su ubicación causó un tema de controversia porque la pregunta que surge en los responsables de servicio de la firma suministradora del equipo de fuerza en primer término es *¿ que parámetros están variando de manera coincidente entre los lugares en relación a los fenómenos naturales, para tener ése comportamiento de `falla`(resalto así porque en las condicones establecidas era necesario clasificar si lo era o no)*

11.3 Estudio del problema

La firma de telecomunicaciones celulares buscaba la explicación así como la solución del problema de forma inmediata, la firma de fabricación más que nunca buscaba la razón del fenómeno pues aparte de los casos citados obviamente tenía otros casos de plantas de fuerza con reportes de falla (pues son equipos operando sin interrupción) pero que no correspondían con la falla citada que de forma obvia el usuario no deja de asociar con la falla citada hasta que no se pruebe lo contrario por parte de la firma fabricante y comercializadora, para ambas firmas el problema potencialmente era muy delicado pues la cantidad de plantas de fuerza del mismo tipo que ya se encontraban en operación a lo largo y ancho del país pues en ése momento ya era bastante considerable, cerca de mil doscientas cincuenta, y la empresa celular había comprado en los últimos tres años cerca de mil quinientas plantas de fuerza del mismo tipo.

La firma fabricante pensó en la presencia de los fenómenos atmosféricos como la causa del problema (de hecho era la principal sospecha de forma inicial y al mismo tiempo, pensaba, la de mayor probabilidad) y contrató los servicios de renta de equipo de estudio para el comportamiento de la energía en cuanto al sumistro de las plantas de fuerza, eligiendo obviamente las plantas que tenía más cerca, en la ciudad de México, de manera que colocó al mismo tiempo prácticamente dos equipos de estudio para un periodo de tiempo de entre tres a cinco semanas de monitoreo ininterrumpido.

La idea de la firma fabricante era la de presentar como prueba del comportamiento de los equipos la aparición de transitorios de tensión a consecuencia de descargas atmosféricas, que aparentemente eran la causa del problema, de manera que presentando así el problema la firma fabricante se exoneraba de cierta manera de la responsabilidad sobre los equipos y tomaba así una nueva bandera para presentar un proyecto nuevo de venta de equipos de protección contra transitorios a la empresa celular, representando ahora una oportunidad de vender más dolares, la renta de los equipos de estudio por el periodo de tiempo citado, aún cuando era un problema de mucha fuerza potencial, no fue sino después de dos semanas de la aparición de los reportes (en el periodo de gravedad) de los fenómenos de falla que se instalaron los equipos de prueba.

Para el tiempo en que se instalaron los equipos en los sitios los fenómenos meteorológicos ya habían disminuido demasiado en su frecuencia en la cuidad de México, lo que daba como opción pensar en el colocar equipos de estudio en las otras dos plazas que se tenía conocimiento del problema, resulta obvio hablar de que no se instalaron equipos de monitoreo en dichas plazas (pues, si tardaron 2 semanas en decidir colocar las primeras).

11.3.1 Monitoreo de condiciones de energía en plantas de fuerza

Con los equipos que se instalaron para el estudio de energía de suministro de las plantas de fuerza en cuestión en la cuidad de México en las localizaciones de dos Centrales Telmex una la de Ejército de Oriente y la otra la de Coyoacán-Coapa, el lugar que presentaba mayor antigüedad y por tanto gravedad era Ejército de Oriente motivo por el que se prestó especial atención en él. El tiempo de la presencia de los equipos de estudio fue de tres semanas a un mes durante los cuales la presencia de transitorios relacionados con descargas amosféricas las cuales no hubo, pero el comportamiento de los rectificadores seguía siendo el mismo.

11.3.1.1 Mediciones de transitorios

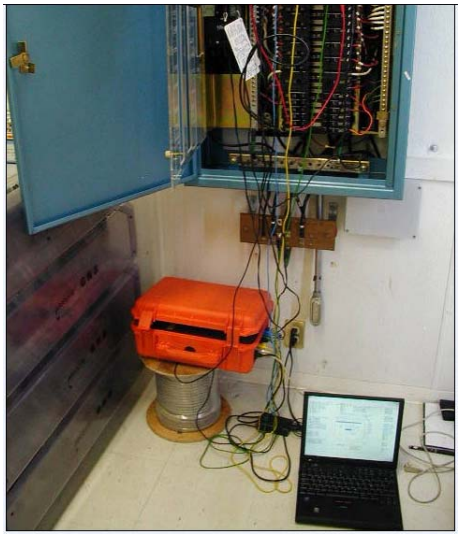
Los resultados apreciados respecto a las mediciones de los fenómenos de falla mediante el uso de una conexión para medición de cada fase de energía de alimentación y una para el neutro sobre los tableros de alimentación de las plantas de fuerza tomando como base una diferencia de potencial promedio (dado el comportamiento real de la tensión de línea de 140 Vrms *lo que implica*) entregaron lo siguiente.

Primero sobre transitorios, mediciones realizadas en el sitio de mayor importancia para el cliente en la central Telmex Ejército de Oriente, mediciones hechas ciclo por ciclo, por medio de un analizador de trasitorios de 8 canales; configurado para medición de cada fase una por canal con un ajuste a 140 Vrms y adicionando un canal para medición de tensión tierra Neutro, en estrella; para un periodo de entre tres semanas a un mes.

Arrojando los resultados siguientes:

1. No se encuentró ningún fenómeno de descarga atmosférica que implique el haberse presentado transitorios
2. Se encontraron cortes de energía de duraciones pequeñas de la manera siguiente
   - Para la fase A, ningún fenómeno transitorio o de corte.
   - Para la fase B, solamente 3 cortes de duración mínima (unos cuantos μseg) de 25.6 y uno de 78.6
   - Para la fase C, 8 cortes de 25.6 y dos de 51.2 μseg
3. Se encontraron fenómenos de sobretensión: (duración en tiempo, duración en ciclos; sobre tensión pV + ajuste del equipo)
   - El mismo día de colocación del equipo de medición en una sola fase; 830.0 mseg (50 ciclos) 22.3 pv +140v= 162.3 Volts
   - A los dos días 149.4 mseg (9 ciclos) 24.8 pv +140v= 164.8 Volts
   - A los dos días en otra fase 49.8 mseg (3 ciclos) 23.9 pv +140v= 163.9 Volts
   - A los dos días en la última fase 16.6 mseg (1 ciclos) 24 pv +140v= 164 Volts

En la figura 11.1 se observa la conexión real llevada a cabo en el sitio primer sitio reportado con problemas en el D.F.



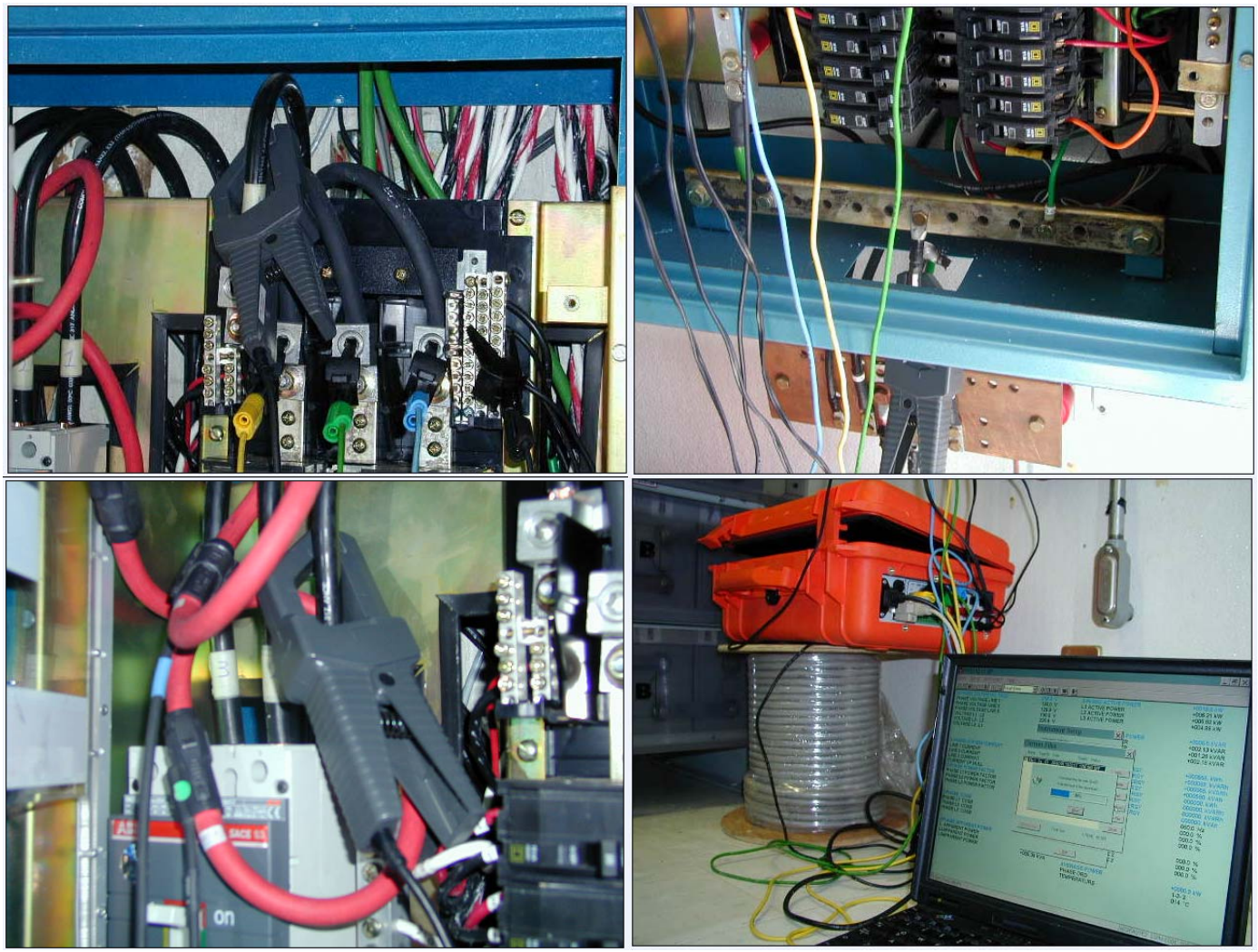


Figura 11.1
Foto de conexiones del equipo de mediciones en el tablero de alimentación del sitio de telecomunicaciones

Segundo sobre armónicos, en el mismo sitio, el equipo de análisis entrega mediciones (como puede verse en la figura 11.1) respecto de los parámetros eléctricos siguientes:

1) Tensión
   - Trifásico del sistema
   - De cada Fase (L1, L2 y L3)
   - Línea – línea (L1-L2, L2-L3 y L3-L1)
2) Corriente
   - Trifásica del sistema
   - De cada Fase (L1, L2 y L3)
   - Del neutro
3) Factor de potencia

- Trifásica del sistema
- De cada Fase (L1, L2 y L3)
- Cos ϕ δe cada Fase (L1, L2 y L3)

4) Potencia aparente
   - Trifásica del sistema
   - De cada Fase (L1, L2 y L3)
5) Potencia activa
   - Trifásica del sistema
   - De cada Fase (L1, L2 y L3)
6) Potencia reactiva
   - Trifásica del sistema
   - De cada Fase (L1, L2 y L3)
7) Energía
   - (acq act, ind reac, cap reac, acq app)
8) TDH de tensión
   - De cada Fase (L1, L2 y L3)
9) TDH de corriente
   - De cada Fase (L1, L2 y L3)
10) Potencia promedio
11) Temperatura

La figura 11.2 muestra una tabla que proporciona los valores de los parámetros anteriormente descritos que entrega el programa del equipo de medición y análisis por medio de un ambiente windows, los datos entregados peden ser de tipo puntual, es decir en un momento cualquiera del sistema o depurados en promedio para un periodo. La figura 11.3 muestra algunos de los parámetros de una del tipo de la figura 11.2 en forma de carátulas

En la tabla mostrada aparentemente no se tiene ningún problema dado que al ver los valores de los parámetros eléctricos no se distinguen valores que se vean de un valor demasiado grande, pero en lo que respecta a los valores de distorsión armónica TDH se consiguen observar valores altos.

En la figura 11.4 se pueden observar en el lado izquierdo las formas de onda reales de tensión y corriente correspondientes a cada línea; en el lado derecho se observa el contenido armónico que presentan; ambas figuras son realizadas para un periodo de muestreo. En la parte derecha se puede observar que los componentes de los armónicos

tercero, quinto, séptimo, noveno, undécimo y décimo tercero son los de mayor contribución o participación (peso) en cada línea.

Como una variante de la figura anterior la figura 11.5 presenta solamente la forma de onda y el contenido armónico de una sola línea para un periodo de muestreo. En ella es un poco más claro observar la contribución de los armónicos 3ro, 5to, 7mo, 9no, 11ro, y 13ro. Como variante de la anterior la figura 11.6 presenta solo el contenido armónico de una sola línea para un periodo de muestreo. En ella es perceptible de mejor forma que en una de la línea los armónicos de mayor contribución son el 5to, 7mo y 11ro.

Las figuras 11.7 y 11.8 dejan observar que existe un comportamiento variable de los armónicos de tensión y de corriente respectivamente conforme transcurre el tiempo, lo cual obedece al hecho que la carga en un sitio real es variable en el tiempo, es decir que hay de manera aleatoria entradas y salidas de operación de diversos equipos tanto de los que pertenecen al sitio de telecomunicaciones como externos, es decir que están físicamente en otras localidades pero que están conectados a la misma distribución y que contaminan las líneas. En ambas figuras aún cuando no presentan escala en el eje vertical, se puede observar que los armónicos tanto de tensión como de corriente de las tres líneas para un periodo de muestreo se van siguiendo.

De las observaciones anteriores se obtiene que, de acuerdo con la tabla 10.1 donde se muestran los límites de distorsión de tensión; que en un sistema menor de 69 KV de capacidad el valor recomendado de TDH en cada elemento armónico no debe ser mayor a 3 % y el promedio de todos los elementos armónicos 5 %; ambos valores son sobrepasados.

Ahora bien, de acuerdo con la tabla 10.7 donde se muestran los límites recomendados para armónicos de corriente en sistemas de tensión dentro de un rango de 120V y hasta 69 KV; se observa que los valores individuales recomendados para cada elemento no deben ser mayores de, 4.0 para elementos impares hasta el 9no, 1.0 para elementos pares hasta el 10mo, 2.0 para elementos impares desde el 11ro y hasta el 15to, 0.5 para elementos pares desde el 12do y hasta el 16to, 1.5 para elementos impares desde el 17mo y hasta el 21ro, 0.375 para elementos pares desde el 18vo y hasta el 22do, (los de mayor importancia, y todas las cantidades en %), se observa también que el promedio no debe ser mayor de 5.0; no es fácil de verificar el valor que presentan los gráficos, pero si es apreciable que en lo que respecta a los armónicos de órdenes 5to, 7mo, 9no, 11ro y 13ro, dependiendo la línea y la figura observada que las columnas tienen una altura que

corresponde a una cantidad mayor que la de la tabla, por otro lado el valor promedio es sobrepasado según la figura 11.2.

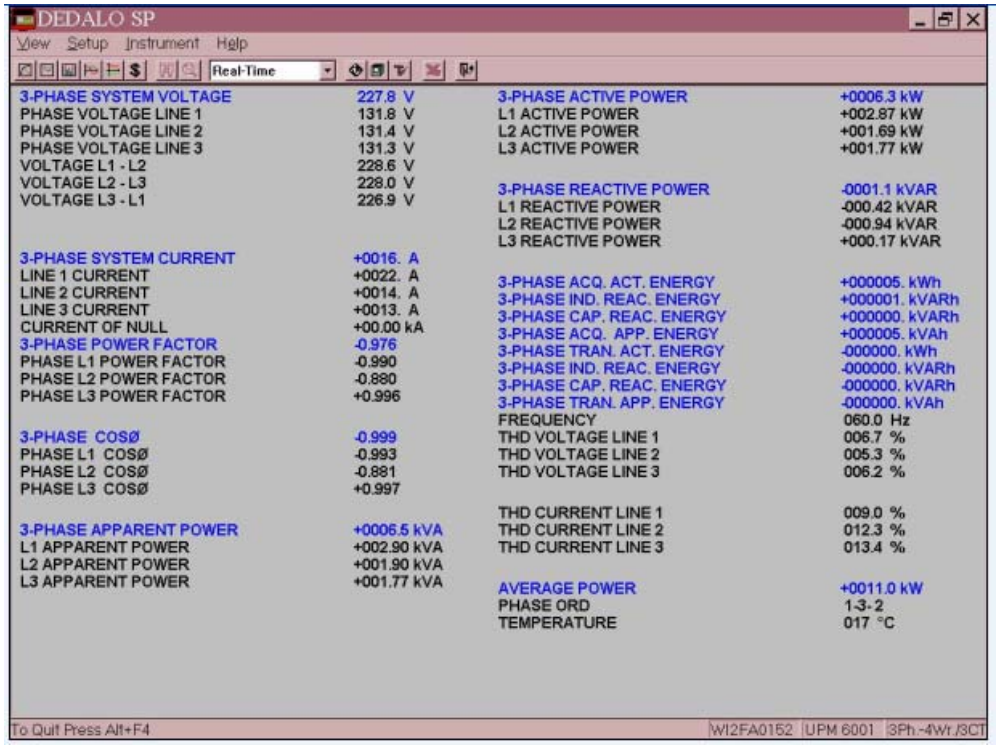


Figura 11.2

Despliegue en pantalla de medición de parámetros promedio en energía de alimentación sitio Cabeza de Juarez

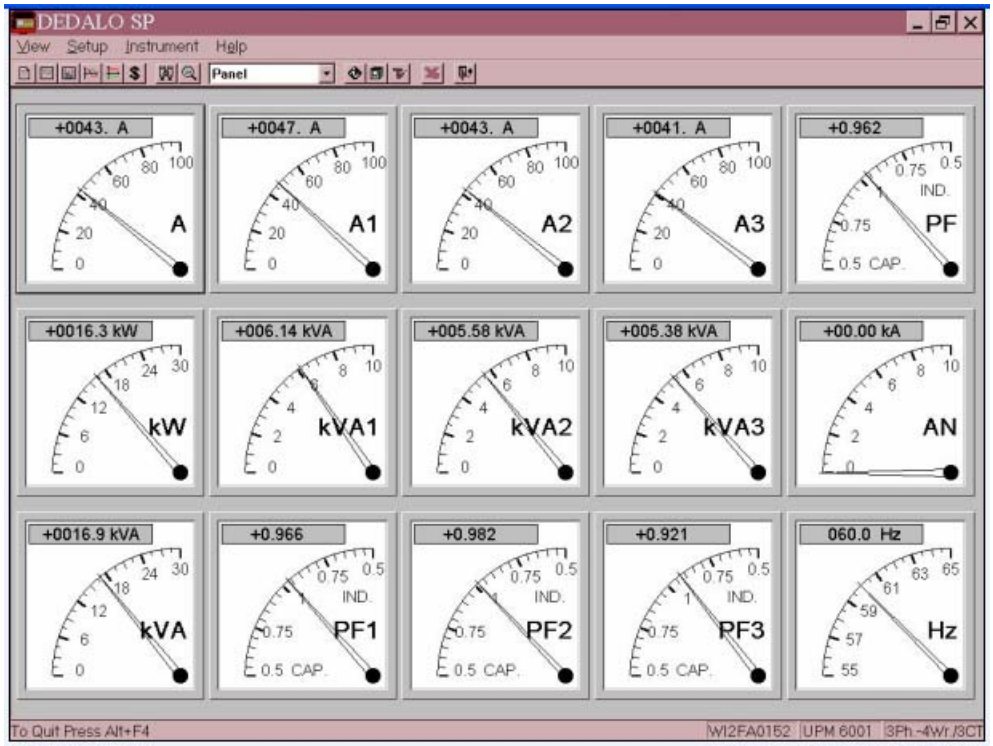


Figura 11.3

Representación gráfica (de carátula) de los parámetros más importantes en energía de alimentación sitio Cabeza de Juárez

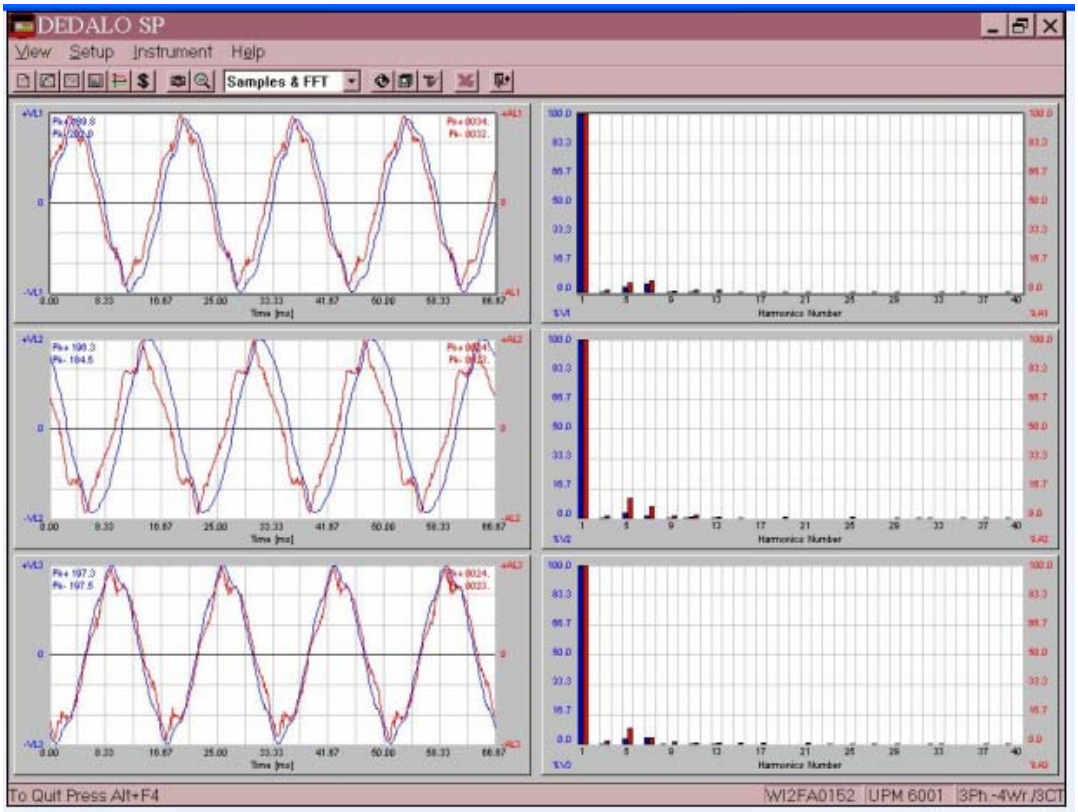


Figura 11.4

Izq. Formas de onda real por línea (muestra) , Der. contenido armónico de voltage y corriente; en energía de alimentación, sitio Cabeza de Juárez

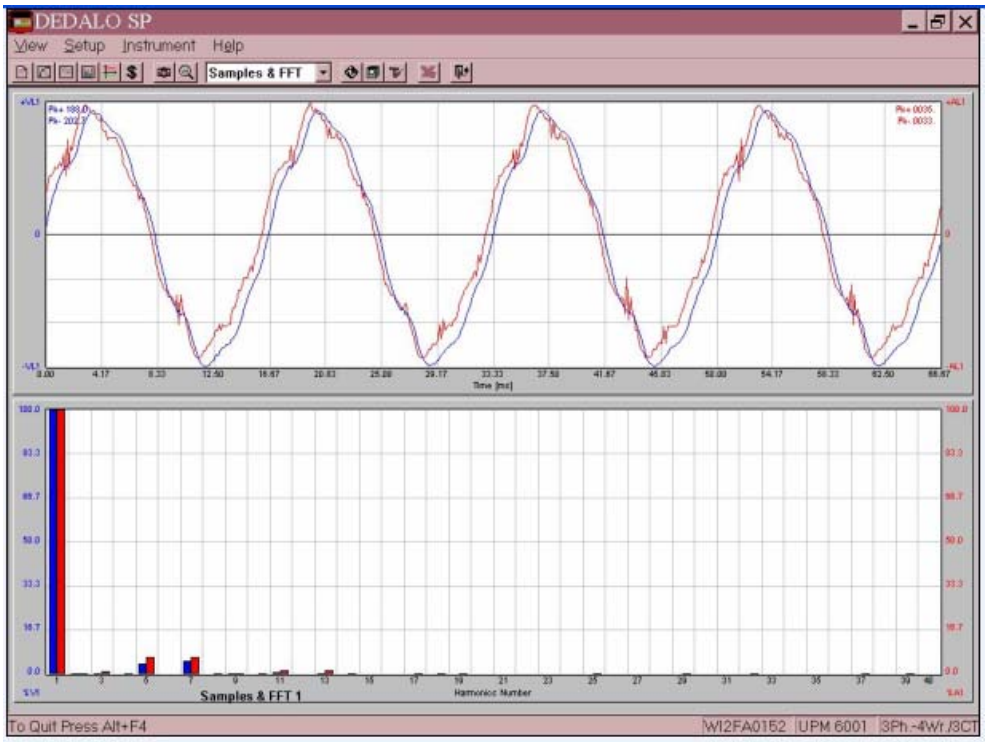


Figura 11.5

Formas de onda real para una línea (muestra) y contenido armónico en la misma, sitio Cabeza de Juárez

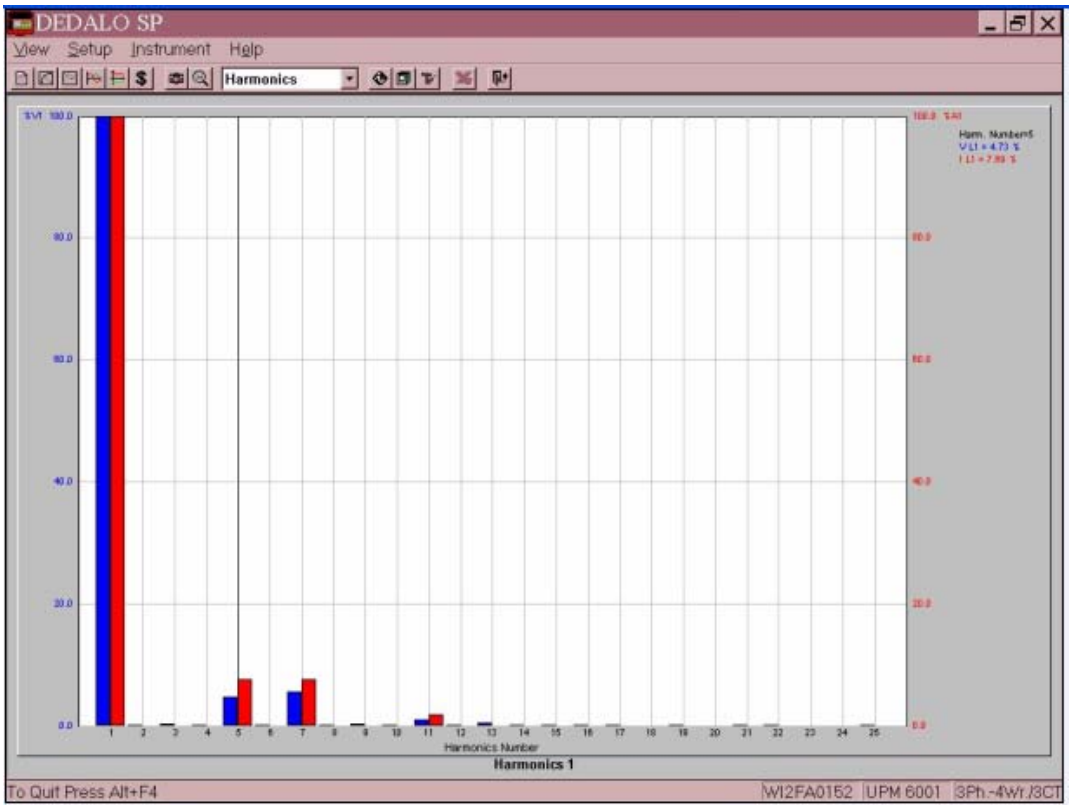


Figura 11.6
Contenido armónico de una sola línea (muestra) , sitio Cabeza de Juárez

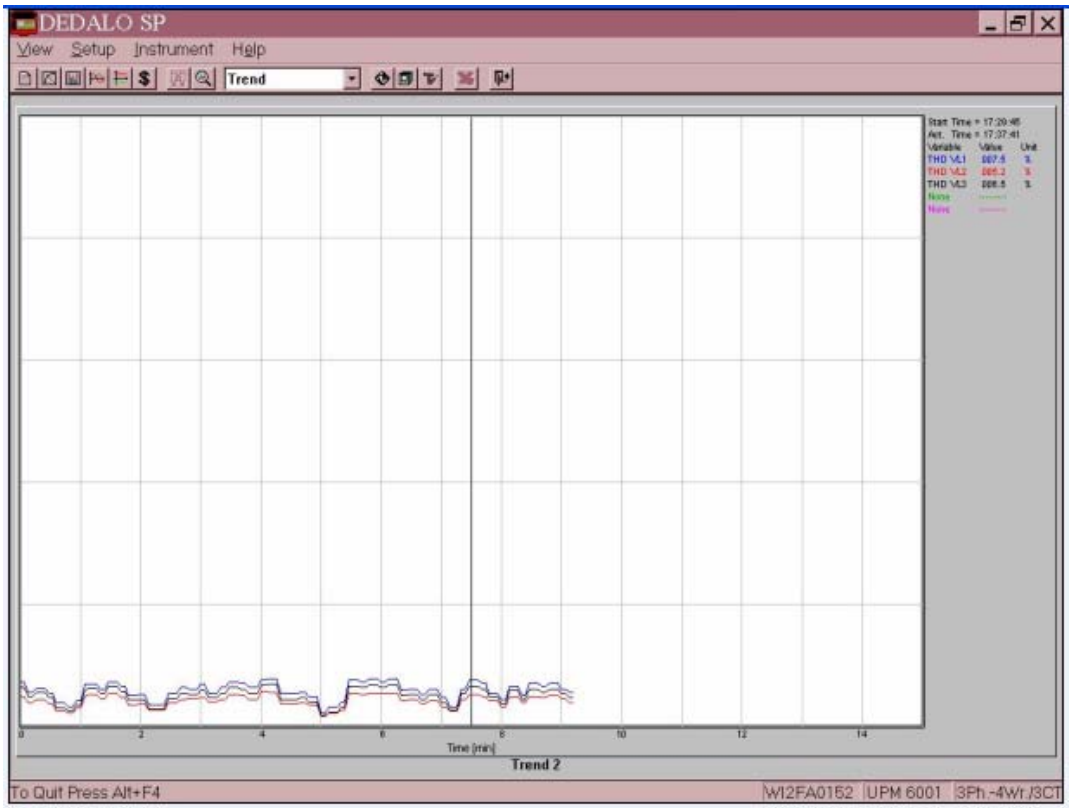


Figura 11.7
Comportamiento de los armónicos promedio de tensión de las tres líneas (muestreo) , sitio Cabeza de Juárez

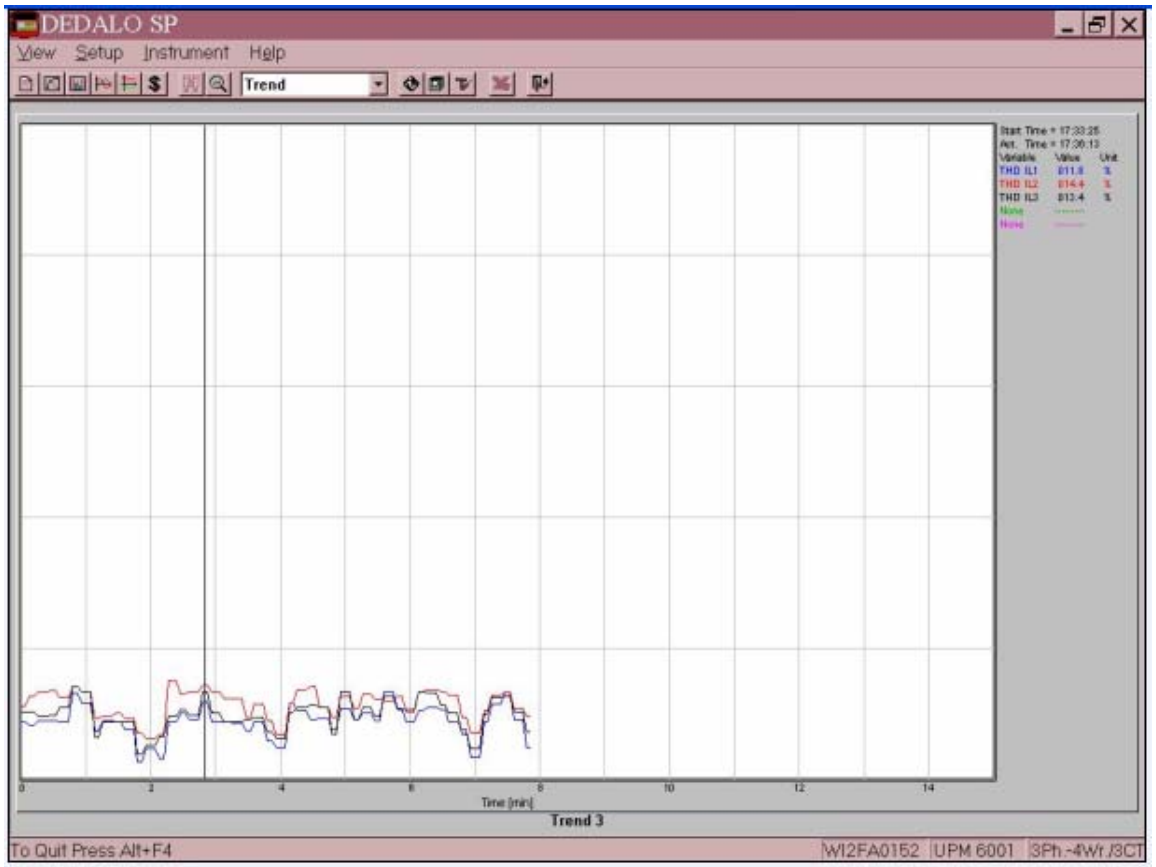


Figura 11.8
Comportamiento de los armónicos promedio de corriente de las tres líneas (muestreo) , sitio Cabeza de Juárez

En el segundo sitio de estudio se analizaron las condiciones de tensión de alimentación de igual manera no se buscó fenómeno alguno sobre transitorios, en cuanto a medición de contenido armónico, la tabla de la figura 11.9 proporciona los valores de los parámetros descritos previamente que entrega el equipo de medición y análisis (datos entregados), no se observa aparentemente ningún problema dado que al ver los valores de los parámetros eléctricos no se distinguen valores que se vean de un valor demasiado grande, pero en lo que respecta a los valores de distorsión armónica TDH se consiguen observar valores altos en TDH de corriente.

Se pueden observar en el lado izquierdo de la figura 11.10 las formas de onda reales de tensión y corriente correspondientes a cada línea; en el lado derecho de la misma se observa el contenido armónico que presentan; ambas figuras son realizadas para un periodo de muestreo. En la parte derecha se puede observar que los componentes de los armónicos tercero, quinto, séptimo, noveno, onceavo y treceavo son los de mayor contribución o participación (peso) en cada línea de la misma forma que se observa en el primer sitio, con la variante de que se observan diferente magnitud.

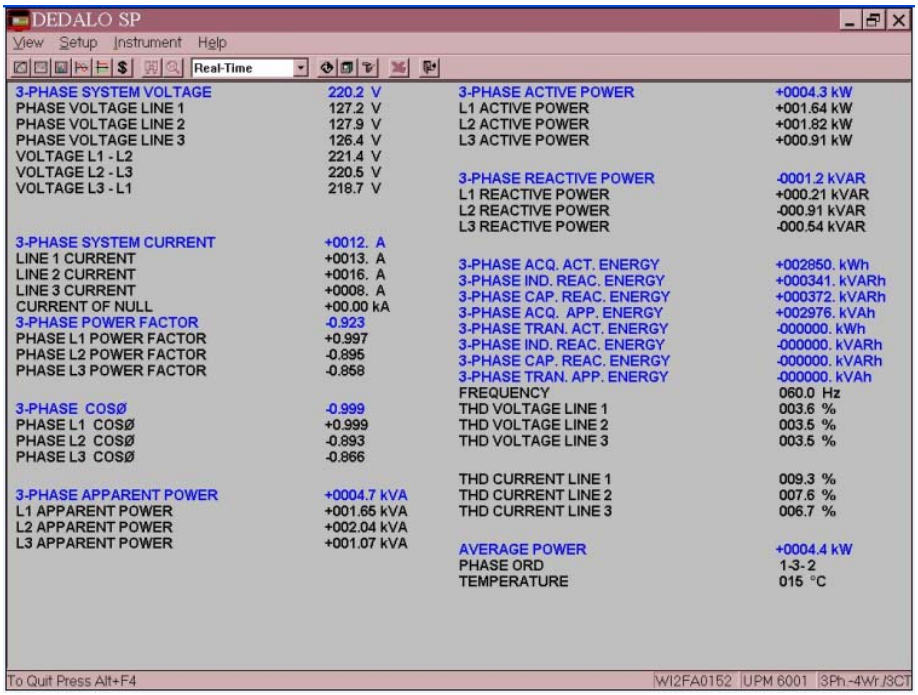


Figura 11.9

Despliegue en pantalla de medición de parámetros promedio en energía de alimentación sitio Coyoacán-Coapa

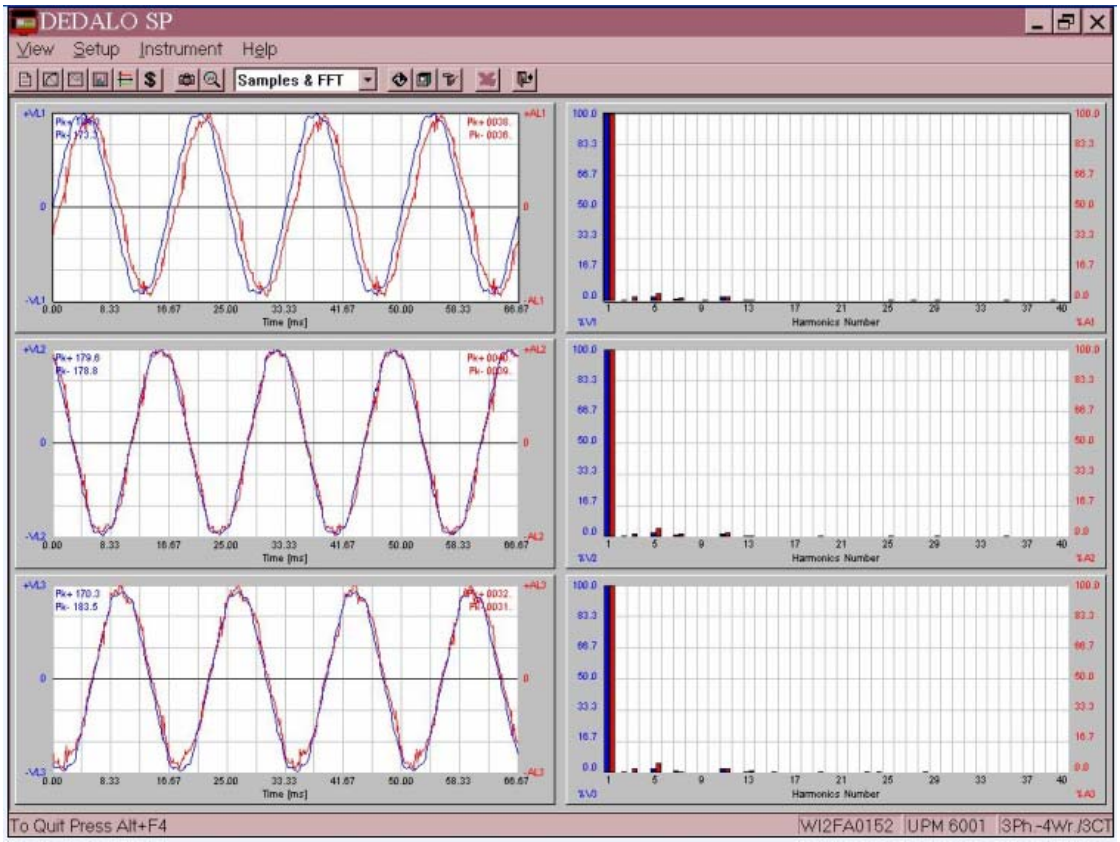


Figura 11.10

Izq. Formas de onda real por línea (muestra) , Der. contenido armónico de voltage y corriente; en energía de alimentación, sitio Coyoacán-Coapa

Una variante de la figura anterior la figura 11.11 presenta el contenido armónico de cada una de las líneas para un periodo de muestreo. En ella es un poco más claro observar la contribución de los armónicos 3ro, 5 to, 7 mo, 9 no, 11 ro, y 13 ro. Como variante de la anterior la figura 11.10 está la figura 11.12 la cual presenta solamente la forma de onda y el contenido armónico de una sola línea (L2, ahora) para un periodo de muestreo. En ella es perceptible de mejor forma que en una de las líneas los armónicos de mayor contribución son el 5 to, 7 mo, 11 ro y 13 ro.

En la figura 11.13 se puede observar que para la línea 1 (L1) las mayores magnitudes de los armónicos que contribuyen son 2 do,3ro, 5 to, 7 mo, 11 ro, y 13 ro, la figura 11.14 denota que para la línea 2 (L2) las mayores magnitudes de los armónicos que contribuyen mayormente son 3ro, 5 to, 7 mo, 9 no y 11 ro, de igual manera se ve en la figura 11.15 que para la línea 3 (L3) las mayores magnitudes de los armónicos que contribuyen en mayor cantidad son 5 to, 7 mo, 11 ro, y 13 ro. En dichas figuras es más claro que en el caso del primer sitio observar que armónicos son los de mayor peso.

Las figuras 11.16 y 11.17 dejan observar el mismo fenómeno que en el otro sitio, es decir, que existe un comportamiento variable de los armónicos de tensión y de corriente respectivamente conforme transcurre el tiempo, lo cual obedece al hecho que la carga en un sitio real es variable en el tiempo, es decir que hay de manera aleatoria entradas y salidas de operación de diversos equipos tanto de los que pertenecen al sitio de telecomunicaciones como externos, es decir que están físicamente en otras localidades pero que están conectados a la misma distribución y que contaminan las líneas. En ambas figuras aún cuando no presentan escala en el eje vertical, se puede observar que los armónicos tanto de tensión como de corriente de las tres líneas para un periodo de muestreo se van siguiendo.

Las observaciones ahora arrojan que, de acuerdo con la tabla 10.1 donde se muestran los límites de distorsión de tensión; que en un sistema menor de 69 KV de capacidad el valor recomendado de TDH en cada elemento armónico no debe ser mayor a 3 % y el promedio de todos los elementos armónicos 5 %; aún cuando los valores de algunas frecuencias armónicas sobrepasan el 3 % el promedio se mantiene por debajo del 5%, lo que indica que los TDH de tensión están dentro de los valores recomendados.

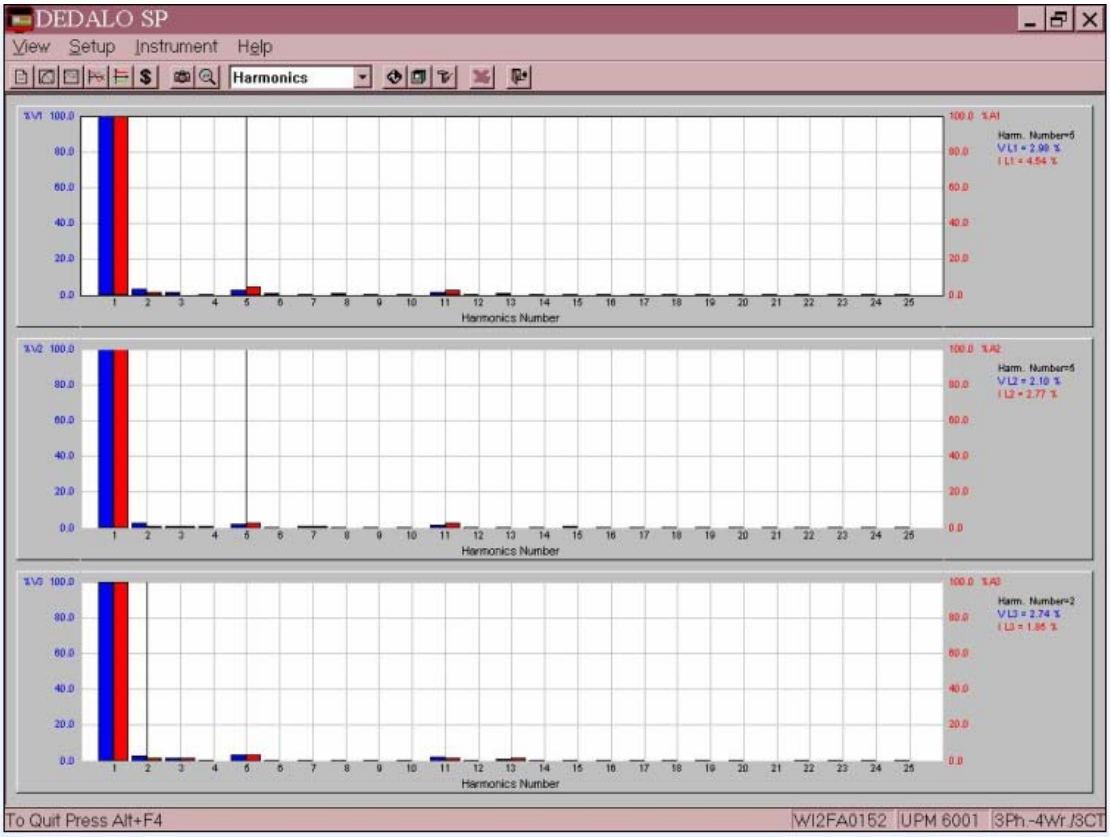


Figura 11.11
Contenido armónico de las tres líneas, sitio Coyoacán-Coapa

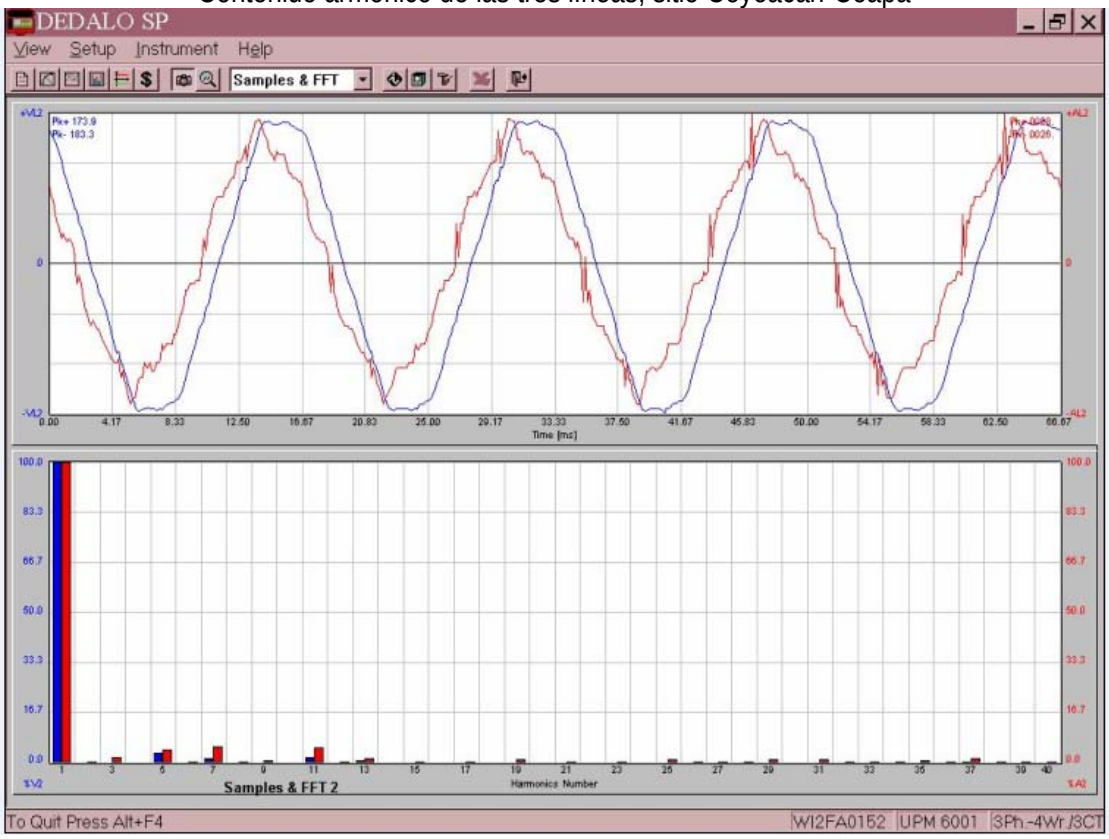


Figura 11.12
Formas de onda real para una línea (muestra) y contenido armónico en la misma, sitio Coyoacán-Coapa

Sin embargo, de acuerdo con la tabla 10.7 donde se muestran los límites recomendados para armónicos de corriente en sistemas de tensión dentro de un rango de 120V y hasta 69 KV; se observa que los valores individuales recomendados para cada elemento no deben ser mayores de, 4.0 para elementos impares hasta el 9no, 1.0 para elementos pares hasta el 10 ^{mo}, 2.0 para elementos impares desde el 11 ^{ro} y hasta el 15 ^{to}, 0.5 para elementos pares desde el 12do y hasta el 16to, 1.5 para elementos impares desde el 17mo y hasta el 21ro, 0.375 para elementos pares desde el 18vo y hasta el 22do, (de mayor importancia, y cantidades en %), se observa también que el promedio no debe ser mayor de 5.0; no es fácil de verificar el valor que presentan los gráficos (aún cuando es más facil que en el caso anterior), pero si es apreciable que en lo que respecta a los armónicos de órdenes 3 ^{ro}, 5 ^{to}, 7 ^{mo}, 9 ^{no}, 11 ^{ro} y 13 ^{ro} (globales y para L1 3ro, 5 ^{to}, 11 ^{ro}, y 13 ^{ro}, para L2 3ro, 5 ^{to}, 7 ^{mo}, 9 ^{no} y 11 ^{ro} y para L3 5 ^{to}, 7 ^{mo} y 11 ^{ro}), dependiendo la línea y la figura observada que las columnas tienen una altura que corresponde a una cantidad mayor que la de la tabla, por otro lado el valor promedio es sobrepasado según la figura 11.9.

Como comentario preliminar llegamos al punto que en ambos sitios el contenido armónico se sale de los valores recomendados por lo que evidentemente tienen problemas de operación. En su momento la firma fabricante y comercializadora de los equipos concluyó que en los otros dos sitios sucedía lo mism, o por lo menos un comportamiento muy semejante. Dando por concluida su investigación de los hechos. El punto de vista personal al respecto viene en la sección 12 del presente (conclusiones), solo debo de aclarar que mi participación en los hechos fue por ser responsable del área de servicio y garantía de la firma comercializadora y fabricante en lo que respecta a los equipos de fuerza.

En éste punto solo falta aclarar que ya no se realizaron estudios de calidad de energía de alimentación en ningún otro sitio de la empresa de telecomunicaciones afectada, simplemente por costo de operación.

Figura 11.13
Contenido armónico de una sola línea (muestra) , sitio Coyoacán-Coapa

Figura 11.14
Contenido armónico de una sola línea (muestra) , sitio Coyoacán-Coapa

Figura 11.15
Contenido armónico de una sola línea (muestra) , sitio Coyoacán-Coapa

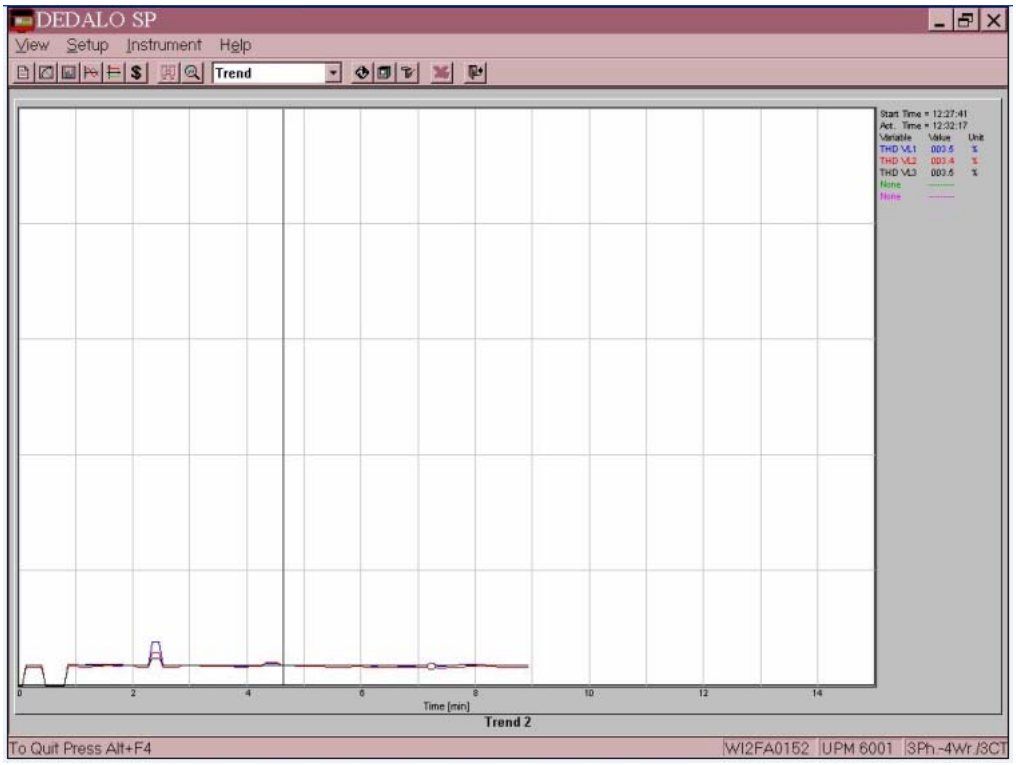


Figura 11.16
Comportamiento de los armónicos promedio de tensión de las tres líneas (muestreo) , sitio Coyoacán-Coapa

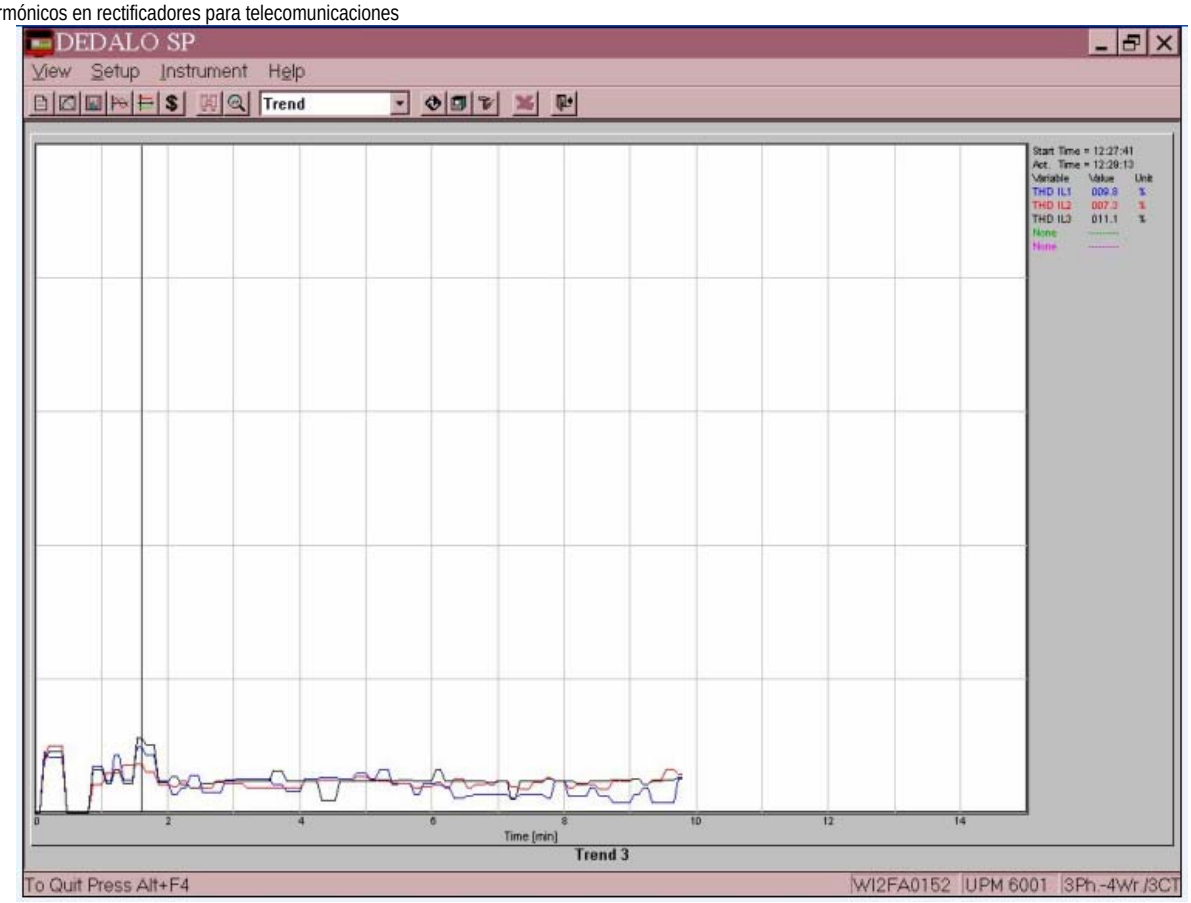


Figura 11.17

Comportamiento de los armónicos promedio de corriente de las tres líneas (muestreo) , sitio Coyoacán-Coapa

Frec armónica	Fundam	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Hz	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440	1500
26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
1560	1620	1680	1740	1800	1860	1920	1980	2040	2100	2160	2220	2280
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
2340	2400	2460	2520	2580	2640	2700	2760	2820	2880	2940	3000	3060

Figura 11.18

Tabla de frecuencias armónicas estudiadas por el equipo auxiliar

Capítulo 12 Conclusiones

12 Conclusiones

12.1 Consecuencias de la utilización de cargas no lineales

Los requerimientos que exigen los sistemas actuales de trabajo que se aplican, en general, piden el empleo de diferentes equipos eléctricos y electrónicos instalados trabajando juntos en una misma oficina, edificio o sala, la instalación y el empleo de cargas no lineales en los sistemas resulta un factor muy importante para el sistema de distribución de potencia eléctrica en su parte final (entregando energía a un área determinada de una empresa, por ejemplo). Tal es el caso de todos los equipos de cómputo entre computadoras personales, equipos de oficina, equipos de aire acondicionado personales, copiadoras entre otros.

En los sistemas fuerza (en general) se incluyen equipos tales como rectificadores, convertidores, dispositivos de descarga, dispositivos magnéticos saturados y máquinas rotativas en menor grado (compresores de equipos de aire acondicionado). Todas las cargas anteriormente mencionadas son no lineales y de dimensiones considerables, son utilizadas en la industria también para una gran variedad de aplicaciones y propósitos, como fuentes de potencia electroquímica, manejadores de velocidad ajustables, fuentes de potencia ininterrumpida UPSes. Dichas fuentes son usuales porque pueden convertir energía de alterna a directa, de directa a directa (cambiando nivel), de directa a alterna y de alterna a alterna (aislando cambiando de nivel para redistribuir).

Las cargas no lineales cambian las características sinusoidales de la señal de alterna con que son alimentados, consecuentemente hay caída de potencia y presencia de corrientes armónicas en el sistema de alimentación, o de otras perturbaciones, lo que puede causar problemas en los circuitos de comunicaciones, asimismo puede causar que los elementos y dispositivos que los conforman como otro tipo de equipos presenten fallas constantes (que incluso pueden parecer inexplicables).

12.2 Efectos de un alto contenido armónico en equipo de rectificación

Dados los conceptos que se han planteado a lo largo del presente trabajo establesco que los efectos sufridos por los equipos de rectificación pertenecientes a los sitios afectados y que son objeto de la presentación de éste estudio se han establecido las las siguientes conclusiones:

El equipo electrónico de potencia es susceptible de mala operación causada por distorsión armónica, prácticamente dependen de la forma de onda y de la exacta determinación de los cruces por cero así como de otros aspectos relacionados con la forma de onda, la distorsión armónica resulta en cambios de los cruces por cero de la tensión o de los puntos en los que una tensión fase-fase llega a ser más grande que otro, ambos son puntos críticos para los circuitos electrónicos de control, y resultan (dados esos cambios) malos funcionamientos o mala operación.

Muchos equipos electrónicos son susceptibles de ser afectados por transmisión de armónicos desde la fuente de potencia o por acoplamiento magnético de sus componentes internos, las computadoras y equipos relacionados como los controladores programables PLCs frecuentemente requieren de fuentes de alimentación con factor de distorsión armónica no mayor del 5%, con valor para el armónico más grande siendo no mayor del 3% de la fundamental, según hemos estudiado en las directrices, los altos niveles de armónicos resultan en funcionamientos ligeramente erráticos de dichos equipos pero pueden en algunos casos tener consecuencias serias, los equipos de instrumentación pueden ser afectados dando datos errados o presentar funcionamientos impredecibles, siendo los más serios los equipos de instrumental médico pues la seguridad de una o varias personas está de por medio, en consecuencia muchos equipos médicos están provistos con acondicionadores de potencia de línea.

Efectos de los armónicos menos dramáticos causan interferencia en equipos de radio, televisión, video grabadoras y sistemas reproductores de de audio, muchos equipos electrónicos son colocados a niveles de potencia menores que sus sistemas de distribución asociados, éstos equipos frecuentemente están expuestos a efectos del ranuramiento de tensión, que frecuentemente introduce frecuencias armónicas y no armónicas, en sistemas de distribución de potencia de 5 KV y mayores, esas frecuencias están en el rango de radio frecuencias y pueden introducir efectos dañinos asociados con falsas radio frecuencias, esos efectos a menudo son de interferencia en la señal introducida en circuitos lógicos y de comunicación, los efectos de la ranuración (ranuramiento) no tienen potencia suficiente para lograr sobrecargar los filtros de interferencia electromagnética y otros circuitos capacitivos similares sensibles a las altas frecuencias.

El comportamiento de cada sitio respecto de todos los otros sitios de telecomunicaciones de su misma especie (por llamarlo de ese modo) es diferente entre sí, no hay forma de precisar en que momento alguna variable que opera en algún sitio se comportará de alguna manera y que ésta saldrá de lo previsto, en otras palabras, en que momento variarán las condiciones de operación sobre los equipos que se han dimensionado previamente bajo proyecto para un determinado sitio de telecomunicaciones, cuando se proyecta o dimensiona equipos debemos pensar siempre en que pueden llegar en algún momento las condiciones a ser las peores.

Comercialmente hablando la mayor parte de las marcas no participan de los proyectos para los que concursan de esa forma y se llega a ver que la ambición de la venta impera sobre las condiciones de ingeniería que los proyectos deben llevar, motivo por el que muchas de las firmas de fabricación y / o comercialización incluso ofertan equipos sin cumplir cabalmente con las condiciones que son solicitadas por los requerimientos técnicos de operación y en otras tantas sin que el producto solicitado como tal sea fabricado por la firma representada, si bien es verdad que se requiere de las ventas para la subsistencia de una empresa también es verdad que debemos como profesionales del ramo se la ingeniería entregar la mejor solución (la cual debe ser nuestra mayor verdad).

Un parámetro o variable que prácticamente no es tomada en cuenta para el dimensionamiento de equipos definitivamente es el contenido armónico, no porque no se vayan a presentar tensiones y corrientes armónicas en un alto contenido (es decir un TDH alto), sino porque realmente la mayor parte de las veces su contenido normalmente es bajo, en especial en los sitios mencionados en el presente trabajo existió una situación que permaneció presente y esa es que los sitios estan sobre edificaciones del mismo consorcio comercial (grupo Carso).

Una de las conclusiones preliminares ante el fenómeno en su momento dada la tensión, el problema potencial y las condiciones comerciales entre las firmas usuaria y fabricante – comercializadora fue que los equipos presentaron defectos de fabricación. Aunque en realidad el efecto de tener un alto TDH se presentó a consecuencia de que la firma usuaria alimenta sus sitios desde un sistema eléctrico (presente en los predios) que tiene conectados muchos equipos de una alta generación de tensiones y corrientes armónicas sobre los que no tiene control ni ingerencia.

Sin embargo en la realidad las investigaciones realizadas por medio de los datos arrojados por los equipos de análisis de condiciones de operación de energía eléctrica de

alimentación mostraron de manera clara el alto contenido armónico tanto en tensión como en corriente presente, sin establecer algún patrón sobre algún fenómeno en la operación que disparase desde un nivel bajo hacia un nivel alto al TDH.

Los equipos de conversión de potencia eléctrica a pesar de haber sido diseñados sobre una plataforma de trabajo duro sufrieron afectación en sus circuitos de control por el alto contenido armónico presente en el sistema de alimetación, al ser observados en sesiones de prueba no presentaron afectaciones ni el comportamiento por el que fueron objeto de reclamo, se mantuvieron trabajando por un largo periodo de tiempo en los talleres de la firma comercializadora y fabricante sin presentar afectación en su servicio, cabe aclarar que las instalaciones de reparación y prueba de los mismos, en otro tipo de predio, no presentaban el mismo problema de contenido armónico alto.

No es posible eliminar las fuentes de armónicos de un sistema sin embargo si es posible minimizar el contenido de armónicos en el mismo por medio de una serie de técnicas y métodos que han sido planteados dentro del presente trabajo, a pesar de ello, aún cuando como profesionales de la ingeniería debemos buscar dar solución tecnológicamente hablando de la mejor forma para los problemas y afectaciones que se nos plantean, es un factor primordial de rendimiento económico el factor de presupuesto con que un proyecto o línea de producto cuenta; de hecho desgraciadamente en muchas ocaciones es el imperante para propósitos de solucionar los problemas

En el caso específico de las unidades de conversión de potencia y de sus aplicaciones en telecomunicaciones desde el inicio de presentar el problema se vieron afectados por aspectos económicos.

La solución de un problema de energía o ingeniería eléctrica tiene prácticamente los siguientes factores a tomar en cuenta su solución:

1. Efectos presentados en el sistema.
2. Estudio de las condiciones de la energía.
3. Búsqueda de las causas.
4. Planteamiento de los métodos y tecnicas de solución.
5. Costeo de las mismas para verificar y tomar decisiones sobre las técnicas a aplicar en la solución.
6. Verificación en el corto madiano y largo plazo de las soluciones.

12.3 Trabajo conjunto áreas responsables

Durante la elaboración de un proyecto nuevo o de crecimiento de infraestructura a instalar para las firmas de telecomunicaciones todas las firmas que participan deben trabajar en forma interdisciplinaria mediante sus departamentos de ingeniería (civil, mecánica, eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones), analizando y estudiando las características y restricciones que cada una de ellas va requisitando a la(s) otra(s) para poder realizar y garantizar su trabajo, pensando en un esquema de clientes internos – externos.

En la experiencia recabada en el presente trabajo escrito, de los sitios con falla en suministro de fuerza para los equipos de telecomunicaciones, resulta paradójico pensar que en el consumo de más de un millón de dolares en equipo de fuerza (hasta el momento de las fallas) en el proyecto de ampliación y renovación de plantas de fuerza del país no se haya dado prioridad por parte de la empresa de telecomunicaciones usuria (compradora) al estudio adecuado de las condiciones de operación de los equipos de suministro de fuerza, sus requerimientos así como del trabajo conjunto de los departamentos correspondientes tanto en la empresa de telecomunicaciones como en la fabricante y comercializadora para la obtención de los mejores resultados operativos y funcionales.

Para la firma fabricante de equipos el no haber tenido como encausar el problema hacia los fenómenos transitorios que la naturaleza tiene representó un problema mayor pues ya no había argumento para poder establecer una nueva venta de equipos supresores de transitorios. Desgraciadamente las firmas en nuestra nación son demasiado conflictivas y especiales para las cuestiones de gastos, en especial hay personas sobre las que se encuentra la responsabilidad del servicio y soporte quienes su visión real o su visión empresarial o su visión gasto – beneficio o su visión de interéses (propios) dentro de la estructura de la empresa está nublada o simplemente viciada y buscan prácticamente realizar el mínimo de gastos posible con el objetivo de no mermar sus números (no impactar sus indicadores de facturación y calidad en sus parámetros resultantes).

Porque un número mermado habla mal de un departamento. Sin comprender correctamente que la relación usuario final – cliente (comprador) – fabricante (distribuidor) siempre debe ser de beneficio mutuo en la que los gastos de operación que se deban tener son consecuencia de la propia operación y / o simplemente se gasta lo

que se deba gastar en la responsabilidad de las decisiones que se hayan tomado desde el(os) planteamiento(s) de los requerimientos del proyecto.

Así que la renta del equipo de estudio por el periodo de tiempo que se estimaba necesario representaban un costo de $ 30000.00 pesos en promedio aún cuando era un problema de mucha fuerza potencial, la gerencia responsable del área de servicio y soporte en la empresa en cuestión no accedió de manera pronta a la autorización de la renta de dichos equipos, tuvo que ser presionada por la gerencia de ventas a empresas celulares vía la gerencia general y no fue sino después de dos semanas de la aparición de los fenómenos de falla que se instalaron los equipos de prueba.

Para el tiempo en que se instalaron los equipos en los sitios los fenómenos meteorológicos ya habían disminuido demasiado en su frecuencia en la cuidad de México, y representaba un costo mucho mayor intentar perseguirlos en las otras plazas en que se tenía conocimiento del problema, estamos hablando de entre $ 45000.00 y $ 50000.00 por sitio, resulta obvio hablar de que no se instalaron equipos de monitoreo en dichas plazas, razón explicada dos parrafos antes).

En conclusión respecto del punto, si bien es cierto que en muchos casos la intuición o experiencia, como cada persona maestro, ingeniero o técnico quiera llamarle, que el responsable real de soporte tiene para la solución de problemas, es necesario que se tenga la mente abierta para encontrar el punto en el que las evidencias hablen de la necesidad de realizar investigaciones adicionales independientemente de los gastos que éstas representen, haciendo de lado también sus Interéses particulares con sus indicadores. Se supone que en realidad tenemos un concepto (o ente) llamado ética profesional, el cual en la realidad (por desgracia) es nulamente o en el mejor de los casos poco apreciado.

Todo proyecto de innovación o expansión que implique cualquier tipo de equipos de tecnología a montar y por tanto a comprar y vender requiere que tanto que la empresa usuaria como la fabricante trabajen en conjunto en el análisis total de todas y cada una de las variables que dentro del proyecto impliquen con el objetivo de obtener el funcionamiento y las mejores condiciones de trabajo de los equipos para obtener de los mismos el mayor beneficio económico – operativo así como el contar con elementos suficientes para rastrear las condiciones que puedan presentarse como problemas.

Por el lado de Servicio y soporte o Ingeniería de campo muchas veces no llegan a ser suficientemente intuitivos y llegan a ser mezquinos llegando incluso a una

irresponsabilidad tecnológica, por así decirlo; ya que por ahorrar simplemente por el hecho de ahorrar unos pocos miles de pesos, puede llegar a costar un conflico comercial de trascendencia.

Cabe aclarar que al no ser dueños de la ingeniería sobre el producto no se llegó a realizar reingeniería [reprocesos, rediseños ni retrabados], es decir no hubo mejora del producto en su ingeniería como consecuencia de las observaciones detecciones y mediciones realizadas; de hecho como se planteó el presente trabajo cumple con establecer estratégias y métodos para detectar y plantear la corrección del problema de alto contenido armónico en la alimentación ac sucitado en un tipo de equipos de rectificación por alta frecuencia cuyo impacto en la infraestructura nacional de telecomunicaciones puede resultar en un alto nivel de recursos de servicio y soporte a destinar.

12.4 Evaluación de fuentes armónicas adicionales a un sistema

En general siempre a un sistema que ya estê funcionando serán conectados equipos adicionales, por ello es recomendable detectar y realizar mediciones constantemente en un sistema y registrar las mismas para llevar un histórico, con ello se puede realizar un análisis constante y llevarlo incluso a un nivel de plan de trabajo constante es decir un proceso de planeación y revisión constante del propio sistema.

Si en el sistema se tienen o no identificadas las fuentes de armónicos no importa es recomendable emplear dichas técnicas. Un procedimiento de análisis armónico en general tiene los siguientes puntos (en su base).

- Identificación del objetivo del análisis de contenido armónico
- Desarrollo de un modelo del sistema
- Detección medición y registro del contenido armónico
- Simulación
- Toma de estrategias de solución

Todo análisis de contenido armónico debe tener un(os) objetivo(s) de manera que de el(los) dependa el estudio a ser realizado.

En dicho análisis será necesario incluir:

- Niveles característicos de armónicos

- Evaluaciuón de los problemas que pueda tener el sistema atribuibles a los mismos
- Evaluación del impacto del contenido armónico producido en la carga y en el sistema
- Evaluación de los equipos para el control del contenido armónico

En cuanto a la realización de un modelo, si es posible realizar simulaciones para identificar previamente los niveles de contenido armónico que se habrán de esperar, de esa manera visualizar la respuesta del sistema. Realizando lo anterir a diferentes condiciones de operación para identificar potencialmente el comportamiento del sistema.

Hay que evaluar, en éste punto, el impacto potencial de cada una de las fuentes de armónicos, de manera que se puede ir verificando si los armónicos van quedando dentro de los niveles aceptables.

Si se identifica en éste punto un alto nivel de contenido armónico será necesario desarrollar soluciones.

La detección, medición y registro del contenido armónico debe ser realizada en pro de la mejora de la investigación con el objetivo de:

- Caracterizar niveles existentes de contenido armónico característicos
- Identificar condiciones estadísticas (comportamiento)
- Determinar fuentes características de armónicos
- Validar modelos

Se puede usar un convertidor de energía (rectificador, convertidor, inversor, etc..) para determinar la inductacia del sistema si se encuentra bajo conducción continua (trabajando constantemente). Lo anterior mediante la medición en un osciloscopio del área de la ranura (muesca, o notch) y la corriente mínima o corriente de conmutación.

Para validar el modelo del sistema será necesario evaluar, si posible mediante simulación por medio de algún software especializado, diferentes resultados bajo diferentes condiciones de operación con el objetivo de tener una directriz del comportamiento del sistema de menera que se pueda inferir como se mueven las variables por anticipado (saber hacia donde va).

Tomando en cuenta los siguientes puntos:

- Condiciones de operación asociadas a las condiciones de campo.
- Todas las configuraciones posibles (a ser estudiadas).
- Incluir posibles condiciones de operación futuras.
- Determinar nuevas posibles fuentes de armónicos.
- Simular parámetros de equipos y procedimientos de operación para control de armónicos.

Todo lo anterior se resume en el desarrollo de posibles soluciones sobre el problema de armónicos tanto presente como potencial (futuro e. i. anticipar situaciones). Se puede incluir:

- Restricciones de operación
- Cambios en la configuración del sistema
- Filtros de armónicos
- Reducción de acoplamiento de circuitos de comunicaciones y telefonía

12.5 Alarmas

La primera conclusión es más referible al aspecto de diseño de los equipos de suministro de fuerza sobre la generación de las alarmas (avisos) con que cuentan. Es comprensible que al inicio de la utilización de los sistemas de fuerza para alimentación de equipos de telecomunicaciones, los sistemas o plantas de fuerza contaran con un solo rectificador (principalmente) y que su respaldo (redudancia) significara tener un segundo rectificador. Es necesario hacer un comentario funcional, todo sistema de fuerza completo, planta de fuerza modular o integrada así como cada equipo por separado genera avisos (alarmas) sobre acontecimientos (no necesariamente fallas) o problemas que suceden. Depende del modelo y la tecnología de cada equipo así como de la marca de cuales son los avisos que genera, hay dos avisos que en especial competen a la presente conclusión o comentario, clásicamente los sistemas de potencia o plantas de fuerza cuentan con dos avisos (alarmas) MINOR y MAJOR normalmente en equipos clásicos visuales con diodos emisores de luz (led) rojos que avisan algunos acontecimientos en el sistema de fuerza.

Pienso que deberían (en los inicios de los sistema de fuerza) de haber hecho un circuito de control para esos avisios pues desde el punto de vista de los departamentos o áreas de servicio de las marcas fabricantes resulta demasiado molesto que reciban llamadas en días y horas no hábiles porque el personal de las empresas de telecomunicaciones no sabe interpretar los avisos de la forma adecuada. Sin embargo comprendo que fueron

diseñados y fabricados de manera funcional y para crecimiento practicamente modular. Lo que habla que en las empresas de telecomunicaciones les ha hecho falta el contratar la capacitación adecuada para el personal de soporte en el funcionamiento de los sistemas de fuerza pues definitivamente día a día hacen evidente ver su falta de conocimiento, no con ello quiero decir que tengan mal calificado su personal pues definitivamente la mayor parte de ellos son personal ampliamente capacitado en las tecnologías de telecomunicaciones que manejan, lo que si digo es que en un campo que requiere de un conocimiento tecnológico de menor capacidad intelectual, no han tenido el cuidado adecuado motivo por el cual se ven en clara desventaja para interpretar los mensajes y solucionar problemas (los cuales en ocaciones en realidad no son problemas).

Pues es necesario saber los porques en su caso son iluminados los avisos (alarmas) MINOR y MAJOR así como la combinación de los leds que se iluminan junto con los mismos avisos indica la gravedad de suceso en el sistema de fuerza.

12.6 Corrección del factor de potencia

En toda instalación industrial, para el mejor aprovechamiento de los recursos financieros es necesario que se tenga un factor de potencia cercano a 1, para ello las empresas en general realizan compensación de potencia, Cuando se hace se busca balancear al máximo posible la potencia reactiva, dicha compensación normalmente es realizada mediante bancos de capacitores pero en su empleo pueden ocurrir condiciones de resonanacia, que pueden resultar en altos niveles de tensiones armónicos y corrientes de distorsión cuando ocurren condiciones de resonancia en frecuencias múltiplos de 60 Hz (armónicas) con cargas no lineales.

Por tanto es necesario efectuar una evaluación y estudio de potencias eléctricas para visualizar comportamiento impacto y corrección.

Capítulo 13 Conceptos, definiciones y biliografía

Las definiciones y conceptos que se compendian en el siguiente apartado / sección están directamente y específicamente relacionados con los convertidores estáticos de potencia / energía operando en frecuencia de una red de distribución eléctrica comercial - convencional.

13.1 Conceptos y definiciones

alarma	Es un aviso de un evento en un sistema de fuerza, no necesariamente anuncia un evento que signifique un problema mayor o desperfecto en algún elemento del sistema de fuerza
área de la muesca (ranura)	Es el área de la muesca que presenta la tensión de una línea, es el producto de la profundidad de la mues-ca, en volts, por la duración de la muesca medida en μseg.
armónico	Componente senoidal periódica de una onda o cantidad que tiene una frecuencia que es un múltiplo de la frecuencia fundamental
armónico característico	Es el armónico producido (durante su operación normal) por un equipo convertidor de energía cuya tec-nología es a base de semiconductores. En un convertidor de energía de seis pulsos (seis semiconductores) los armónicos característicos son de orden impar (sin ser múltiplos de 3) 5to, 7mo, 11ro, 13ro, etc. $h = kq \pm 1$; k = un entero, q = número de pulsos del convertidor (semiconductores)
armónico no característico	Es el armónico producido (en operación normal) por un equipo convertidor de energía cuya tecnología es a base de semiconductores. Es(son) el(os)armónico(s) que resultan de las diferencias entre pares de fre-cuencias de signos contarios que produce una señal al combinarse en un circuito no lineal; es decir, resul-tan de una demodulación entre los amónicos característicos y la fundamental, o de un desbalance en el sistema de potencia de alterna, o por ángulo de retraso (retardo) asimétrico u operación de cicloconvertidor
avalancha térmica en una batería - runaway	Incremento de temperatura en una celda de batería causada por una corriente excesiva en un borne (porque el eslabón no tiene el torque adecuado) lo que aumenta el calor en el borne que provoca una avalancha térmica en el mismo y su falla por exceso de corriente; normelmente se le hace un boquete alrededor dl borne a la celda
bus	Grupo de elementos conductores eléctriicos baras o cables que sirven de conexió comú entre cicuitos de carga y cada una de las polaridades fases de la fuente de potencia eléctrica
bypass (desviación)	Es una vía de derivación (o desvición) alrededor de uno o varios elementos de un circuito

carga no lineal	Es una carga que infiere una forma no seniodal cuando es suministrada desde una fuente que le entrega una senoidal
compensador de derivación (shunt compensator)	Trabaja como una fuente de corriente controlable
conmutación	Transferencia unidireccional de corriente entre los elementos semiconductores (diodos o thrystores) que forman parte de un convertidor estático de potencia que conducen en secuencia
convertidor	Equipo, sistema o dispositivo que cambia energía de una forma a otra. Un convertidor semiconductor es un convertidor que utiliza tecnología basada en dispositivos semiconductores como los elementos activos (principales) para ralizar la conversión de potencia
crossover	Interferencia en una línea o cable debido a la inducción del campo de otro conductor
c message	Es llamada también frecuency weighting y es usada para coparar las variaciones en los aparatos tipo 500 (de telefonía convencional) poniendo la eficiencia de sus transductores a las variaciones de frecuencia de los tonos
desplazamiento, factor de potencia en el convertidor	La componente de desplazamiento del factor de potencia, la razón entre la potencia activa, en watts, y la potencia aparente, en voltampers, de la fundamental; incluyendo la corriente de exitación del transformador del convertidor de energía de tecnología con base en thrystores
desviación (*from*) de una señal senoidal	Medida simple un escalar (un número) de la distorsión de una senoidal debida a componentes armónicas. Es igual a la relación entre el valor absoluto de la máxima diferencia entre la onda distorsionada y el valor de cresta de la fundamental
distorsión armónica total TDH	Define el factor de distorsión total para tensión y corriente. Ver factor de distorsión o factor armónico
distorsión total de demanda TDD	La distorsión total (raíz de la suma de cuadrados) de la corriente armónica, en porciento de la corriente de demanda máxima (15 o 30 min de demanda)
efectividad del filtro de derivación	Queda definida por dos términos ρ_f = razón de impedancia que determina la corriente por unidad que fluirá en un filtro de derivación (shunt filter) ρ_s = razón de impedancia que determina la corriente por unidad que fluirá en la fuente de potencia ρ_f podría aproximarse a 1 y ρ_s podría ser muy pequeña en la frecuencia sintonizada
Estado de salud de una batería	Significa que de acuerdo con las recomendaciones la batería se comporte conforme a las tablas y funciones del fabricante, entre más apegado se esté a las recomendaciones en las condiciones de operación de la batería, mejor respuesta y mejor calidad de vida presentará

factor armónico La razón del valor RSS (raíz de la suma de cuadrados) de todos los armónicos respecto del valor RMS de la fundamental

$$HF\ (V) = \frac{\sqrt{E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 + \ldots}}{E_1} \qquad HF\ (I) = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \ldots}}{I_1}$$

factor de calidad Dos π veces la razón entre la máxima energía almacenada y la energía disipada por ciclo a una frecuencia dada. Una aproximación equivalente es que Q es la razón entre la frecuencia resonante y el ancho de ban-da entre aquellas frecuencias en lados opuestos a la frecuencia resonante, donde la respuesta de la es-tructura resonante difiere 3 dB desde la resonante

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

factor de distorsión o factor armónico La razón de la RMS del contenido armónco respecto de la RMS de la fundamental, expresada como un porcentaje de la fundamental

$$DF = \sqrt{\frac{sumadecuadradosdeamplitudesdtodoslosvoltajesarmónics}{cuadradodeamplituddelvoltajedelafundamental}} \cdot 100\%$$

factor de influencia telefónica, TIF Para una onda de tensión o corriente en un circuito de sumistro es la razón ente la raíz cuadrada de la su-ma de los cuadrados de los valores RMS pesados de todos los componentes de la onda senoidal (incluyendo las ondas senoidales de alterna tanto fundamental y armónicas) y los valores RMS (no pesados) de la onda completa

factor de la razón de impedancia La razón de la impedancia de la fuente en el punto de el sistema bajo consideración respecto de la impe-dancia total equivalente de la fuente a los elementos del circuito de conversión (semiconductores) que conmutan simultáneamente

factor de potencia total La razón entre la potencia activa, en watts, y la potencia aparente, en voltampers, de la fundamental desde la entrada del convertidor de energía
(1) Incluye el efecto de las componentes armónicas de tensión y corriente (distorsión), el efecto del despla-zamiento de fase entre la corriente y la tensión respecto de la corriente de exitació del transformador. Volt-ampers son el efecto del producto de la tensión RMS y la corriente RMS
(2) El factor de potencia es determinado en las terminales de ac del convertidor de energía

filter, damped Generalmente un filtro consiste de la combinación de elementos pasivos entre capacitores, inductores y resistencias que han sido seleccionados para presentar una baja impedancia sobre una banda de frecuencias amplia, un filtro generalmente tiene una Q (X/R) relativamente baja

filtro Describe aquellos tipos de equipos cuyo propósito es reducir el contenido de corrientes y tensiones armónicas que fluyen dentro o son aplicados sobre partes específicas de un sistema eléctrico de potencia

Filtro EMI Filtro para interferencias electromagnéticas

filtro de shunt Un tipo de filtro que reduce armónicos proveyendo una vía de baja impedancia para derivar (desviar) los armónicos lejos del sistema a ser protegido

filtro pasa altas Un filtro que tiene una banda extendida desde una frecuencia de corte (sin ser cero)

hacia la frecuencia infinita, por lo que permite el paso de las señales que se encuentren dentro de la banda desde la frecuen-cia de corte hacia arriba

filtro serial — Un filtro que reduce armónicos mediante la colocación de varios filtros de alta impedancia en serie entre la(s) fuente(s) de armónicos y el sistema a ser protegido

filtro sintonizado — Un filtro consiste de la conbinació de elementos pasivos (resisencias, capacitores e inductores) los cuales han sido seleccionados de manera que presenten impedancia mínima (relativa) para una gama de fre-cuencias específica, para un filtro de derivación (shunt filter) la impedancia es mínima; los filtros sintonizados generalmente tienen una impedancia relativamente alta Q ($_{X/R}$)

hysteresis — Es un efeco de oscilación de una variable eléctrica donde un valor dado de un par operativo puede resultar en multiples valores de frecuencia o potencia de salida; en otras palabras donde una variable toma un camino en aumento y otro camino al descender; es decir dos caminos diferentes alrededor de un valor determinado

máxima desviación teórica de una señal senoidal — Es la razón de la suma aritmética de las amplitudes ($_{RMS}$) de todas las armónicas en la onda respecto de la amplitud ($_{RMS}$) de la fundamental

muesca (ranura) de la tensión de línea — Es el desenso de la tensión de la fuente en un convertidor de energía debido a el cortocircuito momentáneo de las líneas de ac durante un intervalo de conmutación, es el desenso momentáneo en la tensión de la fuente causado por las caídas en el circuito de la fuente durante las altas razones de cambio en corrientes ocurriendo en las líneas de ac durante conmutación

número de pulsos (pasos) — Número total de conmutaciones sucesivas no simultáneas que ocurren dentro de un convertidor de energía durante cada ciclo cuando opera sin control de fase. También es igual al orden del armónico principal en la tensión directo, es el número de pulsos presente en la tensión de dc de salida en un ciclo de la tensión de suministro

pendiente de compensación – slope - — Es la pendiente de la función de la compensación que requiere ajustar la tensión de salida del sistema de fuerza

producto IT — Influencia inductiva expresada en términos del producto de la magnitud de su corriente $_{RMS}$ en ampers multiplicada por el factor de influencia telefónica TIF

producto kVT — Influencia inductiva expresada en términos del producto de la magnitud de su corriente $_{RMS}$ en kilovolts multiplicada por el factor de influencia telefónica TIF

profundidad de muesca (ranura) — Es el promedio de las profundidades de las muescas (o ranuras) que tiene una onda de tensión de línea

razón de corto circiuto — Para un convertidor de energía basado en semiconductores, es la razón de la capacidad de corto circuito de las barras colectoras (bus), en MVA, en el punto de conexión del convertidor de energía respecto de la razón del convertidor en MW

resistencia de shunt — Es una resistencia de baja relación y de respuesta lineal; es decir que su función V v.c I es totalmente lineal

regulador derivado (shunt regulating)	Provee una vía para la tensión de una fuente hacia tierra através de una resistencia variable (como un divisor de tensión. LA corriente através del shunt regulator es dividida lejos de la carga y fluye hacia tierra, haciendolo eficientemente
scanned	Barrido y análisis de todas los puntos posibles de un concepto tecnológico o documento o frecuencias de un espectro
sheeding	Descarga de cargas (equipos de telecomunicaciones) en la que se van abriendo los contactores desconectando las cargas de acuerdo a ajustes que se programan en un sistema por control de microprocesador o que se ajustan en un sistema convencional, cuando esa característica es soportada por el propio sistema
spurious RF	Radio frecuencias falsas / no auténticas, hay dos posibles fuentes RF e IF (radio frecuecias e interferencias) se presentan en la vecindad de los circuitos acústicos
stand by	Mantener una reserva, es decir mantener un equipo listo y en reserva para operar cuando sea requerido

13.2 Tabla de Símbolos

	Significado del subíndice
0	Sin carga, en vacío
1	A plena carga, carga total
d	tensión o corriente en directa
h	Orden del armónico
i	Ideal
l	Lado del convertidor de energía en el transformador, fase-fase
L	Lado de la línea del transformador
p	Inherente
pu	Cantidad por unidad
s	Lado del convertidor de energía en el transformador, fase-neutro

	Significado de la líteral simbólica
α	Ángulo de retraso o retardo
γ	Ángulo de margin para inversores
μ	Ángulo de conmutación
ρf	Razón de impedancia del filtro
ρs	Razón de impedancia de la fuente
$\cos\phi 1$	Factor de desplazamiento de potencia (incluyendo la corriente de exitación del transformador)
$\cos\delta$	Componente de distorsión del factor de potencia
a_h	Amplitud del término seno para el armónico h en epansión de Fourier (valor de cresta)
b_h	Amplitud del término coseno para el armónico h en epansión de Fourier (valor de cresta)
c_h	Amplitud del término resultánte para el armónico h en epansión de Fourier (valor de cresta)
E_{CW}	tensión de cresta de trabajo

E_d tensión de directa promedio bajo carga

E_{d0} tensión de directa teórico (tensión de directa promedio sin carga, en vacío, o a transisión ligera de carga asumiendo caída de tensión de control de fase cero realimentado

E_{dl} tensión de directa relacionado

E_{dx} tensión de conmutación

E_f Caída de tensión total realimentado por elemento del circuito

E_{ii} tensión de reversa inicial

E_L tensión línea – línea de ac del sistema

E_n tensión línea – neutro de ac del sistema

E_r Caída de tensión de directa causada por pérdidas en la resistencia de los equipos transformadores, más las interconexines no incluidas en E_f

E_s tensión línea – neutro $_{RMS}$ en el devanado secundario del transformador dc

E_x Caída de directa causada por la reactancia de conmutación

f Frecuencia del sistema de ac

F_x Factor de la reactancia de conmutación I_cX_c/E_s

I_{cl} Corriente $_{RMS}$ en el devanado secundario del transformador

I_d Corriente promedio de dc de la carga del rectificador en Ampers

I_e Corriente de exitación del transformador

I_g Corriente directa conmutada entre dos elementos de rectificación en un grupo de conmutación simple

I_h Componente armónica de I del orden indicado por el subíndice, la cual es la componente armónica totalizada de I_L

$$I_H = \sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2}$$

I_L Corriente de línea $_{RMS}$ de alterna

I_m Valor de cresta de la corriente de línea de alterna

I_p Corriente en el devanado primario del transformador

I_s Corriente de línea $_{RMS}$ en el devanado secundario del transformador dc

I_l Componente fundamental de I_L

I_{lp} Componente de potencia de I_l

I_{lq} Componente reactiva de I_l

L_d Inductancia del reactor de dc, en Henrys

n Número de convertidores

p Número de pulsos del grupo de coversión

p_r Pérdidas de carga en el transformador, en Watts (incluyendo las pérdidas debidas a resistencia y corrientes de Eddy)

P_d Potencia de salida, en Watts

q Número de pulsos del covertidor de energía

R_c Resistencia de conmutación línea – neutro de un conjunto de grupos de conmutación, en Ohms

R_{cn} Resistencia equivalente de conmutación línea – neutro, en Ohms, para un conjunto de grupos de conmutación referidos al devanado primario (ac) del transformador de un convertidor de energía

R_g Resistencia de conmutación línea – neutro de un solo grupo de conmutación, en Ohms

R_p Resistencia efectiva del devanado primario (ac)

R_s Resistencia efectiva del devanado secundario (dc)

S Factor de circuito [1 para medio puente / un solo camino o brazo, 2 para puente completo / dos brazos

THD Distorsión armónica total

V_h Componente armónica de tensión del orden indicado por el subíndice, la cual es la componente armónica de tensión total

$$V_H = \sqrt{\sum_2^{\infty} V_h^2}$$

X_c Reactancia de conmutación línea – neutro, en Ohms, para un conjunto de grupos de conmutación

X_{cpu} Reactancia de conmutación por unidad

X_{cn} Reactancia de conmutación equivalente línea – neutro, en Ohms, para un conjunto de grupos de conmutación referidos al devanado primario (ac) del transformador del convertidor de energía

X_g Reactancia de conmutación línea – neutro, en Ohms, para un solo grupo de conmutación

X_L Reactancia de la línea de suministro, en Ohms (por línea)

X_{Lpu} Reactancia de la línea de suministro por unidad, expresada en base a los voltampers relacionados en las terminales de la línea del devanado primario del transformador (ac)

X_{Tpu} Reactancia de la línea de suministro por unidad, expresada en base a los voltampers relacionados en las terminales de la línea del devanado primario del transformador (ac)

Z_c Impedancia de conmutación línea – neutro, en Ohms, para un conjunto de grupos de conmutación

Z_{cn} Impedancia de conmutación equivalente línea – neutro, en Ohms, para un conjunto de grupos de conmutación referidos al devanado primario (ac) del transformador del convertidor de energía

Z_g Impedancia de conmutación línea – neutro, en Ohms, para un solo grupo de conmutación

13.3 Biliografía

1. Marconi Communications de México (Reltec, México), Manual de tecnología básica de operación de equipo de fuerza Lorain, Èste manual (carpeta) no es exactamente un libro como tal, sino que es un compendio de apartados que contiene en general puntos básicos de la teoría sobre la que se basa el funcionamiento (según su tecnología) de equipos de fuerza Lorain, compreniendo el mismo diferentes secciones; Rectificadores, Convertidores, Inversores, Sistemas de señalización y control, Gabinetes y Estructuras, Bahias de distribución y Sistemas de fuerza (plantas) modulares y estructurables.

2. DC Power Systems Handbook (075-053-10 rev e), of Technical services and costumer support, Argus technologies Ltd.

3. Marconi Communications de México seminário de fuerza 2001, Ciudad de México

4. IEEE recomendad prectices and requirements for harmonic control in electrical power systems, guide IEEE 519

5. Redes eléctricas, Primera parte, Jacinto Viqueira Landa, Representaciones y servicios de igeniería S.A. de C.V., México 1986