



DISTURBIOS ELÉCTRICOS

Introducción.

La generación y uso de la energía eléctrica de forma completamente continua y a voluntad se remonta a finales del siglo XVIII cuando el físico italiano Alessandro Volta inventa la pila³, precursora de la batería eléctrica, la cual mediante una reacción química logra transformar la energía química en eléctrica. Es a partir de este descubrimiento que se desarrolla la industria eléctrica, puesto que ya no se dependía de cargas estáticas para la obtención de electricidad, por lo que se podía utilizar en cualquier momento y de forma constante.

No fue hasta 1870 que el científico belga Zénobe-Théophile Gramme construyó la primera máquina de corriente continua denominada dínamo, y en 1882 el físico Nikola Tesla diseñó y construyó el primer motor de inducción de corriente alterna, lo que dió paso a la guerra de las corrientes entre Tomas Edison y George Westinghouse los cuales defendían la CD y la CA respectivamente. Para determinar qué sistema se convertiría en la tecnología dominante, Harold Brown (empleado de Edison) inventó una silla eléctrica de CA y electrocutó a perros, gatos y hasta un elefante para demostrar que la corriente alterna era peligrosa. Para neutralizar esta iniciativa, Tesla se expuso a una CA que atravesó su cuerpo sin causarle ningún daño. Ante esta prueba, Edison nada pudo hacer y su prestigio quedó momentáneamente erosionado.

Durante la Feria Mundial de Chicago de 1893, Tesla tuvo su gran oportunidad cuando Westinghouse presentó un presupuesto por la mitad de lo que pedía General Electric, la iluminación de la Feria le fue adjudicada y Tesla pudo exhibir sus generadores, dínamos y motores de CA. Más tarde, la Niagara Falls Power Company encargó a Westinghouse el desarrollo de su sistema de transmisión, lo cual fue el final de la “guerra de las corrientes” y la CA acabaría imponiéndose en todo el mundo⁴.

Con el desarrollo de los motores eléctricos nuestro mundo se ha transformado a una velocidad asombrosa, sin embargo, los avances técnicos conseguidos hasta antes de la aparición de la electrónica, no tienen comparación con los progresos alcanzados a partir del empleo de esta nueva técnica.

En la segunda mitad del siglo XIX ya se habían conseguido descubrimientos importantes que marcaban el surgimiento de la electrónica, todos ellos verían su aplicación hasta

³ http://www.geocities.com/alara2001/espanyol/historia_cast.htm.

⁴ www.epec.com.ar/PaginaOficial2/docs/.../fichaguerra_ctes.pdf



inicios del siglo XX, en 1900 J. Fleming inventa el bulbo al vacío, este es el primer avance significativo para el desarrollo de la electrónica⁵.

A partir de 1950, comienza a desarrollarse una nueva área de la electrónica, en la que se emplean semiconductores. En julio de 1948 John Bardeen, W. H. Brattain y William Shockley construyen el primer dispositivo de estado sólido, en el cual las acciones de control se llevan a cabo a través de señales eléctricas digitalizadas, lo que implica que las señales de salida ya no conservan necesariamente los mismos parámetros de las señales de entrada⁶.

El elevado crecimiento de la economía en los últimos años se ha traducido en una extraordinaria expansión en el uso de energía eléctrica así como en el desarrollo tecnológico en el área de las telecomunicaciones y sistemas de control eléctricos y electrónicos basados en dispositivos de estado sólido.

Lo anterior implica una alta proliferación de dispositivos electrónicos y de control, electrodomésticos con dispositivos de estado sólido y cargas no lineales⁷, tales como variadores de velocidad y controles para motor, grandes hornos, soldadores de arco, máquinas eléctricas con controles de estado sólido, equipos de comunicación, etc., los cuales han producido una gran cantidad de alteraciones en las ondas de tensión y corriente del sistema eléctrico, creando un problema denominado perturbaciones eléctricas, entre las cuales, se pueden citar las siguientes: transitorios, depresiones de voltaje (sags), dilataciones de voltaje (swells), armónicas, interrupciones momentáneas de energía y otros disturbios.

El suministrador usualmente atribuye los problemas a anomalías en la instalación eléctrica del usuario, mientras que este último los asocia a deficiencias en las redes de suministro. En esta situación, la mayoría de las veces, ambos olvidan las limitaciones de los equipos electrónicos sensibles para operar en el ambiente de las redes eléctricas tradicionales. Por lo anterior, el conocimiento de las características de los sistemas eléctricos del suministrador y del usuario es esencial para que los involucrados puedan establecer acciones económicas, que permitan el control de los efectos no deseables.

Por lo general, el usuario desconoce que la mayor parte de los disturbios eléctricos y problemas de operación provienen de su propio sistema eléctrico, ya sea por el tipo de cargas, por características de su red o por malas prácticas de puesta a tierra.

⁵ Historia de la electrónica de potencia.

⁶ <http://www.educadis.uson.mx/peon/Ingenieria-tecnologia/IT-documentos%20de%20Interes/Origen-Des-Tec-Electro-Rpe%F3n.htm>

⁷ Carga no lineal es aquella en donde la señal de salida, generalmente corriente, no conserva las características de la señal de entrada.



Las compañías suministradoras alrededor del mundo, han desarrollado campañas de medición y monitoreo de la calidad de la energía, ya que en los últimos 20 años se muestran incrementos año con año en el nivel de distorsión de tensión. La causa principal es el aumento en el uso de equipos electrónicos o cargas no lineales conectadas a la red, consecuentemente el margen entre la inmunidad del equipo que ya está en uso y el nivel de distorsión de tensión se reduce día con día.

En el sistema eléctrico es frecuente la presencia de disturbios y problemas causados por fenómenos naturales (descargas atmosféricas, clima, vientos intensos), accidentes o por la operación misma de la red.



Disturbios eléctricos.

Podemos definir a los disturbios eléctricos como perturbaciones que se presentan en cualquier sistema eléctrico, los cuales no necesariamente reflejan la ausencia de tensión, sino que se manifiestan como variaciones en la forma de onda de la tensión y que afectan el funcionamiento de los diversos tipos de equipos conectados al sistema, o en otras palabras, cualquier perturbación en los sistemas de energía eléctrica, que se manifiesta en desviaciones de las condiciones adecuadas de tensión, corriente o frecuencia, lo cual puede resultar en una falla o una mala operación de equipos.

Estos disturbios pueden ser deformaciones en la onda, los cuales se llegan a presentar en magnitud o en frecuencia. En el primer caso se pueden encontrar ya sea como sobrevoltajes o como caídas de tensión, que a su vez se dividen en corta y larga duración. En el caso de la frecuencia se presentan con valores distintos al fundamental (60 Hz), ya sean mayores o menores. Los disturbios eléctricos más comunes que se tienen en los sistemas eléctricos son los siguientes:

- Interrupciones.
- Alta tensión de corta duración (swells).
- Alta tensión constante.
- Baja tensión de corta duración (sags).
- Baja tensión constante.
- Picos de alto voltaje.
- Ruido eléctrico.
- Variaciones en la frecuencia.
- Distorsión armónica.

Dichas perturbaciones eléctricas contaminan la energía en forma preocupante, alterando en forma directa los equipos y sistemas críticos (informáticos, de procesos, control estratégico, etc.).

Los equipos de hoy en día son más sensibles a las variaciones de la energía eléctrica que los utilizados en años anteriores. Muchas cargas contienen control basado en microprocesadores e instrumentos electrónicos que son sensibles a los disturbios eléctricos. La tarea constante de disminuir costos en el uso de la energía eléctrica y aumentar la eficiencia en la conversión de ésta ha llevado a la implementación de equipos de alta eficiencia como son: variadores de velocidad en motores, bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia y el uso extensivo de equipos de cómputo para



optimizar tareas y procesos. Como resultado adverso al ahorro de energía eléctrica, se tienen incrementos significativos en los niveles de armónicas en las redes eléctricas⁸.

Dado que el problema no sólo afecta a usuarios sino también a las compañías suministradoras, éstas se preparan para medir los niveles de armónicas producidas por los usuarios. Así, de acuerdo a los cambios que inminentemente se harán a la reglamentación vigente, se penalizará a los usuarios que excedan los límites que se establezcan para la calidad de la energía eléctrica.

Actualmente los consumidores de energía eléctrica se informan más acerca de los problemas asociados con la calidad de la energía como: interrupciones, variaciones de tensión (sags y swells, es decir, depresión y dilatación de voltaje) y transitorios por "switchero" (conexión y desconexión de cargas). En consecuencia, los usuarios demandan a las compañías suministradoras el mejorar la calidad de la energía eléctrica que reciben.

Si las compañías suministradoras fueran incapaces de controlar los niveles crecientes de distorsión en sus redes, creadas principalmente por efectos acumulativos de la gran cantidad de pequeñas cargas con corriente nominal menor ó igual a 16 A por fase, sería inevitable el deterioro de la calidad de tensión provista a todos los usuarios (consumidores).

Es claro que sin acciones correctivas, las compañías suministradoras y usuarios experimentarán un número creciente de fallas en sus sistemas y equipos, con los problemas subsecuentes, como pérdida de producción y competitividad.

Las compañías suministradoras enfrentan grandes retos en el abastecimiento de energía eléctrica de manera eficiente y con alta calidad, pues deben buscar mantener el equilibrio entre las necesidades de los usuarios y mantener un nivel adecuado de compatibilidad electromagnética que permita un funcionamiento apropiado de los equipos y sistemas.

La continuidad de la energía depende en muchos aspectos del diseño y operación del sistema. Algunos de los factores que afectan la continuidad de la energía son: protección contra sobretensión, interrupción, recierre por falla, diseño de la línea de transmisión, y diseño y operación del sistema. Si un sistema de transmisión o distribución es diseñado apropiadamente para resistir relámpagos y otras sobretensiones, la continuidad de la energía y la confiabilidad del sistema se incrementan. Del mismo modo, con una apropiada protección contra fallas y una rápida coordinación de relevadores, el sistema es más confiable.

⁸ Los capacitores, al ser dispositivos lineales no generan armónicas, pero si ocasionan un incremento en los niveles de distorsión al provocar resonancias en serie y en paralelo.



Algunos equipos con componentes no lineales, tales como: (convertidores con tiristores o transistores de potencia, dispositivos de arco eléctrico y otros) causan perturbaciones denominadas genéricamente EMI (Electromagnetic Interferentes – Interferencias Electromagnéticas). Dichas perturbaciones ocasionan una pérdida de rendimiento en la mayor parte de cargas convencionales y sobrecargan innecesariamente las líneas de transmisión. No obstante, el mayor problema no siempre es la pérdida de rendimiento, sino el deterioro que producen en la calidad de la onda de tensión, superponiendo perturbaciones, algunas de carácter periódico y otras de carácter transitorio; las cuales ponen en peligro el buen funcionamiento de una serie de equipos electrónicos, informáticos y de comunicaciones.

De igual forma es importante mencionar que el número de disturbios eléctricos presentes en la actualidad se ha incrementado considerablemente ya que la demanda ha crecido más rápido que la generación de energía eléctrica.

Afectaciones de los disturbios.

En la actualidad sabemos que los disturbios no sólo afectan el funcionamiento de los equipos que se conectan a la red de suministro y a los que forman parte de la misma red, sino que además disminuyen el tiempo de vida útil de los elementos que los componen. Algunas de las afectaciones son:

- Sobrecalentamiento de cables, conductores y transformadores.
- Incremento de las pérdidas reactivas de los transformadores.
- Errores en la medición.
- Operación incorrecta de sistemas de protección.
- Daño en elementos primarios de la red.
- Daño bancos de capacitores de corrección de FP.
- Incrementos en la ocurrencia de cortes en el suministro.
- Variaciones de tensión.
- Pérdidas económicas causadas por la detención de procesos completos.
- Daños en equipos sensibles.
- Pérdida de información en equipos de informática.
- Operación deficiente de sistemas de señalización.
- Acortamiento de la vida útil de los equipos, entre otros.

Los disturbios pueden afectar a los sistemas eléctricos dependiendo de su magnitud y duración, es así como se pueden manifestar en menor o mayor grado sobre los equipos, algunos de los efectos producidos por los disturbios son:



- Ruido e impulsos eléctricos: Estos pueden ocasionar un funcionamiento errático en cualquier tipo de computadora, se puede inhibir o desprogramar, errores de paridad, teclados bloqueados o información perdida, corrupción de datos, problemas de comunicación, etc. Si la magnitud del disturbio es muy elevada, el daño puede ser físico e irreversible.
- Sobre voltajes y bajo voltajes: Los bajos voltajes del orden del 90% del valor nominal y por un tiempo aproximado de tres ciclos o más serán detectados por los drives como una condición de falla, por lo que operarán interrumpiendo el suministro de energía. Los bajos voltajes al momento del arranque de grandes motores, pueden ocasionar que los contactores de los mismos se abran debido al incremento en la corriente que circula por ellos, o en el caso de que éstos no abran se puede dañar el aislamiento de las bobinas. De la misma forma esto es capaz de producir un sobrecalentamiento de los alimentadores, dañando el aislamiento de los mismos lo que podría provocar un incendio. Por otra parte los sobrevoltajes con duración muy larga, pueden dañar el aislamiento de la electrónica de los equipos.
- Distorsión armónica: Este tipo de disturbio puede ocasionar funcionamiento errático de algunos variadores, calentamiento de cables, transformadores y disparos anticipados de interruptores, así como pérdidas innecesarias en el equipo del consumidor, y en determinadas circunstancias, produce zumbidos e interferencia en líneas telefónicas vecinas.

La seguridad del suministro es un aspecto importante en la alimentación de sistemas sensibles y cargas críticas. Una interrupción en la alimentación puede causar la pérdida de muchas horas de trabajo y dinero en centros de gestión, cálculo, diseño, instalaciones industriales de procesos continuos e incluso poner en peligro la vida de personas (control de vuelos, unidades de vigilancia intensiva en hospitales, etc.).

Origen de los disturbios.

La producción de los disturbios tiene dos tipos de orígenes, los externos y los internos al sistema eléctrico:

- Los de origen externo son los producidos por las descargas atmosféricas (rayos) en las líneas eléctricas, falla de algún equipo en la red, contactos incidentales entre dos líneas o entre una línea y algún objeto aterrizado, principalmente.
- Los de origen interno son producidos por la operación de dispositivos de conexión y desconexión, conmutación electrónica (drive's, PLC's, computadoras, etc.),



arranque de motores, la distorsión de la señal de entrada producida por armónicos, entre otros.

Los caminos de ingreso a las instalaciones y por consiguiente a los equipamientos son muchos y muy variados, entre los cuales podemos encontrar a los cables eléctricos, líneas de teléfonos, cables coaxiales de radio frecuencia y transmisión, cableados de datos, de alarmas, etc. Generalizando podemos decir que todo conductor, ya sea de cobre o no, que ingresa a un recinto de equipos es un conductor potencial de disturbios.

El tipo de líneas de transmisión es un factor importante en la presencia de disturbios, ya que las líneas aéreas se encuentran mucho más expuestas a estos que las subterráneas.

Sistemas aéreos.

El único voltaje normalizado en LyFC en media tensión es 23 kV, aunque aún existen algunos circuitos de distribución operando a 6.6 y 13.8 kV, sin embargo están condenados a desaparecer.

El 80% de la red de distribución que operaba LyFC es aérea y por ende sujeta a daños por causas ajenas al organismo tales como vandalismo, choques de vehículos contra postes, ramas de árbol, vientos, granizo, lluvia, robos de conductores de cobre, etc. Aumentando considerablemente la presencia de disturbios, siendo los más comunes las interrupciones sostenidas y los impulsos por recierre cuando el sistema trata de “quemar” la falla al presentarse fallas de fase a fase o de fase a tierra.

Los fenómenos eléctricos a 2200 metros sobre el nivel del mar son más severos que al nivel del mar y si a ello le agregamos el alto nivel de contaminación de la Ciudad de México, las fallas eléctricas son más frecuentes.

Como se verá en el tercer capítulo, en el IIB se presentó una caída de tensión sostenida, debida a la operación de la protección de una de las fases en media tensión, que pudo haber sido provocada por una falla a tierra de dicha fase.

Sistemas subterráneos.

Solamente el 20% de la red eléctrica que operaba LyFC es subterránea, debido a que la diferencia en costos versus redes aéreas es de 5 a 1, a pesar de esto debe mencionarse que el costo de mantenimiento de las redes subterráneas así como su frecuencia de fallas son menores que el de las redes de distribución aéreas equivalentes.

Los primeros cables subterráneos instalados por LyFC fueron tipo tubo en voltajes de 85 y 230 kV y de papel impregnado en aceite con cubierta de plomo en 6.6 y 23 kV. En la



actualidad se usan solamente cables de aislamiento seco en media y alta tensión (XLPE o EPR).

En el centro de la Ciudad de México se instaló desde hace más de 50 años una red automática que basa su principio de operación en el hecho de que al estar totalmente mallada la red de baja tensión permite que las fallas en baja tensión se auto extingan.

Una vez ingresado el disturbio al recinto, puede afectar el funcionamiento de todo tipo de equipo de comunicaciones como por ejemplo:

- Equipamiento satelital.
- Computadoras.
- Controladores lógicos programables.
- Rectificadores de tecnología de fuente conmutada.
- UPS's.
- Sistemas de comando y control.
- Sistemas de alarmas.
- Sistemas de transferencia automática.
- Rectificadores.
- Dispositivos de alarmas y monitoreo.
- Telefonía fija.
- Equipos conectados a CATV (Community Antenna Television).

Distribución de los disturbios.

Para mostrar la ocurrencia de los distintos tipos de disturbios se han realizado encuestas en diferentes tipos de industrias referentes a la operación de los sistemas, arrojando los siguientes resultados⁹:

- a) Un poco más del 62% de los disturbios fueron depresiones de voltaje con duración menor a medio segundo (30 ciclos). Típicamente, estas depresiones son resultado de condiciones de falla: un corto circuito en el sistema de la empresa suministradora, descargas atmosféricas, ramas de árbol o pequeños animales. Las depresiones de voltaje también son resultado del arranque de un motor, aunque estas subtensiones comúnmente son mayores en duración de 30 ciclos y el voltaje asociado no es tan bajo. La magnitud y duración de la depresión de voltaje determina la magnitud del daño al equipo sensible.

⁹ Enríquez Harper Gilberto. La calidad de la energía en los sistemas eléctricos.



-
- b) Aproximadamente el 21% de los disturbios fueron impulsos de voltaje transitorios. La conexión y desconexión de cargas ocasiona estos impulsos. Normalmente no representan un problema hasta que sobrepasan el 200 o 300% del voltaje eficaz. El impulso es una elevación transitoria con duración menor a medio ciclo. Otras causas comunes de impulsos son: descargas atmosféricas cercanas, descargas estáticas y arqueo entre contactos.
- c) Las interrupciones constituyeron el 14% de los disturbios. Ningún sistema es invulnerable a las interrupciones, estas son ocasionadas por cortocircuitos, descargas atmosféricas, mal funcionamiento del equipo, accidentes automovilísticos, excavaciones en sistemas subterráneos, etc.
- d) Las sobretensiones de voltaje representaron el 2%.

Otro estudio citado con frecuencia en la literatura fue realizado por los laboratorios de la compañía Bell Telephone, con los siguientes resultados:

Se observó la siguiente distribución entre los disturbios:

- Sobretensiones 0.7%
- Interrupciones 4.7%
- Impulsos 7.4%
- Depresiones 87.2%

En el tercer capítulo se observará que los disturbios presentan esta misma distribución estadística, siendo los más frecuentes las muescas, las depresiones y los oscilatorios.



Disturbios de corta duración.

Variaciones cortas de tensión.

Son variaciones en el valor eficaz de la tensión nominal, por un tiempo mayor a medio ciclo de la frecuencia del sistema sin llegar a exceder un minuto, son generalmente causados por fallas, energización de cargas grandes con corrientes de arranque muy elevadas o conexiones intermitentes en los cableados de potencia. Dependiendo la localización de la falla y las condiciones del sistema se pueden causar temporalmente: caídas de tensión, (sags), elevaciones de tensión (swells), que no son tan comunes o una completa pérdida de tensión (interrupciones cortas). Las condiciones de alto o bajo voltaje pueden presentarse en circuitos durante la desconexión de cargas de gran tamaño o durante periodos de sobrecargas, respectivamente.

Interrupciones cortas.

Una interrupción ocurre cuando la fuente de tensión o la corriente de carga disminuyen a menos del 10% de los valores nominales por un periodo no mayor a un minuto. Son normalmente provocadas por una condición de falla del aislamiento después de una operación exitosa del equipo de restablecimiento. En la figura 1.1 se da un ejemplo gráfico de este fenómeno.

Debido a que los equipos de cómputo típicamente pueden tolerar una interrupción durante un tiempo no mayor a medio ciclo, deben tomarse las medidas necesarias para reducir al mínimo las salidas instantáneas, generalmente producidas durante tormentas eléctricas.

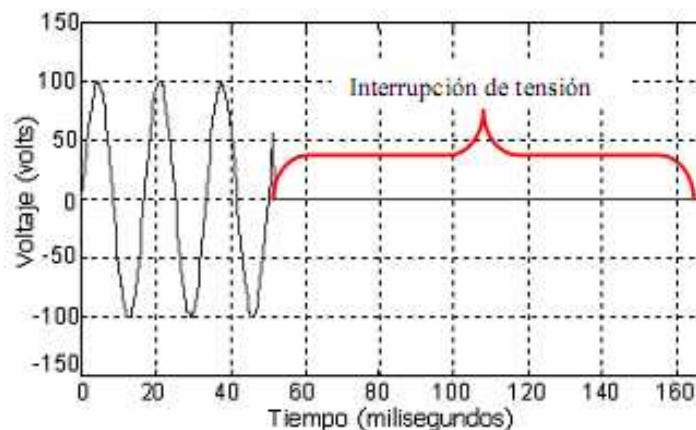


Fig. 1.1 Señal de voltaje con interrupción de energía.



Depresiones de voltaje (sags).

Es un decremento en el valor eficaz de la tensión a la frecuencia fundamental¹⁰, con magnitudes que se encuentran entre el 10% y el 90% del valor nominal y tiene una duración de medio ciclo hasta un minuto.

Éstas pueden ser causadas por operaciones de maniobra asociadas con la desconexión temporal de suministro, por el flujo de corrientes de falla y descargas atmosféricas, así como con la gran demanda de corriente asociada a la conexión de grandes cargas, como puede ser el arranque de motores grandes, ya que éstos tienen corrientes de arranque de seis a diez veces su corriente nominal, con lo que llegan a afectar la señal de voltaje. Sin embargo, estas disminuciones de voltaje usualmente tienen una duración superior a 30 ciclos y la disminución del voltaje es de menor magnitud. En el capítulo tres se observa este tipo de disturbios.

Las fallas que producen los abatimientos de voltaje pueden presentarse tanto en el interior de la instalación industrial como en el sistema de suministro. El abatimiento del voltaje permanece hasta que la falla se elimina mediante la operación de los dispositivos de protección. En la figura 1.2 se aprecia una señal de voltaje con sag.

Algunos elementos efectivos para minimizar los problemas generados por estas reducciones súbitas de tensión son los transformadores ferroresonantes y las fuentes de energía ininterrumpible (UPS's).

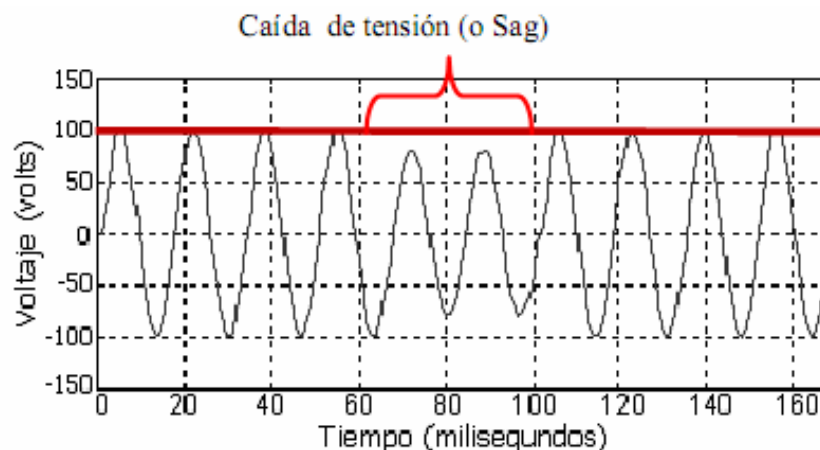


Fig. 1.2 Señal de voltaje con sag.

¹⁰ Al analizar una forma de onda a través de la serie de Fourier, la componente fundamental de esta onda es la señal senoidal de primer orden a la frecuencia nominal del sistema, esta frecuencia puede ser de 60 o 50 Hz para los sistemas eléctricos de potencia.

Las fallas sobre la red eléctrica pueden ocurrir en el sistema de distribución o transmisión. La figura 1. 3, ilustra la configuración típica de una red de distribución donde un número de alimentadores suministra la energía eléctrica a los usuarios desde un bus común. Una falla sobre el alimentador F1 producirá una interrupción que afectará a los usuarios que están conectados en el mismo.

Sin embargo, los usuarios de los otros tres alimentadores experimentarán un abatimiento de voltaje con una duración igual al tiempo que tarda en liberarse la falla. Con operaciones de recierre en la subestación para eliminar la falla del alimentador F1, los usuarios de los alimentadores paralelos podrán estar expuestos hasta cuatro abatimientos sucesivos de la magnitud del voltaje, con una duración que va desde aproximadamente seis ciclos hasta el orden de dos segundos.

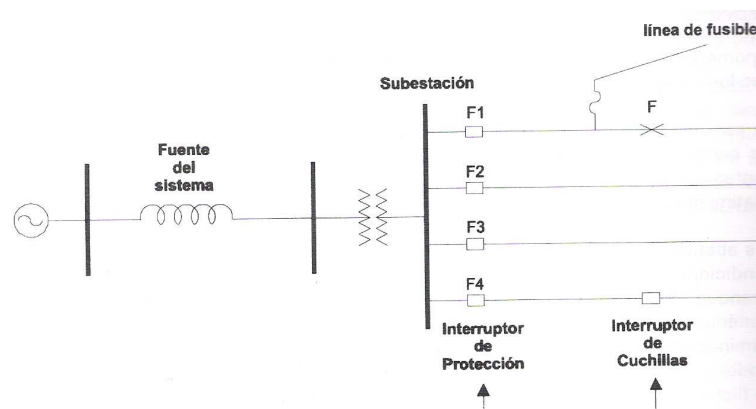


Fig. 1.3 Diagrama unifilar de un sistema de distribución ilustrando los tipos de dispositivos de protección.

Dilatación de voltaje (swell).

Es un incremento en el valor eficaz de la tensión a la frecuencia fundamental, con magnitudes que se encuentran por lo menos un 10% arriba del valor nominal y tiene una duración de medio ciclo hasta un minuto. Generalmente los swell acompañan a las caídas de tensión breves (sags).

Son ocasionados por la desconexión de cargas grandes y no llega a ser un sobrevoltaje. Aparecen en las fases no falladas de un circuito trifásico que ha presentado un corto circuito monofásico o cuando los sistemas rechazan carga. Los incrementos en la tensión pueden ocasionar trastornos en los dispositivos de control y controladores de estado sólido de motores, particularmente en variadores de velocidad, los cuales pueden interrumpir su operación al accionarse la protección de sus circuitos electrónicos. También pueden someter a esfuerzos dieléctricos a los componentes de computadoras y



acortar su vida útil. Para minimizar los efectos adversos producidos por este tipo de fenómenos se utilizan supresores de transitorios y UPS's.

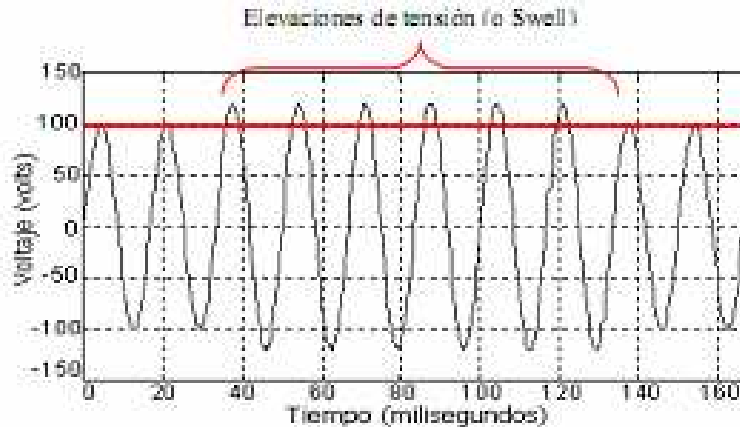


Fig. 1.4 Señal de voltaje con swell.

Muestras (notches).

Son disturbios de voltaje con una duración menor a medio ciclo, que inicialmente son de polaridad opuesta a la forma de onda, por lo cual, son sustractivos en términos de voltaje pico del disturbio. Esto incluye pérdida completa de voltaje menor a medio ciclo, la cual es provocada por la energización de capacitores en las plantas generadoras, en líneas de transmisión, o en las instalaciones del usuario en la figura 1.5 se muestra un caso típico.

Las muescas son un disturbio periodico y ocurren como resultado de la gran corriente necesaria para la carga de los capacitores. También pueden provocarse por la conexión de cargas tales como sistemas de cómputo, operación de variadores de frecuencia y controles de motores de corriente directa. La causa más común de este fenómeno son los convertidores trifásicos, ya que al realizar la conmutación entre cada fase, se está provocando un corto circuito.

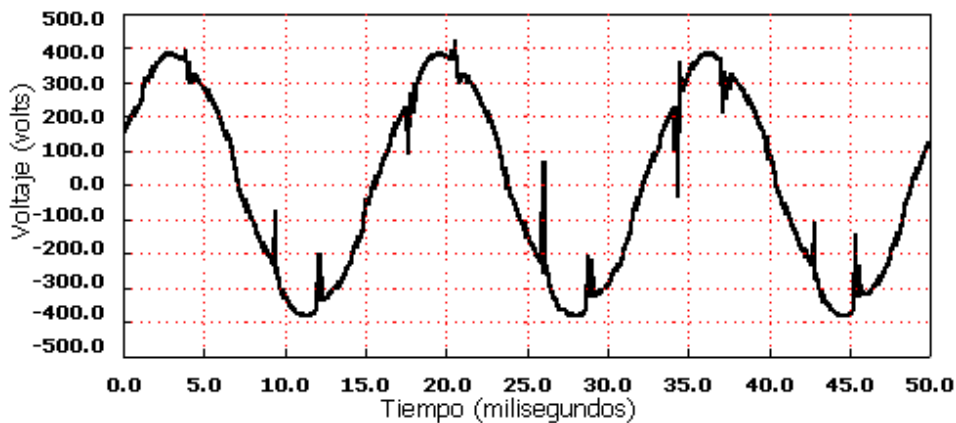


Fig. 1.5 Señal de voltaje con muescas.



Pico de voltaje.

Es un incremento en el nivel de voltaje que tiene una duración de microsegundos. Se presentan en forma de impulsos de voltaje de corta duración, superpuestos en la señal de alimentación y frecuentemente intermitentes. Es provocado principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas, así como conexión y desconexión de grandes cargas o capacitores para la corrección del factor de potencia (switchero), la figura 1.6 representa un pico de voltaje típico en la señal de tensión.

A diferencia de las sobretensiones temporales y exceptuando el caso crítico de rayos muy cerca de las instalaciones que producen chispas en los contactos, estas no presentan una indicación clara de su existencia, que pueda detectarse visualmente en circuitos de alumbrado o en alguna otra forma. Sin embargo, dado que su nivel puede llegar a alcanzar valores de cinco veces o más el voltaje nominal, su efecto consiste en aplicar esfuerzos excesivos al aislamiento de diversos equipos o daños a componentes electrónicos sensibles.

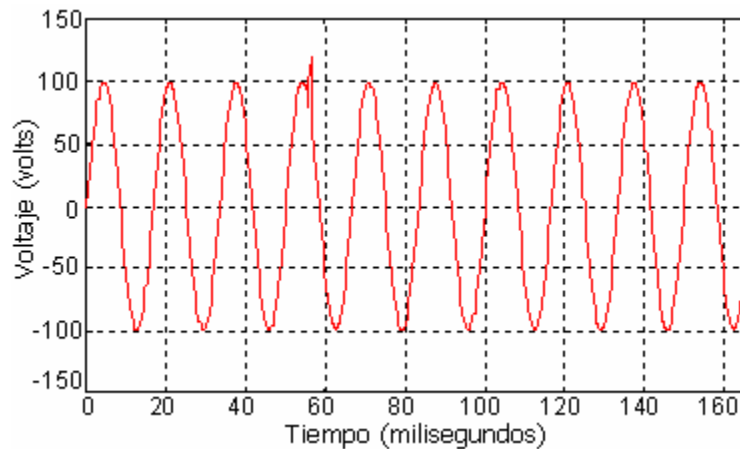


Fig.1.6 Señal de tensión con un pico de voltaje.

Esto último puede traer como consecuencia la interrupción de programas en procesos de computadoras, pérdida de información almacenada en memoria o daño al hardware. Otros factores transitorios, dentro de esta clasificación, son las operaciones de conexión y desconexión de motores eléctricos en elevadores, equipos de aire acondicionado, refrigeradores, etc.



Disturbios de larga duración.

Interrupciones de energía.

Es la pérdida total de potencial. Por lo general, se considera interrupción cuando el voltaje ha decrecido a un 10% del valor nominal o menos, regularmente son fallas de naturaleza permanente, en las cuales es necesaria la intervención manual para su restauración. Este disturbio es causado por aperturas de líneas, daño de transformadores, operación de fusibles o equipos de protección de la red, tormentas eléctricas o por sobrecargas en la red de baja tensión, entre otras posibilidades. En la figura 1.7 se proporciona un oscilograma típico de una interrupción.

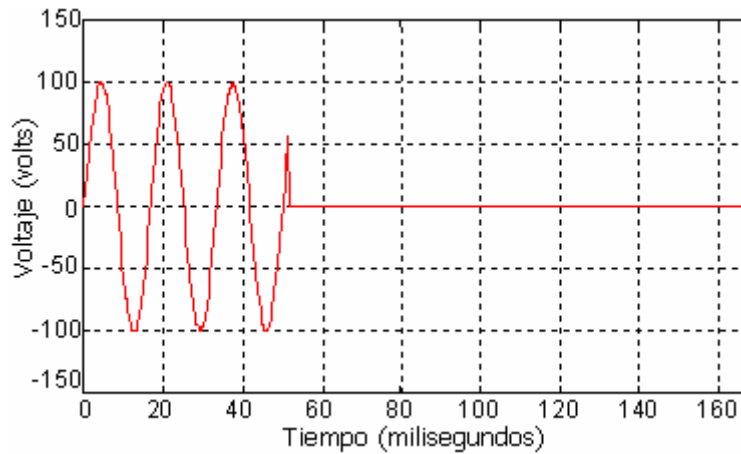


Fig. 1.7 Señal de voltaje con interrupción de energía.

Variaciones de voltaje.

Son variaciones sistemáticas en la amplitud de la onda del voltaje y por lo tanto en el valor eficaz de la señal¹¹ a la frecuencia del sistema. Comúnmente se expresan como un porcentaje del valor de la fundamental. Este efecto es provocado por cargas que presentan variaciones continuas y rápidas de corriente, especialmente en la componente reactiva. Los arcos de fundición, así como las soldadoras, son la causa más común de las variaciones de voltaje en el sistema de transmisión y distribución.

Éstas pueden ser sobrevoltajes o bajos voltajes, y son causados principalmente por conmutación en las cargas u operaciones de switcheo en el sistema.

¹¹ ANSI C84.11982 recomienda que no se excedan los rangos especificados de 0.9 a 1.1 pu.



Bajo voltaje.

Se llama así a los decrementos en el voltaje eficaz en la forma de onda de CA que ocurren a la frecuencia fundamental y donde el tiempo de duración es mayor a un minuto.

Normalmente se habla de un bajo voltaje cuando se tienen valores comprendidos entre el 10% y el 90% del valor nominal.

Sobrevoltaje.

Se llama así a los incrementos en el voltaje eficaz en la forma de onda de CA que ocurren a la frecuencia fundamental y donde el tiempo de duración es mayor a un minuto, por lo que a diferencia del swell dura mucho más tiempo. Normalmente se habla de un sobrevoltaje cuando se tienen valores de al menos 10% arriba del valor nominal, ver figura 1.8.

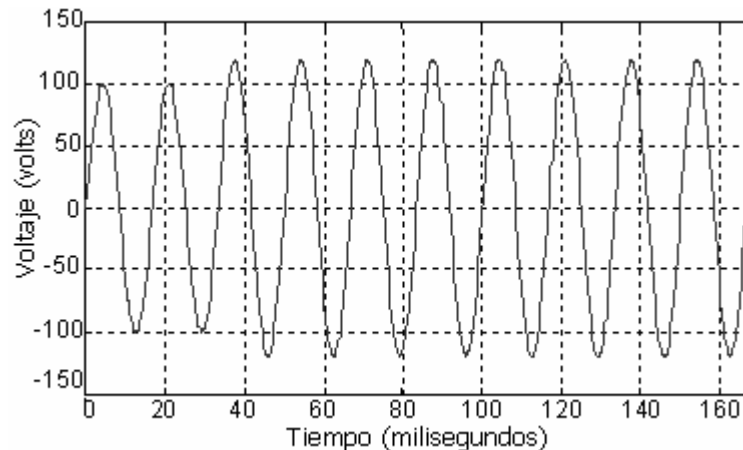


Fig. 1.8 Señal de tensión con sobrevoltaje.

Desbalances.

Como se sabe, los sistemas eléctricos son trifásicos y, debido a la operación misma, en baja tensión, regularmente su funcionamiento no es balanceado, lo que significa que las tensiones o corrientes de una fuente trifásica no son idénticas en magnitud, o el desplazamiento entre fases no es de 120 grados eléctricos o ambas, lo cual acarrea problemas por sobrecalentamiento de alguna de las fases. Esto afecta a los motores y otros dispositivos que dependen del adecuado balanceo de la fuente de suministro trifásica.



Un medio para eliminar el desbalanceo en las instalaciones es realizar una nueva interconexión de todos los equipos de la instalación, de manera que las cargas monofásicas y bifásicas sean distribuidas de manera equitativa en la instalación. Es recomendable realizar un análisis de las cargas para verificar que bajo las diferentes condiciones de operación no se presente un desbalanceo mayor al 5% entre la fase de mayor y la de menor carga.

Técnicamente, el desbalanceo se define de la siguiente manera:

$$U_2 = 100 * \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$

donde:

$$\beta = \frac{U_{abfund}^4 + U_{bcfund}^4 + U_{cafund}^4}{(U_{abfund}^2 + U_{bcfund}^2 + U_{cafund}^2)^2}$$

Ruido eléctrico.

Son señales eléctricas en un ancho de banda menor a 200 kHz superpuestas a la señal fundamental de corriente o voltaje del sistema, en la figura 1.9 se muestra un gráfico típico de ruido eléctrico.

Se debe principalmente a switcheo, sistemas de transmisión de señales de radio, balastos de lámparas fluorescentes, variadores de frecuencia, dimmers (atenuadores de iluminación) y equipo industrial de arco eléctrico. El ruido provoca efectos indeseables tales como, la operación errónea de PLC's, problemas en la operación de sistemas de cómputo, problemas de audio y video, entre otros y regularmente es amplificado por aterrizamientos incorrectos.

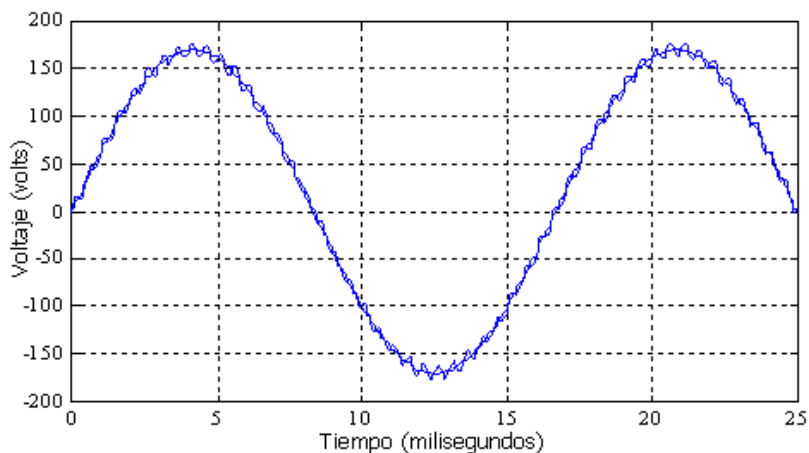


Fig. 1.9 Señal de voltaje con ruido eléctrico.



Parpadeo (flicker).

El flicker o parpadeo se define como “la impresión subjetiva de fluctuación de la iluminancia”, de acuerdo con la Comisión de Electrotecnia Internacional (CEI-555-1). Es un fenómeno de origen fisiológico, visual, que se presenta en los usuarios de lámparas alimentadas por una fuente común a los circuitos de iluminación y que a su vez alimenta algún tipo de carga. En la figura 1.10 se proporciona una imagen de una señal de tensión con flicker.

El origen del flicker o parpadeo se encuentra en las fluctuaciones bruscas de la tensión de la red, de las cuales básicamente se consideran las que tienen una amplitud menor al 10%. Éstas son debidas a la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos, oscilaciones subarmónicas¹², compresores y máquinas para soldar. Por lo general este efecto se observa fácilmente en el cambio de intensidad bajo y alto de lámparas o en el ruido acelerado y desacelerado de motores.

Desde el punto de vista normativo, las empresas distribuidoras de energía eléctrica deben cumplir con ciertos valores de referencia, como son:

- De $\pm 10\%$ para las tensiones nominales en baja tensión (menores de 1000 V).
- De $\pm 3\%$ para tensiones mayores de 1000 V.

En general se puede establecer que las variaciones rápidas de voltaje, como es el caso del flicker, no afectan al buen funcionamiento de los aparatos conectados a la red eléctrica, siempre que los valores de éstas sean inferiores a los establecidos como límites. En orden decreciente de sensibilidad, se puede mencionar el efecto sobre los siguientes tipos de lámparas:

- Lámparas de vapor de mercurio.
- Lámparas incandescentes.
- Lámparas fluorescentes.

Cuando se presenta el flicker, también se puede observar un efecto de parpadeo sobre los televisores y las pantallas de las computadoras.

¹² Subarmónicas se refiere a señales de frecuencia menor a la frecuencia fundamental.

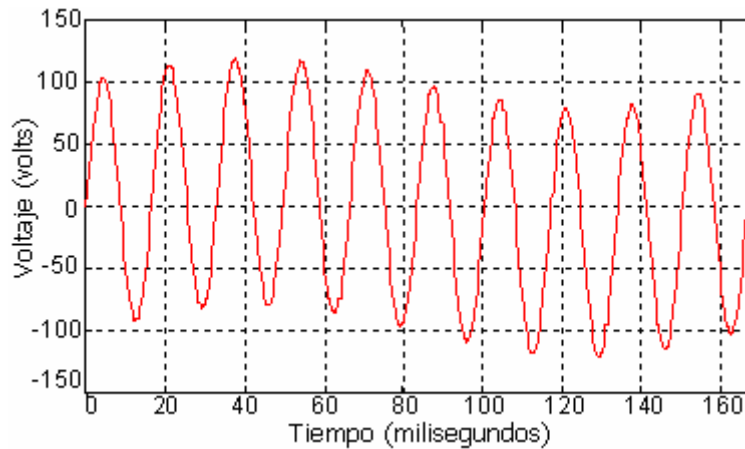


Fig. 1.10 Señal de voltaje con flicker.

Distorsión armónica.

La distorsión armónica significa simplemente que la forma de onda de la tensión (o corriente) no es una senoidal. Esto resulta de la adición de una o más ondas armónicas que se superponen a la onda fundamental o de 60 Hz y de acuerdo con el orden de la armónica es el grado de distorsión de la onda fundamental. Si se tiene una señal periódica no senoidal, entonces ésta puede descomponerse en una sumatoria de funciones senoidales y cosenoidales armónicamente relacionadas por la frecuencia. La distorsión armónica está compuesta por tensiones o corrientes que tienen frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental (60 Hz) del sistema de suministro (ver figura 1.11). Cuando las frecuencias de estas tensiones y corrientes armónicas no son múltiplos enteros de la onda fundamental se denominan interarmónicas.

También existen las subarmónicas que son frecuencias que están por debajo de la frecuencia fundamental con una razón de $1/x$. Por ejemplo, si se tiene una frecuencia fundamental de 440 Hz, las subarmónicas corresponden a 220 Hz ($1/2$) y 110 Hz ($1/4$).

Las armónicas no se producen normalmente por un sistema eléctrico de potencia, pero sí en la mayoría de los casos por las cargas conectadas al mismo. Algunas de las fuentes más comunes de armónicas son:

- Los convertidores estáticos.
- Los transformadores sobre-excitados.
- El alumbrado fluorescente.
- Los dispositivos de estado sólido (computadoras, controladores de velocidad, etc.).

Las distorsiones por armónicas e interarmónicas, generalmente son causadas por equipos con características tensión/corriente no lineales como lo son rectificadores y hornos de

arco eléctrico en aplicaciones industriales. La existencia de armónicas de corriente en la red de distribución provoca aumento de pérdidas por efecto Joule en equipos, sobre esfuerzo en aislamientos provocados por incremento de temperatura por corrientes parásitas, en devanados de transformadores y en conductores con forro, y disturbios motivados por interferencia en circuitos de control, de protecciones y en sistemas de telecomunicaciones.

Para mantener los contenidos de armónicas de corriente dentro de los niveles recomendados, las principales soluciones son:

- El uso de equipos de rectificación con mayor número de pulsos.
- Filtros pasivos sintonizados a frecuencias individuales.
- Filtros activos y acondicionadores.

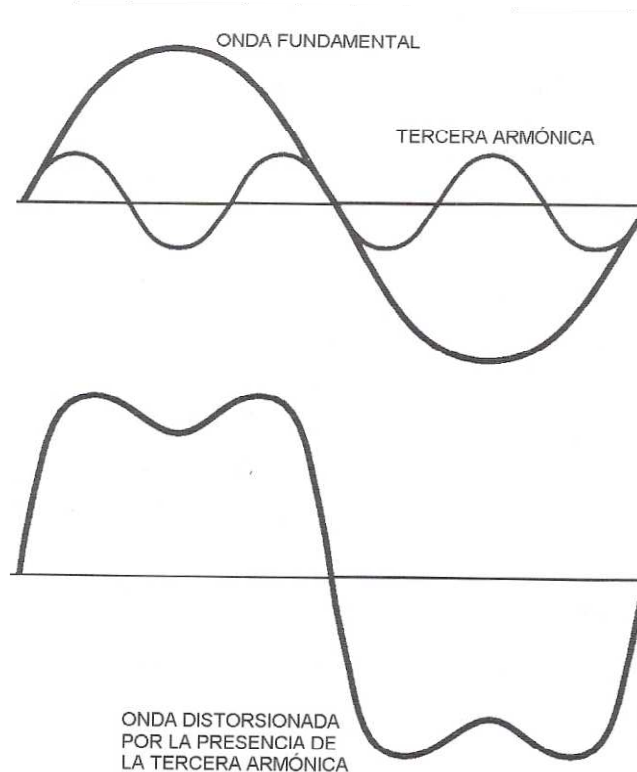


Fig. 1.11 La adición de una tercera armónica (180 Hz) a la onda fundamental (60 Hz) produce una distorsión en la forma de onda.



Variaciones en la frecuencia.

La frecuencia del sistema, en cualquier instante, está definida por la relación entre carga y la capacidad disponible de generación, si este balance dinámico cambia, se presentan pequeños cambios en la frecuencia. La duración y magnitud de los cambios depende de las características de la carga y de la respuesta del sistema de generación ante dichos cambios.

La frecuencia en el sistema eléctrico mexicano es de 60 ciclos por segundo, y ésta no debe variar más allá de más-menos 0.8%¹³ ya que una variación mayor en la frecuencia puede afectar a las maquinas generadoras.

Transitorios de tensión (impulsos de voltaje).

Son disturbios de voltaje mucho más pequeños que los sags y swells cuya duración es generalmente menor a un ciclo y se muestran como una discontinuidad, pronunciada y corta de la forma de onda. Puede ser de cualquier polaridad (positiva o negativa) y puede ser aditivo o sustractivo de la forma de onda nominal. Generalmente son causados por descargas atmosféricas, así como por maniobras de interruptores y por oscilaciones comúnmente debidas a la conexión de bancos de capacitores y cambios súbitos en el sistema de suministro.

Debido a que su nivel puede alcanzar valores de cinco veces el valor nominal o más su efecto puede provocar la aplicación de esfuerzos excesivos al aislamiento de diversos equipos o disturbios a componentes electrónicos sensibles. Esto último puede traer como consecuencia la interrupción de programas en procesos de computadoras, pérdida de información almacenada en memoria o daño a los propios elementos (hardware). Las posibles soluciones para limitar estos problemas son el uso de UPS's, protectores electrónicos de sags, transformadores de aislamiento y acondicionadores de la calidad de la energía eléctrica (Power Quality Conditioners).

Resumiendo, se puede decir que son desviaciones de la tensión o corriente normales, repentinas y significativas, típicamente tienen una duración de 20[η s] hasta 0.5 [s], existen dos tipos:

Impulso.

Es un cambio repentino de potencia a una frecuencia distinta de la fundamental, es

¹³ Diario Oficial de la Federación. Mayo de 1993. Reglamento de la ley del servicio público de la energía eléctrica.



unidireccional en su polaridad (+ o -). Normalmente son caracterizados por sus tiempos de cresta y cola, la causa más común son las descargas atmosféricas. Los impulsos involucran altas frecuencias, por lo que son amortiguados rápidamente por la componente resistiva del circuito y no son conducidos a largas distancias desde su fuente. Pueden excitar la resonancia de los circuitos y producir transitorios oscilatorios.

Transitorios de impulso por rayo.

Como son debidos a descargas atmosféricas, que son ondas unidireccionales y de una sola polaridad, se caracterizan por ondas de sobretensión de frente rápido y de aumento relativamente lento en la escala de tiempo que se maneja (1.2 a 50 microsegundos), ver figura 1.12.

Después de la caída o impacto de un rayo en forma directa o indirecta en una línea aérea que alimenta una subestación eléctrica, los apartarrayos que se instalan en la entrada de la subestación, limitan la onda de tensión y conducen a tierra la corriente del rayo. De no existir estos, la tensión se transmite entre los devanados de baja tensión del transformador por las capacitancias parásitas entre los devanados de alta y baja tensión. La derivación a tierra de la corriente del rayo crea sobretensiones en el equipo de baja tensión que pueden afectar a las cargas.

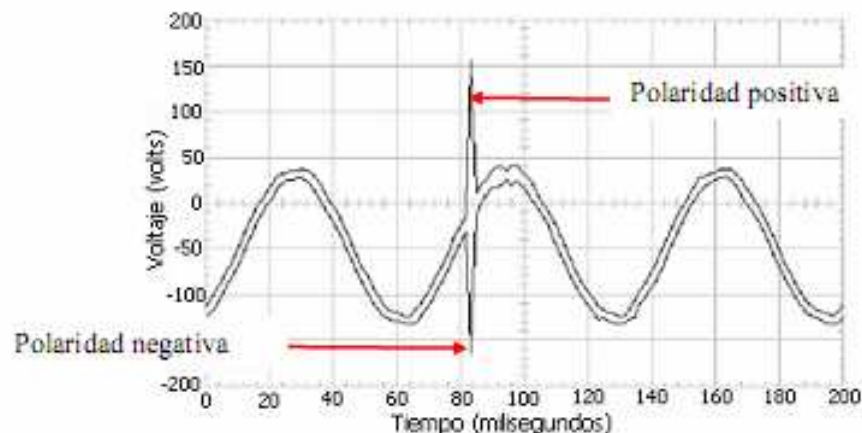


Fig. 1.12 Impulso transitorio en dos señales de tensión. Las dos señales de tensión tienen respectivamente polaridad positiva y negativa.

Oscilatorios.

Es un cambio repentino de baja potencia que afecta la frecuencia, cambiando la condición de estado estable de la tensión, corriente o ambas, que incluye los valores de polaridad. Consiste en el cambio instantáneo de valor, en la polaridad de la tensión o en la corriente. Es descrito por su contenido espectral, duración y magnitud, la figura 1.13 y 1.14 muestran este tipo de eventos.

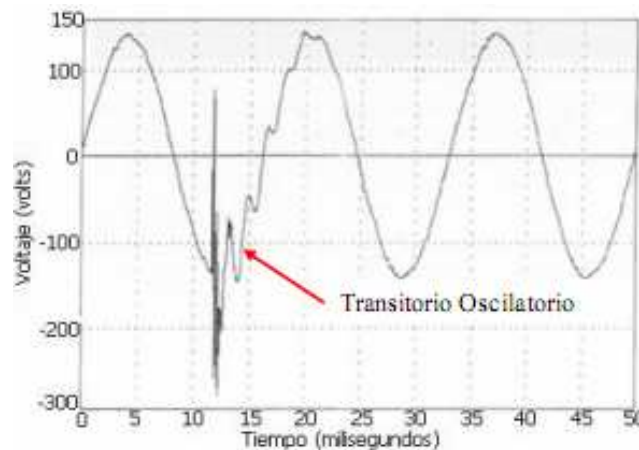


Fig.1.13 Transitorio oscilatorio en una señal de tensión.

Los transitorios oscilatorios siempre son ocasionados por maniobra de equipos, tales como desconexión de líneas, bancos de capacitores, etc. En ambos casos, debido a que involucran cantidades grandes de energía, ya sea corriente o voltaje, su efecto es destructivo.

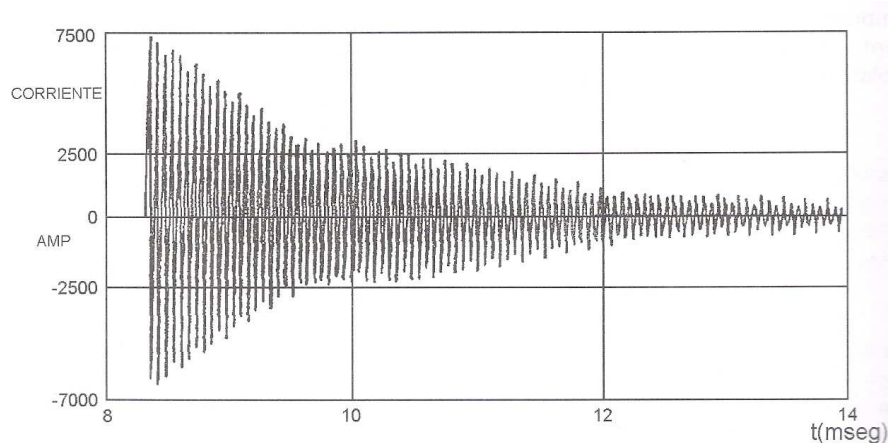


Fig.1.14 Transitorio oscilatorio causado por la energización de un banco de capacitores.



La protección contra fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica de las empresas suministradoras.

- El resultado de una falla se puede presentar como una tensión y/o una sobrecorriente en un sistema de distribución, debido principalmente a causas primarias como descargas atmosféricas, efectos de construcciones, accidentes, fuertes vientos, árboles, animales y vandalismo, que afectan los conductores. Estas fallas son normalmente detectadas por los relevadores de sobrecorriente que inicializan la operación de equipo para liberar la falla.
- Los sistemas de distribución incluyen una serie de dispositivos, como son los relevadores, interruptores, restauradores, fusibles y seccionadores, que liberan las fallas. Los restauradores e interruptores restablecen el servicio de forma inmediata después de una falla transitoria. No así los cortacircuitos que han operado y que se les debe reponer el fusible antes de ser restablecidos.
- Los dispositivos de protección pueden reducir el número de usuarios afectados por una falla, reducen el tiempo de interrupción por fallas temporales y ayudan a localizar las fallas, disminuyendo la duración de la interrupción.
- Los restauradores e interruptores abren el circuito con señal de sobrecorriente para prevenir el flujo de corriente y recierran después de un lapso de tiempo. Si la falla no desaparece después de la operación de un recierre, puede ocurrir un ciclo de apertura y cierre, o bien, quedar el circuito abierto.

Técnicas de atenuación de los disturbios.

Entre los principales métodos para mitigar los disturbios presentes en las instalaciones se encuentran los siguientes:

Puesta a tierra aislada.

Es la implementación de un cableado que conecte a los receptáculos que proveen de energía eléctrica a las cargas sensibles, el cual comprende el cableado normal para una instalación eléctrica, como es la fase, el neutro (o puesto a tierra) y la conexión del conductor desnudo de puesta a tierra que se conecta a la chalupa del contacto, y además lleva un cable de tierra aislada, el cual irá conectado directamente a la subestación, electrodo de tierra o una conexión a tierra física, y se conectará a la entrada de tierra en el receptáculo, el cual debe ser del tipo “tierra aislada”, en la figura 1.15 se ilustra la conexión correcta de un receptáculo con tierra aislada. Esto nos soluciona problemas de

ruido en la línea e impulsos en modo común provenientes de otros equipos en el sistema de puesta a tierra.

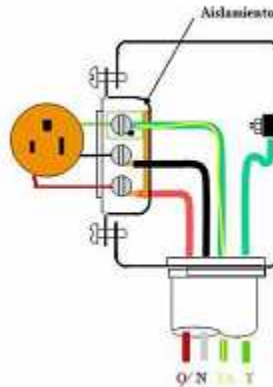


Fig.1.15 Receptáculo con conductor de tierra aislada.

Línea dedicada.

Es la implementación de un tablero separado y de uso exclusivo para las fuentes de tipo no lineal, para prevenir la contaminación del suministro a otros equipos. Esto soluciona los problemas de impulsos o cortes momentáneos de energía provenientes de equipos conectados al mismo circuito o tablero, aunque no logra dar solución a todos los problemas debidos a la interacción de cargas salvo las que llegan a presentarse dentro de un mismo circuito.

Transformadores de aislamiento.

Son dispositivos magnéticos que ofrecen una separación física entre la entrada y la salida del mismo. Puede solucionar la presencia de ruido, la contaminación de armónicas de otras fuentes y también caídas de tensión. Estos pueden ser de tipo normal o con un factor K, el cual además de brindar la protección mencionada, es capaz de soportar las corrientes de armónicas, e incluso se pueden encontrar con filtros para la mitigación de las mismas.

El factor K es una constante que nos indica la capacidad que posee el transformador para alimentar cargas no lineales (por ejemplo: hornos de inducción, Drive, sistemas de computo) sin exceder la temperatura de operación para la cual esta diseñado. A su vez, cumple la función de ser un indicador de la capacidad del transformador para soportar el contenido de corrientes armónicas, mientras se mantiene operando dentro de los límites de temperatura para la cual está diseñado

Filtros.

Los filtros son elementos eléctricos lineales que discriminan el paso de una determinada frecuencia o gama de frecuencias, dependiendo de las características del filtro y su capacidad. Solucionan problemas de corrientes armónicas, al drenar la corriente armónica de la frecuencia en la que se encuentre sintonizado. Pero la colocación de los filtros se debe realizar con cuidado, ya que estos están muy limitados por la cantidad de corriente que son capaces de filtrar, en la figura 1.16 se esquematiza la acción de un filtro.

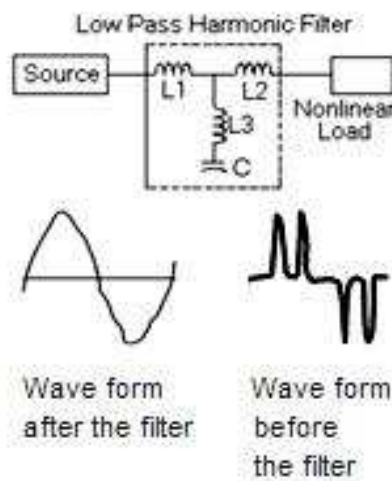


Fig.1.16 Filtro de armónicas.

Supresores de sobretensión transitoria (o de picos).

Es un dispositivo eléctrico que es capaz de bloquear tensiones que se producen en el suministro eléctrico o por descargas atmosféricas, que son llevadas de forma segura lejos de los equipos a proteger. Los supresores protegen a la instalación contra elevaciones repentinas y de corta duración en la tensión, aunque si estas se presentan con una duración mayor a la que establece el equipo, los fusibles se pueden quemar, al igual que si el valor de tensión eficaz que se tiene en la línea es mayor al que se especifica en el equipo.

Transformador de tensión constante o ferroresonante.

Son transformadores que cuentan con devanados secundarios que compensan y neutralizan cambios en la tensión, además de tener un condensador conectado al devanado compensador y al secundario, con lo que se proporciona una realimentación magnética. Éstos son capaces de aislar la carga y de regular la salida de tensión, por lo que protegen contra impulsos, ruidos, sobretensiones, sags y corrientes armónicas. Al elegir éstos

transformadores se debe tener precaución con su capacidad, ya que su regulación es mejor cuando se encuentran funcionando al 25% de esta, la figura 1.17 muestra la conexión interna de este tipo de transformadores.

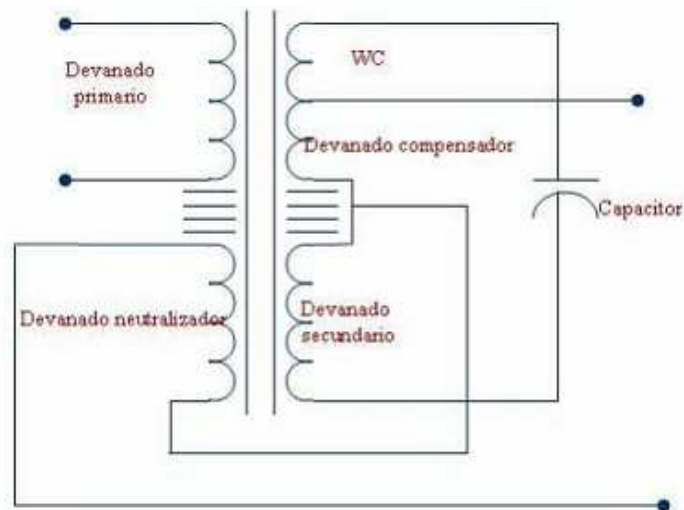


Fig.1.17 Diagrama esquemático de transformador ferroresonante.

Acondicionador o Regulador de Línea.

Son equipos eléctricos que controlan la salida de tensión mediante dispositivos electrónicos, brindando una salida con menor variación. Estos tienen la capacidad de solucionar los problemas de sags, swells, transitorios y de aislar las cargas de otras fuentes, esto último si el acondicionador tiene un dispositivo que proporcione aislamiento, como un transformador.

Sistemas de Energía Ininterrumpible (UPS's).

Una UPS es una fuente de suministro eléctrico que básicamente está compuesto por una batería, un transformador y componentes electrónicos, con el fin de proporcionar energía a un dispositivo en el caso de interrupción eléctrica. Existen dos tipos, los denominados off-line y los on-line. Los primeros se encargan de monitorear la entrada de energía, y en cuanto detectan alguna falla en esta, cambian su alimentación, tomándola de la batería, este pequeño cambio de origen de la energía puede tomar algunos milisegundos. Los on-line evitan esos milisegundos sin energía al producirse un corte eléctrico, pues proveen alimentación constante desde su batería y no de forma directa de la red. Cualquiera que sea el tipo estos sistemas proveen protección contra, transitorios, sags, swells, aíslan cargas, ruidos y algunos pueden filtrar armónicos. Es importante mencionar que una UPS



sin transformador no proporciona aislamiento, ya que la carga se conecta con el suministro a través del rectificador e inversor.

Comparación entre métodos.

Los diferentes métodos nos pueden ayudar a mitigar los diferentes tipos de disturbios y problemas de calidad de energía, dependiendo del tipo de instalación y el tipo de conexión, y se pueden comparar el tipo de solución, para el tipo de problema, la tabla 1.1 muestra una comparación entre los diferentes métodos.

Solución a disturbios eléctricos

	Impulso	Sobretensión	Sags	Swells	Armónicos	Ruidos	Corte del Suministro
Puesta a tierra Aislada	Medianamente Eficaz	No	No	No	No	Medianamente Eficaz	No
Línea dedicada	Medianamente Eficaz	No	No	No	No	Medianamente Eficaz	No
Transformadores de aislamiento	Medianamente Eficaz	No	No	No	No	No	No
Filtros	No	No	No	No	Eficaz	No	No
Supresores	Eficaz	No	No	No	No	No	No
Transformadores Ferroresonantes	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz	No
Acondicionador de línea	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Opcional	Eficaz	No
UPS	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz	Eficaz

Tabla 1.1 Comparativa de métodos de protección y mitigación.

Como se puede observar en la tabla los métodos más eficaces para la mitigación de los disturbios son las UPS's¹⁴, los transformadores ferrosresonantes y los acondicionadores de línea, que debido a su naturaleza no permiten el paso de las armónicas u otros problemas derivados.

La consideración de una fuente externa de disturbio en la instalación o instalaciones, sólo se debe hacer después de que el comportamiento eléctrico interno ha sido completamente verificado, vía medición y/o estudios.

¹⁴ Las UPS's con rectificador controlado a base de SCRS genera más distorsión en corriente que las cargas que alimenta, mientras que una UPS con rectificadores PWN senoidal a base de IGBTs reduce drásticamente las armónicas de corriente e incrementa el fp.



Una red protegida presenta numerosas ventajas, entre ellas:

- Salvaguardar la inversión y evitar el deterioro de los componentes.
- Eliminar errores de operación.
- Prevenir la pérdida de datos e información.
- Eliminar las paradas e interrupciones del servicio.
- Prevenir los colapsos en general.

Por lo cual resulta de suma importancia detectar los disturbios presentes en la red, para poder seleccionar el método de atenuación más adecuado, considerando al mismo tiempo el factor económico, para de esta manera disminuir lo más posible los disturbios de la forma más rentable, haciendo funcionar correctamente a todos los equipos conectados a la red.