



CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

Los sistemas de energía eléctrica constan de estaciones generadoras, líneas de transmisión, subestaciones de potencia, líneas de subtransmisión, subestaciones de distribución y líneas de distribución o circuitos alimentadores, que se interconectan para proporcionar energía eléctrica a las cargas de los usuarios.

1.1 DEFINICIONES

1.1.1 Tensión de fase a neutro

Dada una distribución de carga, el sistema debe operar a niveles de tensión del orden de $\pm 10\%$ de la tensión nominal, de acuerdo al diseño original. El rango aceptable para un sistema de 127 Volts es de ± 12.7 V, lo que equivale a un rango admisible de 114.3 a 139.7 V.

1.1.2 Tensión de fase a fase

Dada una distribución de carga, el sistema debe operar a niveles de tensión del orden de $\pm 10\%$ de la tensión nominal, de acuerdo al diseño original. El rango aceptable para un sistema de 220 Volts es de ± 22 V, lo que equivale a un rango admisible de 198 a 242 V.



1.1.3 Corriente

La corriente eléctrica en un sistema balanceado debe ser de la misma magnitud en cada una de las fases, de lo contrario se tendría que hacer un balance de cargas.

En teoría por el neutro no debe circular corriente, en el caso de que exista ésta deberá ser muy pequeña.

1.1.4 Frecuencia

La frecuencia es la razón a la cual el voltaje o la corriente sube y baja en ciclos por segundo y se mide en Hertz (Hz). Un Hz es la variación de un ciclo completo por segundo. En México la frecuencia normalizada a nivel nacional es de 60 Hz.

El rango de variación de frecuencia permitido es de 59.8 a 60.2 Hz, es decir, un ± 0.2

1.1.5 Armónicos

Los armónicos en los sistemas eléctricos en media y baja tensión son un problema de estado continuo con resultados peligrosos; además de que al combinarse con la frecuencia fundamental producen distorsiones.

En un sistema de alimentación ideal (libre de armónicos), las formas de onda de la corriente y la tensión son senoidales puras. Por ejemplo, en un circuito formado sólo por cargas lineales (cargas resistivas), la corriente que fluye a través de los componentes es proporcional a la tensión aplicada a una frecuencia determinada; es decir, si se aplica una tensión senoidal se produce una corriente senoidal en la carga. No obstante, en la práctica nos encontramos con componentes no lineales interactuando en los circuitos eléctricos. Esto es lo que da origen a la generación



de armónicos, los cuales son magnitudes eléctricas múltiplos de una componente fundamental.

Estas corrientes se expresan como un porcentaje de la corriente fundamental y la sumatoria de todos estos valores se expresan como "THD" (*Total Harmonic Distortion*), se expresa en porciento. Todos los valores de THD sobre el 10% son motivo de preocupación. La ecuación siguiente expresa cuantitativamente este concepto:

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{H_n}{H_1}\right)^2} * 100$$

donde:

THD: Distorsión Armónica Total.

H_n : Magnitud de la Componente Armónica.

H_1 : Frecuencia Fundamental.

n : Orden de la Armónica.

Las armónicas no se producen normalmente dentro de un sistema eléctrico; en la mayoría de los casos son producidas 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 principales consecuencias de estos fenómenos sobre los equipos son:

Transformadores y generadores: El contenido armónico provoca un fenómeno de calentamiento considerable sobre el valor de la corriente promedio cuadrática (RMS) debido a la histéresis y las corrientes parásitas.



Motores: Produce un sobrecalentamiento debido a las corrientes armónicas de secuencia negativa (5ta armónica) y las corrientes parásitas.

Conductores: Las armónicas provocan un sobrecalentamiento del conductor neutro, ello se debe a que las armónicas de secuencia cero se suman en el neutro en vez de cancelarse como sucedería con cargas lineales balanceadas.

Barra del neutro: Se sobrecarga debido a las armónicas de secuencia cero, así mismo se producen fugas por el neutro ocasionadas por el sobrecalentamiento en caso de sobrecargas.

Tablero de distribución: Calentamientos debido a corrientes parásitas que generan vibraciones y zumbidos.

Dispositivos de protección: Éstos se ven afectados por las armónicas provocando disparos en situaciones en las que no debiera producirse este fenómeno, ello se debe al calentamiento adicional en el tablero generado por la circulación de corriente de la 3ra armónica en el conductor neutro.

Instrumentos de medición: Las armónicas pueden provocar errores en la medición de energía cuando se utilizan equipos de inducción.

Equipos electrónicos: Al distorsionarse la forma de onda los equipos pueden sufrir fallas en su funcionamiento.

Sistemas de comunicaciones: En algunos casos suelen ocurrir interferencias (ruidos intermitentes) que pueden llegar a ser lo suficientemente intensos como para distorsionar las señales, causando fallas en su funcionamiento.



Las armónicas ocasionan muchos problemas por lo cual es recomendable que no rebasen el 5% para voltaje y para corrientes no deben estar arriba del 10%

1.1.6 Potencia

Potencia activa: Es la energía útil la cual se expresa en Watts (W), mediante esta potencia se puede ver el consumo de energía de nuestro sistema, es decir indica la demanda que se tienen en estas instalaciones.

Potencia reactiva: Los motores y transformadores y en general todos los dispositivos eléctricos que hacen uso del efecto de un campo electromagnético, requieren de potencia activa para efectuar un trabajo útil, mientras que la potencia reactiva es utilizada para la generación del campo magnético. Esta potencia es expresada en volts-amperes reactivos (VAR).

Potencia aparente: El producto de la corriente con el voltaje y se expresa en volts-amperes (VA). Es la suma de los vectores gráficos de la potencia activa y la potencia reactiva.

1.1.7 Energía

La unidad de consumo de energía de un dispositivo eléctrico se mide en watt-hora (vatio-hora), o en kilowatt-hora (kW-h) para medir miles de Watts.

Normalmente la empresa mexicana que suministra energía eléctrica a sus diferentes consumidores (CFE), en lugar de facturar el consumo en watt-hora, lo hace en kilowatt-hora (kW-h).



1.1.8 Factor de potencia

Un problema común que se presenta en las instalaciones eléctricas es el llamado bajo factor de potencia, el cual está relacionado con la calidad del suministro de la energía eléctrica, en consecuencia existirán variaciones de voltaje y pérdidas en las instalaciones. Lo que implica pérdidas económicas importantes.

El factor de potencia es la relación de la potencia real usada en un circuito entre la potencia aparente y pueda representarse por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P_{REAL}}{P_{APARENTE}} \left[\frac{kW}{kVA} \right]$$

donde:

FP = Factor de potencia

P_{REAL} = Potencia real

$P_{APARENTE}$ = Potencia aparente

Algunas consecuencias en las instalaciones eléctricas por bajo factor de potencia son:

1. Aumenta las pérdidas por efecto Joule.
2. Aumento en la caída de tensión, lo que ocasiona insuficiencia en el suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.) y por tanto estos equipos sufrirán una reducción en su potencia de salida.

El valor del factor de potencia por norma debe ser superior o igual a 0.9



1.1.9 Transitorios de tensión y de corriente

Los transitorios son el resultado natural de cualquier actividad eléctrica. Siempre están presentes en los sistemas eléctricos. Sin embargo, el aumento en las instalaciones eléctricas de equipos electrónicos sensibles ha incrementado la necesidad de controlar los efectos dañinos de los transitorios de tensión y corriente en los sistemas eléctricos.

Se pueden clasificar por su origen como:

- **Transitorios Externos:** Son generados fuera del sistema eléctrico o de la red de distribución de baja, media o alta tensión por fenómenos como rayos, descargas eléctricas, campos magnéticos, etc. Son los de menor ocurrencia; sin embargo, los de mayor potencia destructiva.
- **Transitorios Internos:** Son generados dentro de la instalación eléctrica normalmente por los mismos equipos internos y dispositivos de *switches*. Son los de mayor ocurrencia, pero con magnitud pequeña que no daña a los equipos de forma instantánea. Los degrada con el tiempo y produce lo que se conoce como oxidación electrónica. Los producen los motores, aires acondicionados, balastos, elevadores, arrancadores, etc.

1.2 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Las cargas de los sistemas de distribución se clasifican en:

1. Industriales
2. Comerciales
3. Habitacionales (urbanas y rurales), con niveles menores de demanda y



consumo de energía.

La parte del sistema eléctrico comprendida desde la estación generadora hasta las líneas de distribución es operada en México por la empresa de servicio eléctrico CFE, y es de su propiedad.

A partir de la carga eléctrica, la planificación, el diseño y la operación son responsabilidad del usuario.

El diseño del sistema de distribución que abastece los componentes de carga implica ciertas consideraciones básicas. Éstas son:

1. Seguridad
2. Confiabilidad
3. Costo
4. Nivel y características de tensión
5. Facilidad de mantenimiento
6. Flexibilidad de servicio

Seguridad. Abarca dos aspectos: protección de la vida tanto de los usuarios como de los operadores del sistema, del equipo y la propiedad. La protección de la vida es de máxima importancia y puede realizarse más eficazmente utilizando:

1. Componentes eléctricos adecuados de alta calidad.
2. Disposiciones de sistema adecuadas y fáciles de operar.
3. Construcción con cubierta metálica e interbloqueo apropiado.
4. Aislamiento apropiado o salvaguarda de conductores energizados.
5. Conexión a tierra del sistema y equipo en forma apropiada.
6. Prácticas de instalación y programas de mantenimiento adecuados.
7. Capacidades de protección contra cortocircuitos de los equipos de



interrupción y dispositivos protectores coordinados apropiadamente, a fin de garantizar la supresión selectiva de los componentes del sistema en caso de falla.

Confiabilidad. Implica no sólo el uso de componentes de alta calidad con bajos índices de falla para áreas críticas, sino también, en algunos casos, la provisión de fuentes alternativas de energía en caso de desperfecto del equipo o para su reparación.

Costo. La decisión de incluir una fuente alternativa, o de redundancia de equipo, se basa en una evaluación de todos los aspectos de ingeniería, incluyendo los costos y las consecuencias de la pérdida de energía eléctrica. Los diseños de sistemas simples también son menos susceptibles a los errores de operación durante una emergencia que los diseños complicados. Debido a los incrementos esperados en el costo de la energía, no sólo deben considerarse primero los costos de un sistema, sino que también se deben investigar la eficiencia de sus componentes y las disposiciones de los circuitos.

Nivel y características de tensión. Intervienen la magnitud, frecuencia, armónicos y, en el caso de tres fases, el equilibrio de las magnitudes de voltaje entre fases. Lo ideal es una onda senoidal pura con magnitud y frecuencia constantes. Se deben hacer consideraciones de diseño sobre la fluctuación y regulación del voltaje, y sobre los dispositivos de carga que producen armónicos en las ondas de forma de tensión y corriente y transitorios en el sistema. Tales dispositivos son los convertidores electrónicos, algunos dispositivos de control de velocidad y de voltaje, y las operaciones de interrupción bajo carga.

Mantenimiento. Es necesario para mejorar la seguridad y la confiabilidad, y el diseñador de un sistema debe incorporar las características que faciliten el mantenimiento y las inspecciones de rutina.



Flexibilidad de servicio. Significa que el diseño debe tener aspectos que le permitan admitir cambios fáciles en la ubicación, magnitud o carácter de la carga. En el diseño original se debe planear la disposición del espacio suficiente que permita una expansión sin producir la reorganización indebida de los circuitos.

Debido a la naturaleza diversa de los requisitos de energía eléctrica de diferentes usuarios, deben investigarse varias disposiciones de circuito básicas para lograr la más apropiada. Sin embargo, es necesario considerar ciertos factores antes de tomar una decisión.

En primer lugar, las cargas deben analizarse en cuanto a su magnitud, ubicación dentro de la instalación, variación durante el día y si sus tipos son como resistivas, inductivas, capacitivas, de motor, etcétera. Las cargas pueden describirse en función de diversas características: factor de demanda, factor de carga, factor de diversidad, demanda máxima, carga pico y carga promedio. Las tres primeras se utilizan en la determinación de la carga efectiva de un grupo de dispositivos, en tanto que las tres últimas se aplican a una carga o dispositivo dados. La siguiente es una descripción de algunos de estos factores de carga.

Factor de demanda. Es la razón de la demanda máxima sobre un sistema entre la carga total conectada (suma de las capacidades continuas de los dispositivos conectados al sistema).

Factor de carga. Es la razón de la carga media en un periodo específico de tiempo entre la carga pico que ocurre durante ese periodo.

Factor de diversidad. Es la razón de la suma de las demandas máximas en los diversos componentes del sistema entre la demanda máxima de éste (el factor de diversidad es ≥ 1).



Demanda máxima. Es la mayor carga integrada que ocurre en un periodo específico de tiempo, generalmente lapsos de 15 ó 30 minutos.

La demanda máxima se determina aplicando los factores de demanda y de diversidad a la carga conectada. El factor de demanda varía considerablemente con cargas diferentes y se basa en la experiencia obtenida en aplicaciones similares. Entonces la demanda sobre el sistema es igual a la carga total conectada, multiplicada por el factor de demanda, suponiendo un factor de diversidad igual a uno. Si se conoce este factor, entonces la demanda así obtenida debe dividirse entre el factor de diversidad para obtener la demanda real. En muchos casos se desea utilizar un factor de diversidad de uno para tener en cuenta la suma de cargas y la expansión.

1.2.1 Disposiciones básicas de circuitos: plantas industriales

Entre las muchas variedades posibles de disposiciones para subestaciones, alimentadores y circuitos, han surgido algunos diseños básicos que son aplicables a la mayor parte de los sistemas de distribución de energía eléctrica. En estas disposiciones fundamentales se utiliza la idea general de suministrar energía a la subestación del centro de carga la tensión primaria, y distribuirla con circuitos relativamente cortos y de baja tensión hasta los dispositivos de utilización. Tales disposiciones básicas se clasifican como de circuitos primarios radiales, de circuitos secundarios selectivos, de circuitos primarios selectivos, de circuitos primarios en lazo o anillo, y de circuitos primarios selectivos y red secundaria. Las diversas disposiciones de circuitos son el resultado de una transacción entre el costo y la continuidad o confiabilidad de servicio durante la falla de ciertos componentes del sistema.

La disposición de circuitos alimentadores primarios radiales suministra potencia a voltajes primarios de 2.4 a 34.5 kV por cable, para subestaciones ubicadas cerca de los centros de carga eléctrica. Esto se ilustra en el diagrama unifilar de la *figura 1.1*. Esta disposición será la menos costosa en la mayor parte de las instalaciones, puesto que no hay duplicación de equipo. Sin embargo, la falla de un cable o un transformador primario producirá la interrupción de servicio para el área alimentada por el equipo con desperfecto. Asimismo, durante el mantenimiento, el área que abastece este equipo quedará desenergizada por completo.

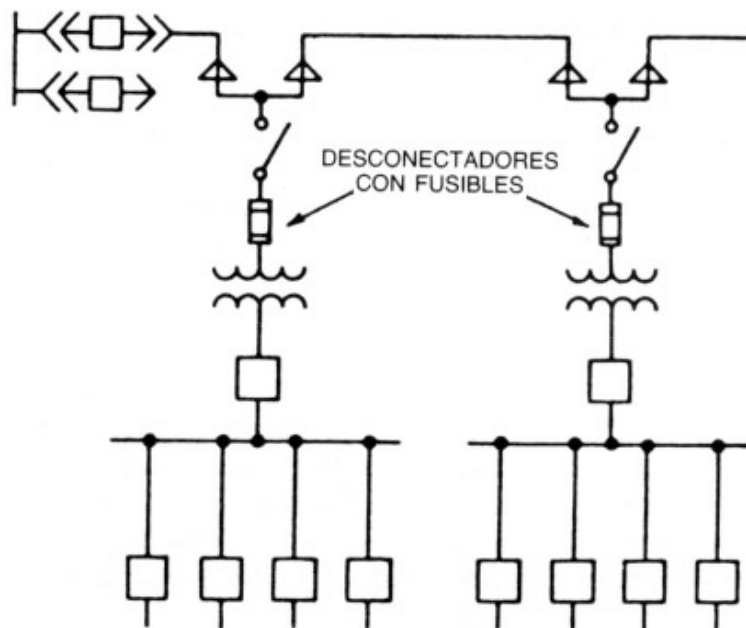


Fig. 1.1 Disposición típica de circuitos primarios radiales

Con la suficiente capacidad instalada de la subestación, la disposición radial puede atender adecuadamente cualquier diferencia que se presente cuando varían las cargas. El sistema es simple y, con equipo adecuado e instalado apropiadamente, es seguro y fácil de operar y ampliar. Los alimentadores secundarios dan por resultado una excelente regulación de voltaje.



A fin de proporcionar un nivel de confiabilidad más alto se puede utilizar la disposición de circuitos secundarios selectivos. En este caso el sistema emplea dos transformadores y dos alimentadores primarios para alimentar cada área de centro de carga.

Se dispone de trayectorias duplicadas de suministro desde la fuente para abastecer cada barra colectora (o bus) secundario; esto hace posible proporcionar energía a todos los colectores secundarios cuando un transformador o un circuito alimentador primario está fuera de servicio. Estas trayectorias duplicadas pueden lograrse con un enlace entre dos subestaciones de un sólo transformador por medio de un alimentador secundario, o bien con el uso de un sistema de extremos dobles con un disyuntor de acoplamiento entre las barras colectoras secundarias. Esto se ilustra en la *figura 1.2*, donde los disyuntores de acoplamiento B normalmente están interbloqueados (enclavados) con los dos disyuntores de transformador A, de modo que un B no puede ser cerrado a menos que esté abierto uno de los disyuntores de transformador A. Esta disposición minimiza el cortocircuito impuesto a los interruptores de máxima (o disyuntores) secundarios de bajo voltaje. Cuando ocurre una falla en un cable o transformador primarios, puede restaurarse el servicio a las cargas abriendo el disyuntor de transformador asociado al circuito en falla, y cerrando los disyuntores de acoplamiento en todas las ubicaciones con desperfecto. El alimentador y el transformador primarios restantes deben poder soportar la carga adicional durante el tiempo en que las otras unidades permanezcan fuera de servicio.

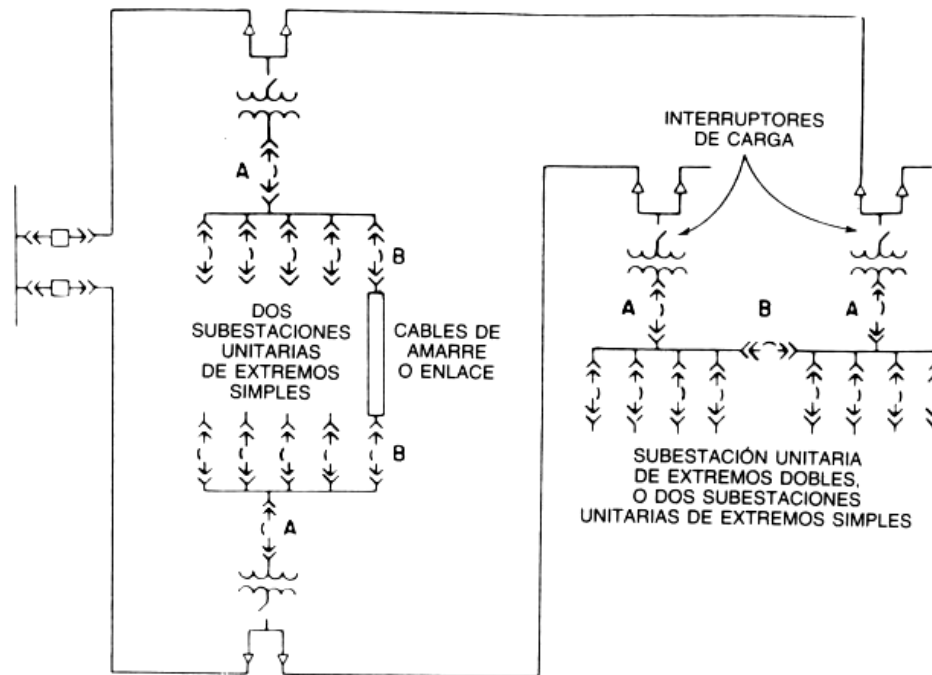


Fig. 1.2 Disposición típica de circuitos secundarios selectivos, con dos posibles puntos de conexión secundarios

En la disposición con circuitos primarios selectivos, se llevan dos alimentadores a cada transformador de subestación, como se muestra en la *figura 1.3*. La mitad de los transformadores se conectan normalmente a uno de los dos alimentadores primarios. El sistema se debe diseñar de modo que el alimentador restante tenga la suficiente capacidad para soportar la carga total.

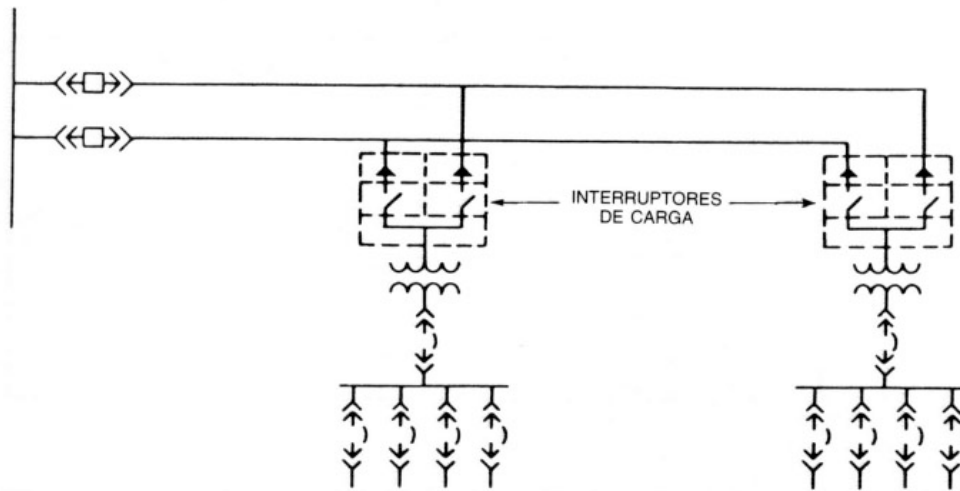


Fig. 1.3 Disposición típica de circuitos primarios selectivos, con dos interruptores interbloqueados de tiro triple

En el caso de falla de un alimentador y cuando hayan de operarse interruptores mientras está energizado un circuito alimentador primario, el método más seguro es utilizar disyuntores de potencia adecuados para realizar la transferencia. Sin embargo, el costo es relativamente alto para tal disposición, y este método no se usa a menos que se desee la transferencia automática. La práctica usual es emplear dos conmutadores interruptores de carga interbloqueados de modo que sólo uno pueda ser cerrado a la vez para efectuar la transferencia (interconexión) de un alimentador a otro, como se ve en la figura 1.3.

En caso de falla de un transformador, el procedimiento preferido para determinar cuál es el transformador en desperfecto es desenergizar el alimentador sin avería y conectar cada transformador a su vez al alimentador en buenas condiciones, energizando el alimentador después de conectar cada transformador. Este procedimiento continúa hasta que todos los transformadores hayan sido conectados al alimentador citado, lo cual indica que el último transformador es el defectuoso.



La disposición primaria selectiva proporciona aproximadamente el mismo grado de servicio que el sistema secundario selectivo. Esto depende de la capacidad del transformador de reserva del sistema secundario selectivo.

Hasta ahora los sistemas descritos han tenido alimentadores primarios radiales. Cuando los centros de carga están relativamente distantes, el uso de un circuito primario en lazo o anillo puede ofrecer algunas ventajas. El sistema de circuito primario en anillo (*looped*) puede utilizar un sólo disyuntor de alimentador primario y un interruptor de carga seccionador en cada transformador, o bien dos interruptores de alimentador primario y dos seccionadores en cada transformador, como se indica en la *figura 1.4*.

En caso de una falla en un transformador o alimentador primario en cualquier disposición, el disyuntor o los disyuntores de alimentador primario se abrirán y se cortará el servicio para todas las cargas de ese anillo. Para localizar la falla se abren todos los interruptores de carga y se cierran luego uno cada vez en sucesión. Es más seguro cerrar únicamente los interruptores de carga cuando están abiertos los disyuntores primarios. Esto eliminará el problema de cerrar el interruptor sobre una falla. Cuando se localiza la avería, ésta se puede aislar dejando abiertos los interruptores de carga apropiados. En la disposición de la parte superior de la *figura 1.4*, la falla en el transformador o en un anillo alimentador dará por resultado que esa carga quede fuera de servicio. En la disposición de la parte inferior de la misma *figura 1.4*, sólo una falla de transformador puede hacer que su carga quede fuera de servicio, puesto que los dos interruptores en cada transformador hacen posible separar o aislar una falla o avería en cualquier lugar del anillo.

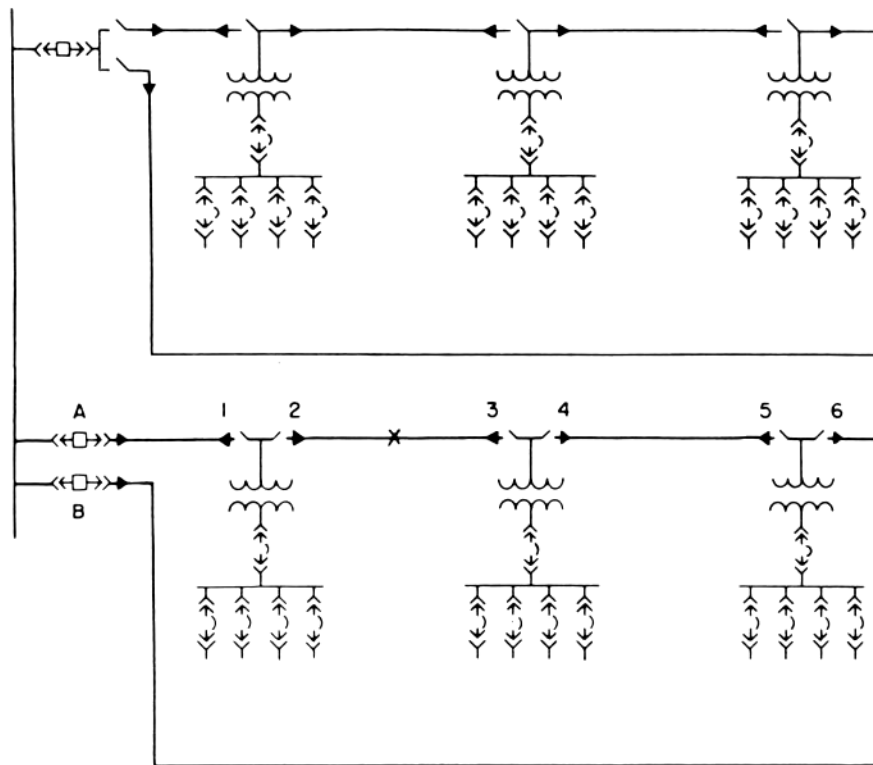


Fig. 1.4 Dos disposiciones posibles de circuito primario en lazo (o anillo), con interruptores de seccionalización

La disposición de anillo de la parte superior de la *figura 1.4* cuesta un poco más que la disposición radial, pero puede proporcionar servicio al resto del sistema en el caso de una falla del anillo de alimentador que ha sido aislada. Con una falla en el alimentador primario, el servicio se interrumpe a todas las cargas hasta que se corrige la avería.

La disposición de lazo en la parte inferior de la *figura 1.4* cuesta menos que la disposición selectiva primaria y proporcionará, como lo hace la selectiva primaria, servicio a todas las cargas de un alimentador primario que ha sido aislado. Sin embargo, en el caso de fallas de transformador, el servicio se interrumpirá a las cargas asociadas en las disposiciones primaria selectiva y primaria en anillo. La principal desventaja de la disposición primaria en anillo es que una falla en un



transformador o un alimentador primario, hasta que se aísla, causa una interrupción en el servicio a todas las cargas.

La forma del sistema de red que se utiliza con mayor frecuencia en las plantas industriales es la disposición de *circuitos primarios selectivos* y red secundaria que se ilustra en la *figura 1.5*. Esta disposición de sistema difiere de la descrita antes en que una falla de transformador o alimentador primario no causará siquiera una interrupción o suspensión momentánea de energía a ninguna de las cargas. Como se ve en la *figura 1.5* esto se debe a que los transformadores secundarios se interconectan y operan en paralelo, y se utilizan dos o más circuitos de alimentador primario para abastecer el sistema. Esto proporciona más de una trayectoria paralela desde el suministro de potencia hasta cualquier carga.

Es posible la operación en paralelo de los circuitos de alimentación primarios mediante el uso de protectores de red, como se muestra en la *figura 1.5*. Un protector de red consta básicamente de un interruptor automático en aire operado eléctricamente y controlado por un relevador direccional de corriente y un relevador de voltaje de fase. En caso de falla de alimentador primario, la corriente fluirá desde el alimentador secundario hasta la falla pasando por todos los protectores de red relacionados con aquella. Este flujo invertido de corriente origina que el protector de red opere y aisle la falla desde el secundario. Durante este tiempo el disyuntor de alimentador primario se dispara a fin de incomunicar la falla del suministro primario. Cuando se elimina la avería y se restaura el voltaje en el alimentador por el cierre del disyuntor respectivo, los relevadores de red en todos los protectores de red relacionados permiten que dichos protectores se cierren automáticamente cuando se restablecen las condiciones de flujo de corriente desde el primario hasta el secundario.

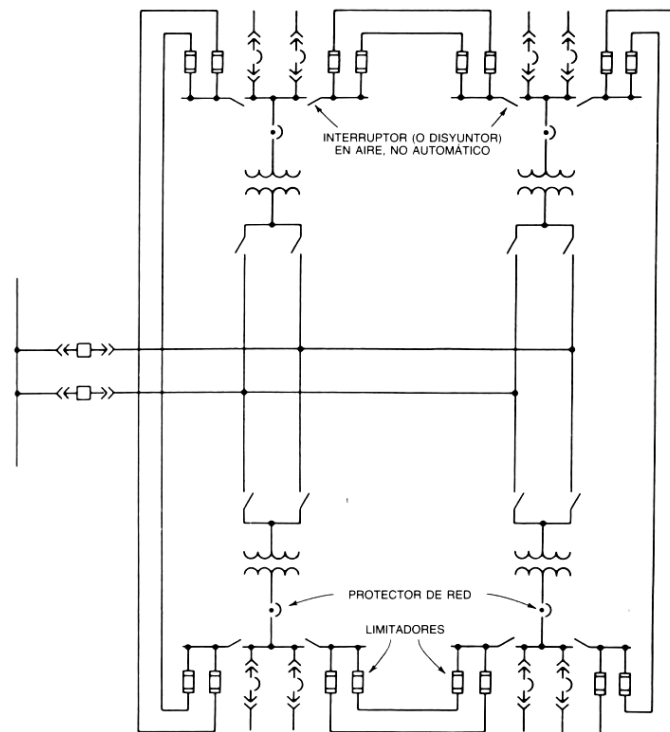


Fig. 1.5 Disposición típica de circuitos primarios selectivos y red secundaria con protección de red

En caso de operación normal, los transformadores se interconectan con los alimentadores primarios de forma que haya el mismo número sobre cada alimentador. Para dos alimentadores primarios, la mitad de los transformadores estaría cargada sobre cada alimentador. En el caso de una sola falla de alimentador primario que siga a la operación de disparo normal, los transformadores que han sido desconectados por la operación del disyuntor y el protector de red pueden conectarse manualmente a un alimentador energizado restante. Los protectores de red relacionados con aquellos transformadores se cerrarán automáticamente cuando se energice el transformador.

Además, al proporcionar un alto grado de servicio a las cargas, esta disposición de red ofrece gran flexibilidad para soportar el cambio y el aumento de carga debido a los secundarios interconectados. Los circuitos de enlace entre los transformadores admiten que los transformadores adyacentes compartan carga, y con eso dan



lugar a que haya cargas en algunas barras colectoras que rebasen la capacidad nominal de transformador en esa barra. La corriente que se puede transferir entre barras colectoras de transformador depende de la impedancia del circuito de enlace, de la impedancia del transformador y de las características de la carga.

1.2.2 Disposiciones de circuitos básicos: edificaciones comerciales

Los edificios comerciales utilizan disposiciones de circuitos similares a las descritas para sistemas industriales, pero con ciertas diferencias. La orientación geométrica de los edificios comerciales difiere de la de edificaciones industriales. Éstas tienden a ser bajas y largas, en tanto que en los edificios comerciales son altos y angostos. Sin embargo, las dimensiones volumétricas y las cargas eléctricas pueden ser iguales.

Las diferencias que han de considerarse son:

1. El valor extremadamente alto del espacio de piso y del espacio volumétrico en edificaciones comerciales.
2. El espacio limitado de piso a plafón.
3. El hecho de que muchas edificaciones comerciales en zonas urbanas son abastecidas con tensiones de 208Y/120 ó de 480Y/277 V desde el sistema de red secundaria de bajo voltaje del servicio de energía eléctrica.

Cuatro de las disposiciones de circuito básicas descritas para sistemas industriales se utilizan en edificaciones comerciales. Estas son: la radial, la secundaria selectiva, la red secundaria y la primaria selectiva.

La que se aplica más ampliamente es la disposición radial, debido a su sencillez y costo. La disposición selectiva secundaria es del 10 al 30% más costosa que la radial, pero se utiliza cuando se desea un mayor grado de confiabilidad.



La red secundaria se emplea sólo cuando se requiere un alto grado de confiabilidad, tal como en los hospitales, debido a su alto costo inicial y mayor complejidad de operación.

En casos especiales en que las fallas en alimentador primario pueden ser un problema, es posible aplicar la disposición primaria selectiva que proporciona una trayectoria alterna desde la fuente hasta el transformador. Normalmente, las disposiciones de circuitos preferidas son la radial o la secundaria selectiva.

1.2.3 Selección de tensiones del sistema: plantas industriales

Probablemente el factor de más importancia en el diseño de un sistema de energía es la selección del nivel de tensión. Esto es así porque, una vez que se establece el nivel de tensión, su cambio es muy difícil y costoso. En términos generales, el nivel de tensión se determina a partir de consideraciones económicas. Sin embargo, en la práctica el nivel puede ser modificado por normas de la industria, disponibilidad de equipo, materiales de construcción y otros factores.

En el análisis económico debe tenerse en cuenta lo siguiente:

1. Clase de servicio disponible de la empresa suministradora.
2. Tamaño total de la instalación.
3. Planes de crecimiento futuro.
4. Características del equipo por abastecer.
5. Densidad de la carga.
6. Consideraciones de seguridad, incluyendo las calificaciones del personal de operación y mantenimiento.
7. Si se trata de una planta nueva o de una que ha de ampliarse.



Los factores que tienen una gran influencia sobre el costo global de la tensión seleccionada son:

1. Tamaño de los circuitos alimentadores, equipo de interrupción, motores y otros equipos eléctricos.
2. Intensidad de la corriente de falla del sistema.
3. Disposición de circuitos y número de fases.

A través de los años, mediante un acuerdo entre los diseñadores de equipo eléctrico, se han ido desarrollando ciertos niveles estándares de tensión. Los valores aparecen en la norma NOM-001-SEDE-2005, titulada *Voltage Ratings for Electric Power Systems and Equipment* (60Hz). Esta publicación contiene todas las tensiones de sistema nominales preferidos y otras tensiones de sistema relacionadas, utilizadas generalmente en los Estados Unidos. Esta norma también especifica las fluctuaciones de tensión aceptables a los límites de tolerancia para estas tensiones en el punto de entrega por el servicio de suministro, y en el punto de conexión al equipo de utilización. Los términos que se emplean para describir diversas condiciones de la tensión eléctrica se definen como sigue:

- **Tensión nominal.** Valor nominal asignado a un circuito o sistema con objeto de designar convenientemente su clase de tensión.
- **Tensión de servicio.** La tensión en el punto en que se interconectan el sistema eléctrico del abastecedor y el usuario.
- **Fluctuación de tensión.** Diferencia entre las tensiones máxima y mínima de estado estable que existen a un nivel de tensión dada. Las fluctuaciones momentáneas o transitorias, tales como las que ocurren durante arranque de motores, operación de interruptores o fallas, no se incluyen en la llamada fluctuación de tensión (variación extrema).
- **Caída de tensión.** Diferencia de tensión, en cualquier momento, entre el



extremo abastecedor y el extremo receptor en diversos componentes de sistema, como transformadores, alimentadores, circuitos derivados, etc.

- **Regulación de tensión.** Cambio de tensión entre las condiciones de carga nula y plena carga, en función de la tensión a plena carga en el extremo receptor de un componente dado. La tensión del extremo abastecedor generalmente se supone constante para este cálculo.

La fluctuación de tensión o los límites de tolerancia aceptables se determinaron considerando los efectos de las variaciones de tensión sobre el rendimiento y el límite de duración de diversos tipos de equipo de utilización.

Puesto que en diversos intervalos de tensión factores distintos son afectados de forma diferente por el nivel de tensión, la selección del valor de tensión usualmente se considera en:

1. Tensiones de 600 V y menores.
2. Tensiones de 601 a 15,000 V.
3. Tensiones de 15,001 a 34,500 V.
4. Tensiones de 34,501 y mayores.

Tensiones de 600 V o menores. Puesto que la mayor parte de las cargas en plantas industriales son motores polifásicos de potencia integral y soldadoras, la elección de la tensión nominal del sistema en esta clase para abastecer estas cargas es de 208, 240, 480 (es decir, 480 Y/277) o bien 600 V. Para un sistema con una capacidad dada en kilovolts-ampere (kVA), el costo de un sistema de 240 V es aproximadamente dos veces el del sistema de 480 ó 600 V. Razones diferentes a las del costo determinan algunas veces el nivel de tensión seleccionado. Al comparar los sistemas de 480 V y de 600 V, el costo es aproximadamente igual (el de 600 V es menor en un pequeño porcentaje), así que la disponibilidad del equipo estándar es el factor determinante. Al efectuar el



pedido de máquinas, herramienta u otro equipo de utilización, con frecuencia es difícil obtenerlo con motores de 575 (ó 550) V nominales; además, las bombas y otros equipos que producen normalmente los fabricantes tienen tensiones de 220 (ó 230) V y 440 (ó 460) V. Otra ventaja la tensión de 480 V es la posibilidad de utilizar una distribución de 480 Y/277 V, con 277 V para alumbrado fluorescente.

Cuando se comparan los sistemas de 480 V con los de 240 V, la economía es el factor predominante si los sistemas han de ser equiparables en rendimiento. En industrias en las que existe un grado notable de humedad, como, por ejemplo, lecherías y mataderos, se considera que 240 V es más seguro que 480 V. Asimismo, durante el trabajo sobre circuitos energizados hay una probabilidad mayor de sesiones por descargas eléctricas, con altos potenciales a tierra de fase a fase. Los registros de operación muestran que el mayor factor para la seguridad es la conexión a tierra apropiada y segura de todas las partes que no conducen corriente, de modo que las averías de aislamiento no produzcan potenciales a nivel peligroso en las partes no conductoras de corriente ya citadas. Sin embargo, cualquier tensión superior a 50 V puede ser mortal. En todas las ubicaciones, los conductores que lleven corriente deben estar colocados dentro de cubiertas apropiadas y conectadas seguramente a tierra; cuando se requiera trabajar en ellos deben ser desenergizados.

Existen algunas aplicaciones en las que un sistema de 208 Y/120 V es más económico que uno de 480 V, debido a que los tipos de equipo de utilización que intervienen deben operar a 120 V; cuando tal equipo constituye más del 50 ó 60% de la carga total, entonces un sistema de 208 Y/120 V puede ser más económico que uno de 480 V. Son ejemplos las industrias que usan herramientas manuales, tales como una fábrica productora de vestuario en las que se utilizan tijeras o cortadoras portátiles operadas con motor eléctrico, o una planta de ensamblaje de aparatos electrónicos en la que se usan cautines eléctricos para soldar, talados y otras herramientas manuales.



Se recomiendan para plantas industriales los sistemas de 480 V. Cuando se requieren tensiones más bajas, puede usarse el sistema de 208 Y/120 V. Cuando existe una carga significativa de alumbrado fluorescente debe considerarse el sistema de 480 Y/277 V.

Tensiones de 601 V a 15 kV. En este caso de plantas industriales, las tensiones de esta clase se utilizan principalmente para distribución de energía primaria. Las excepciones son, entre otras, las plantas químicas muy grandes y las fábricas de acero.

El *National Electrical Code* (NEC) no tiene restricciones especiales para tensiones de 15 kV o menores, por lo que generalmente no hay razón de transformar a 2.4 ó 4.1 kV para distribución a la subestación de centro de carga. La tensión se transforma a las tensiones de utilización en la subestación.

Por encima de 15 kV, el NEC requiere que el servicio entre en un tablero de interruptores del tipo de cubierta metálica o una bóveda de transformador. Por consiguiente, para suministros de energía con tensiones superiores a 15 kV, la transformación a un voltaje más bajo es técnica y económicamente deseable para distribución de energía a las subestaciones de centro de carga de la planta. En ciertos estudios se ha demostrado que uno de éstas dos tensiones, 4,160 ó 13,200 V, será suficiente en la mayor parte de los casos. Por lo general, para una capacidad de transformador de alimentación o una capacidad de generación inferior a 10 MVA, la tensión de 4,160 V es la tensión distribución más económica. Para una capacidad superior a 20 MVA, la más económica es el de 13.2 kV, pero para capacidades entre 10 MVA y 20 MVA, la tensión más económica depende de otros factores como el crecimiento esperado de la planta.



El tamaño de los motores de una planta influye en la elección de la tensión de sistema más económico. En general, para motores de menos de 200 hp, un sistema de 480 V es más económico en términos de costo inicial. En el caso de motores de más de 200 hp, el sistema de 2.4 kV es más económico, siempre que las cargas concentradas sean menores de 7,500 kVA por barra colectora. Para cargas superiores a 7,500 kVA, puede necesitarse un sistema de 4,160 V para obtener equipo que maneje la corriente de corto circuito disponible.

1.2.4 Selección de tensiones de sistema: edificios comerciales

En el caso de edificaciones tipo comercial, generalmente la tensión de utilización preferido es de 480 Y/277 V. Aquí las cargas trifásicas se conectan directamente a los conductores de línea de 480 V, en tanto que el alumbrado fluorescente de techo se conecta entre fase y neutro a 277 V. Para proporcionar salidas de contacto comunes de 120 y de 208 V para máquinas de oficina, se utiliza un transformador de 480-208 Y/120 V.

Para muchos edificios existentes en zonas intraurbanas sólo se disponía de 208 Y/120 V en la época de su construcción; pero en años recientes la mayor parte de los sistemas de servicio proporcionan alimentación de red local a 480 Y/277 V.

En el caso de los grandes motores que se utilizan en sistemas de aire acondicionado y otros, se debe considerar su conexión a un transformador independiente, para reducir el efecto de la caída de voltaje por arranque sobre otros equipos conectados. Para motores de más de 200 hp, un sistema de 2.4 kV puede ser más económico que uno de 480 V. Hay que advertir que los electricistas de mantenimiento en edificaciones comerciales rara vez están cualificados para atender equipos de tensión superior a 600V. Por consiguiente, puede ser necesario utilizar mantenimiento contratado.