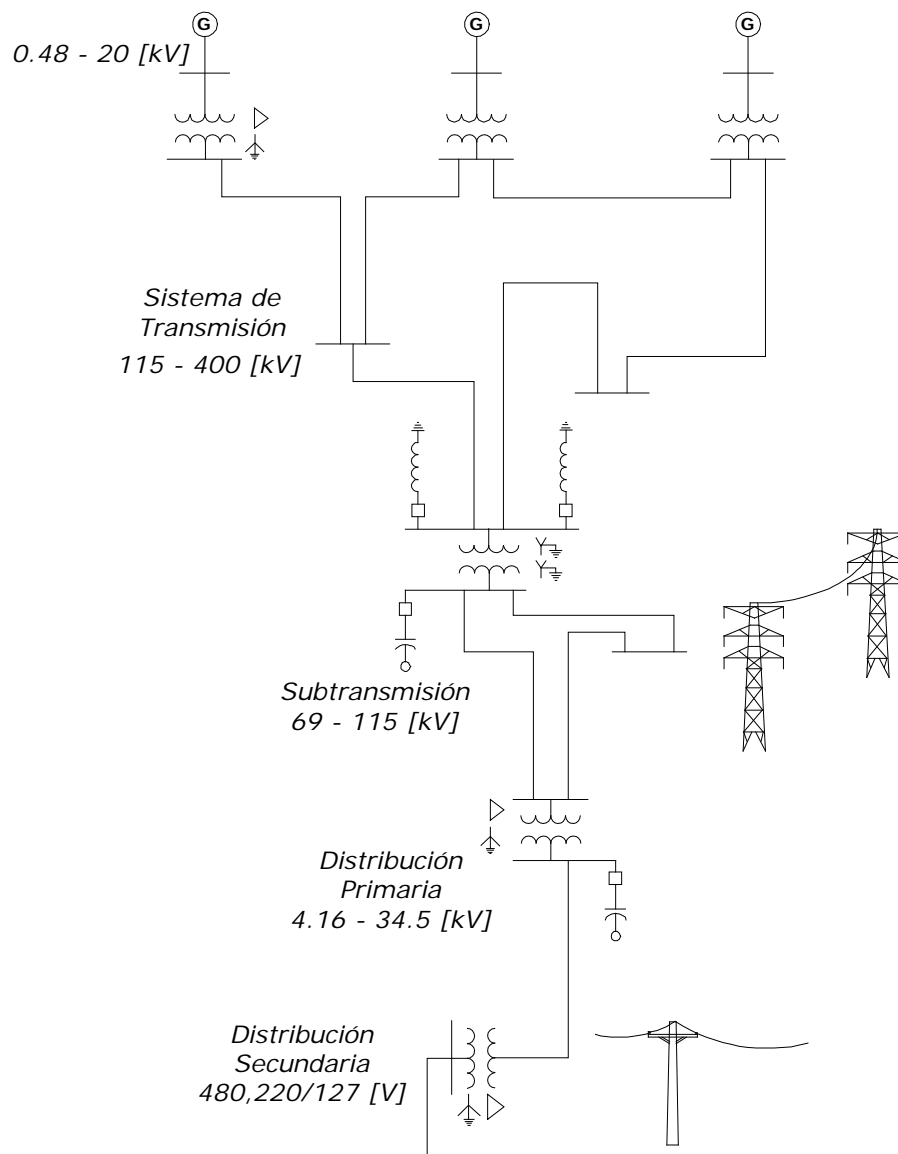


Sistema Eléctrico de Potencia

El sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos que tiene como fin generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible.

Un sistema eléctrico de potencia consta de plantas generadoras que producen la energía eléctrica consumida por las cargas, una red de transmisión y de distribución para transportar esa energía de las plantas a los puntos de consumo, así como el equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de continuidad de servicio, regulación de tensión y control de frecuencia requeridas.¹



Sistema Eléctrico de Potencia

1.1 Cargas en un Sistema Eléctrico de Potencia

La carga de un sistema está constituida por un conjunto de cargas individuales de diferentes tipos, industrial, comercial y residencial.

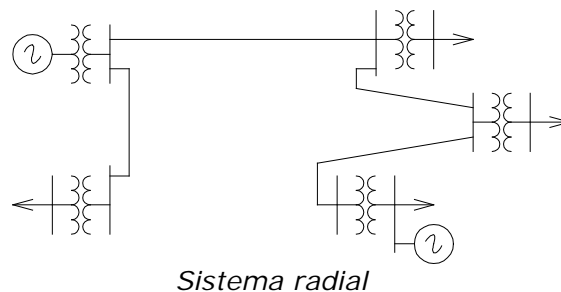
En general, una carga absorbe potencia real y potencia reactiva; es el caso de las cargas con dispositivos de estado sólido, por ejemplo. Las cargas puramente resistivas absorben únicamente potencia real.² De aquí que las cargas de un sistema eléctrico también se clasifiquen en lineales y no lineales.

1.2 Topología de un Sistema Eléctrico

Un sistema eléctrico dependiendo de su confiabilidad se puede clasificar en tres tipos:³

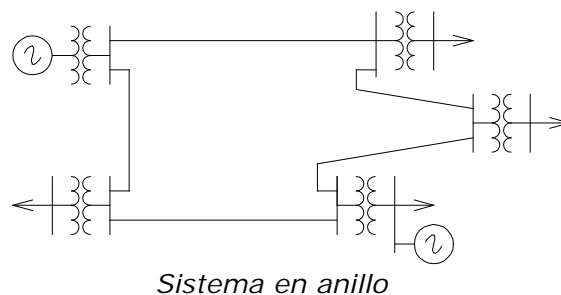
Sistema radial (menos confiabilidad y más económico)

En un sistema radial las cargas tienen una sola alimentación, de manera que una falla en la alimentación produce una interrupción en el suministro.



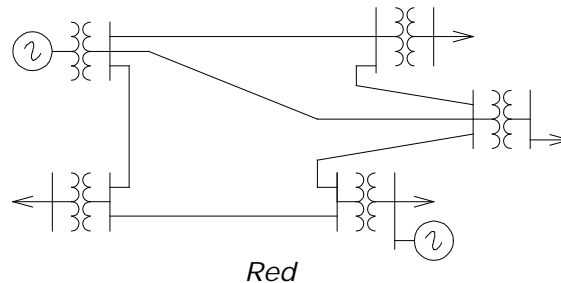
Sistema en anillo (mayor confiabilidad y más caro)

Con un sistema en anillo se tiene una doble alimentación y puede interrumpirse una de ellas sin causar una interrupción del suministro.



Red (mayor confiabilidad y costo)

Con éste tipo de sistema se aumenta el número de interconexiones y en consecuencia, la seguridad del servicio.



1.3 Subestaciones eléctricas

Es un conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia y se encarga de transformar tensiones y derivar circuitos de potencia.⁴

Las subestaciones pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de función que desarrollan en:⁵

- a) Subestaciones variadoras de tensión
- b) Subestaciones de maniobra o seccionadoras de circuito
- c) Subestaciones mixtas

Asimismo, pueden agruparse de acuerdo con la potencia y tensión que operan en:⁶

- a) Subestaciones de transmisión. Operan en intervalos de tensión desde 230 [kV], 400 [kV] y mayores.
- b) Subestaciones de subtransmisión. Operan en intervalos de tensión desde 69 [kV] hasta 161 [kV].
- c) Subestaciones de distribución primaria. Operan desde 4.16 [kV] hasta 34.5 [kV].
- d) Subestaciones de distribución secundaria. Operan desde 220/127 V hasta 480 [V].

1.3.1 Arreglos de barras

El arreglo de barras de una subestación es la configuración ordenada de los elementos que lo conforman.⁷

La elección del arreglo de una subestación depende de las características de cada sistema eléctrico y de la función que realiza dicha subestación en el sistema.

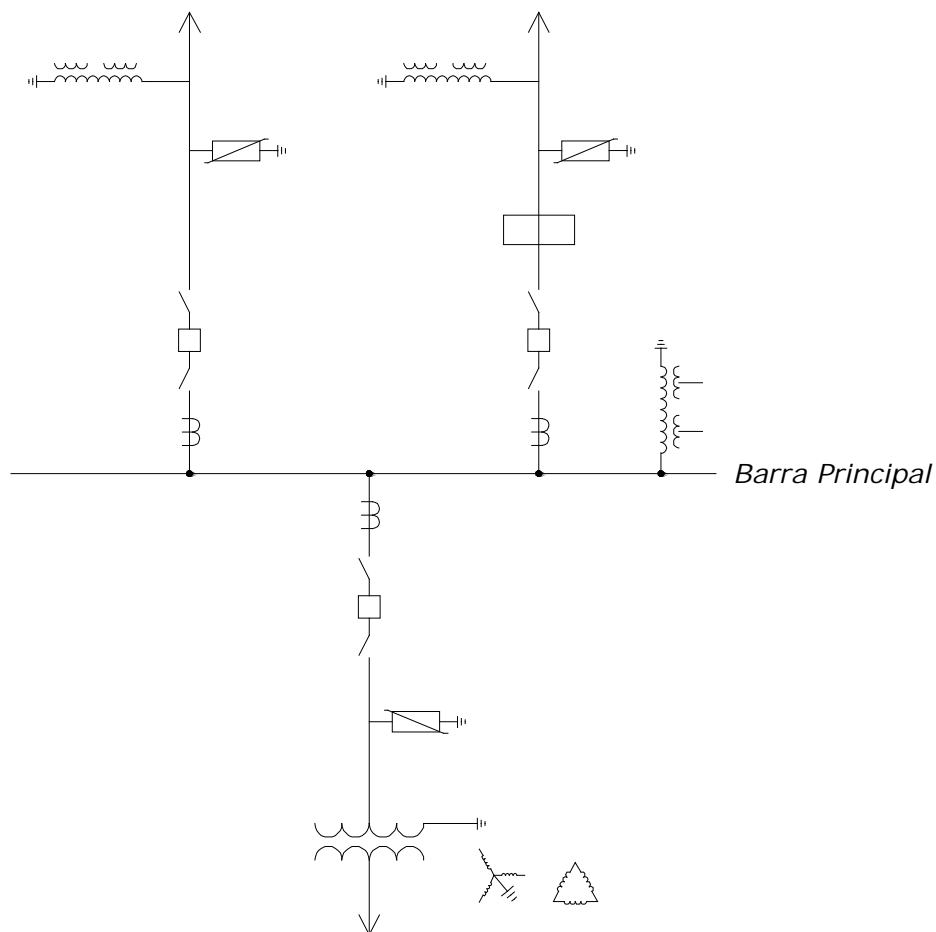
Los criterios utilizados en la selección del arreglo de barras más adecuado de una instalación son la continuidad de servicio, flexibilidad de operación, cantidad y costo del equipo eléctrico y facilidad de mantenimiento de los equipos.⁸

Los arreglos más utilizados en el sistema eléctrico se describen a continuación.

Barra sencilla (menos confiabilidad y mas económica)

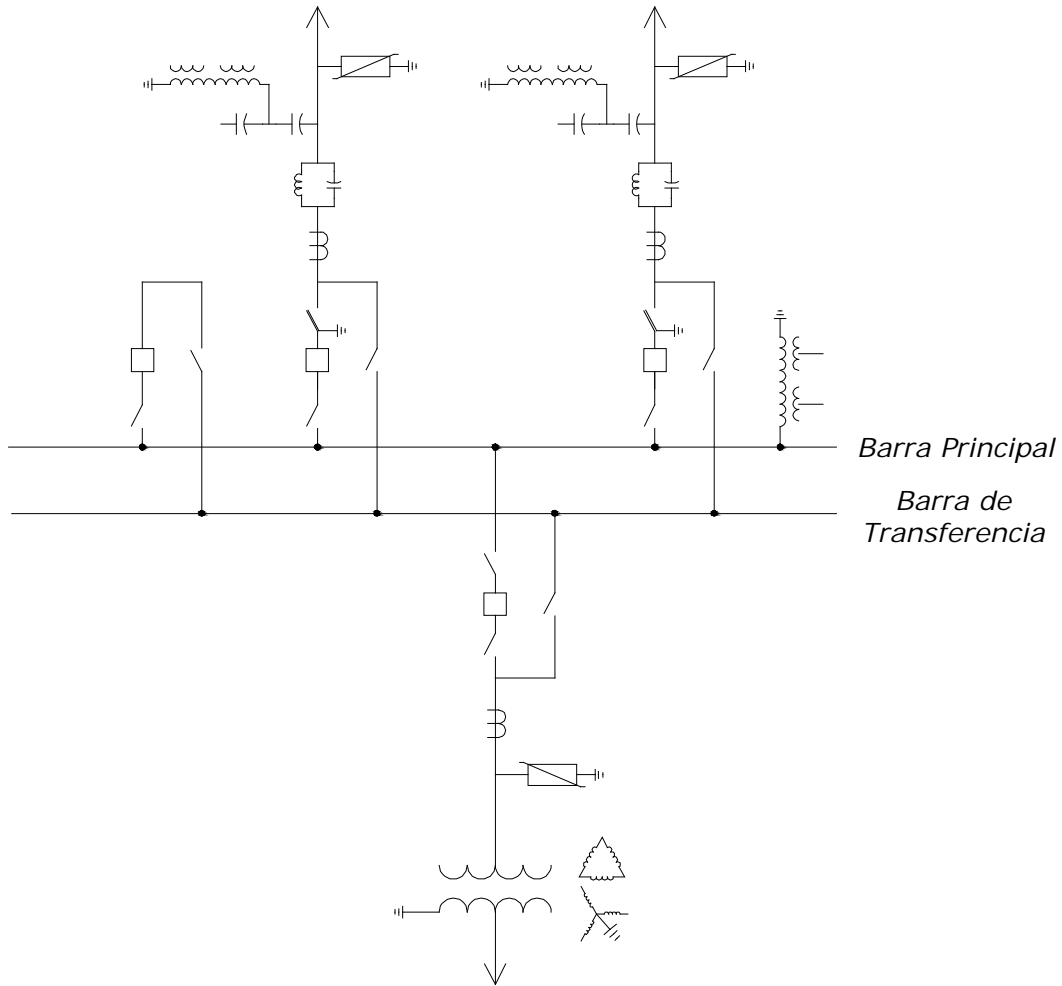
Es el arreglo más simple desde el punto de vista constructivo, considerando la cantidad de equipo y el área que ocupa, también resulta ser el más económico. No obstante, la confiabilidad de servicio es poca, ya que una falla en la barra principal provoca la salida de operación de la misma.⁹

Asimismo, el mantenimiento a los interruptores se dificulta, ya que es necesario dejar fuera de servicio parte de la subestación.¹⁰



Barra principal y barra de transferencia

Es una variante del arreglo anterior, en el cual se utiliza una barra de transferencia para sustituir, a través de un interruptor, algún interruptor que necesite mantenimiento.¹¹

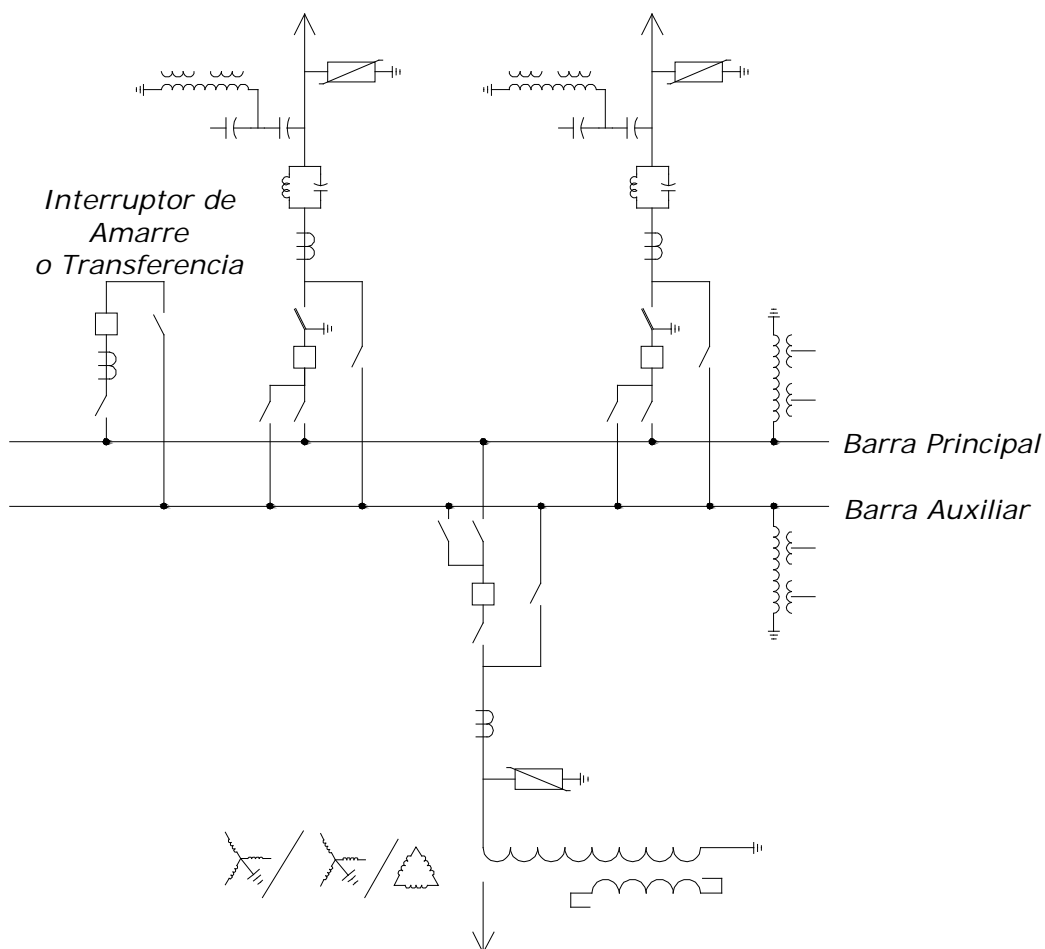


Barra principal y barra auxiliar

Este arreglo ofrece una mayor continuidad de servicio, puesto que, en caso de existir una falla en cualquiera de las dos barras, ocasiona la pérdida de los elementos conectados a la barra fallada. Debido a ello, la subestación puede ser operada como dos subestaciones independientes con arreglo de barra simple.¹²

Permite dar mantenimiento a los interruptores sin perder los elementos conectados a él y desenergizar cualquiera de las dos barras sin alterar el funcionamiento de la subestación. Sin embargo, aumentan las maniobras en el equipo cuando se utiliza el interruptor de amarre como interruptor de transferencia.¹³

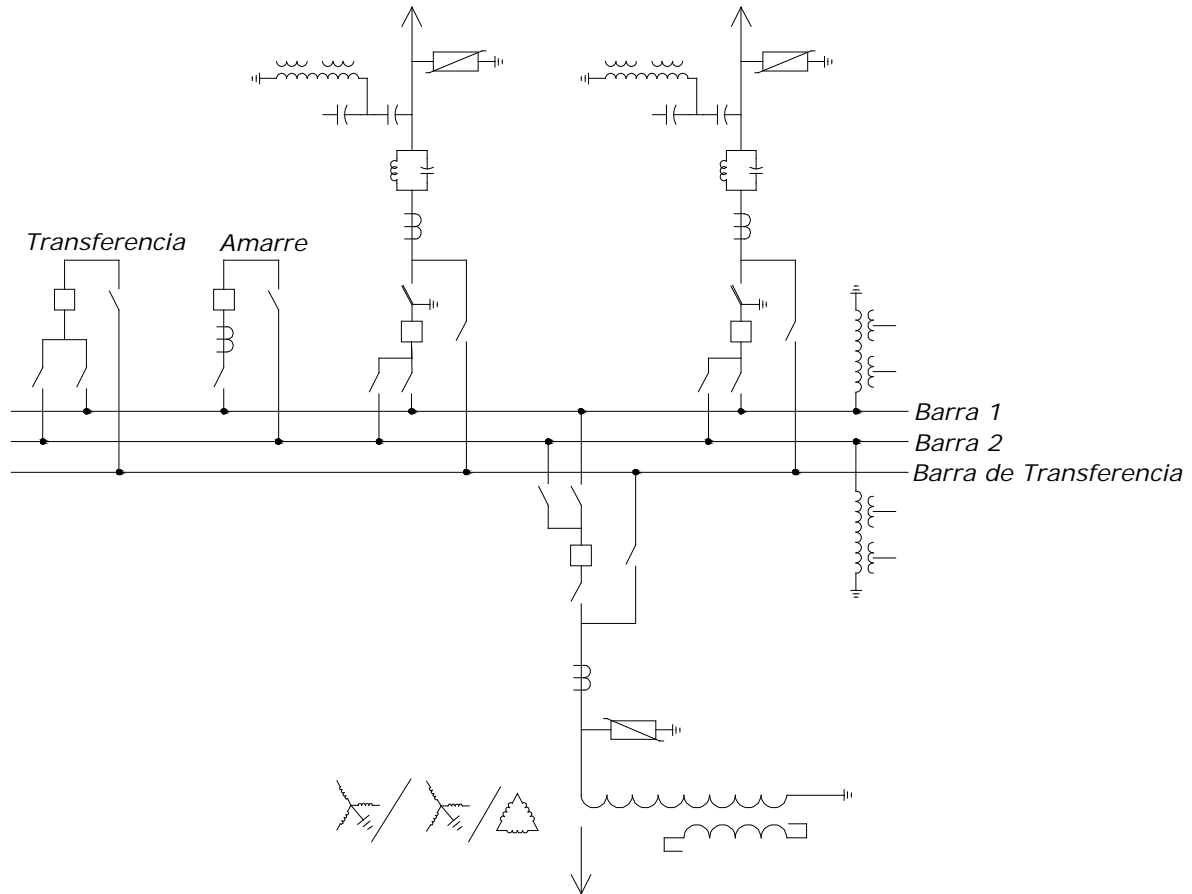
La cantidad de equipo requerido es mayor, por tanto, su costo también incrementa.¹³



Doble barra y barra de transferencia

Ofrece las mismas ventajas que el arreglo anterior, con la diferencia de que se requieren pocas maniobras para hacer uso del interruptor de transferencia.¹⁴

En este caso, la subestación puede ser operada como dos subestaciones independientes de barra principal y barra de transferencia.



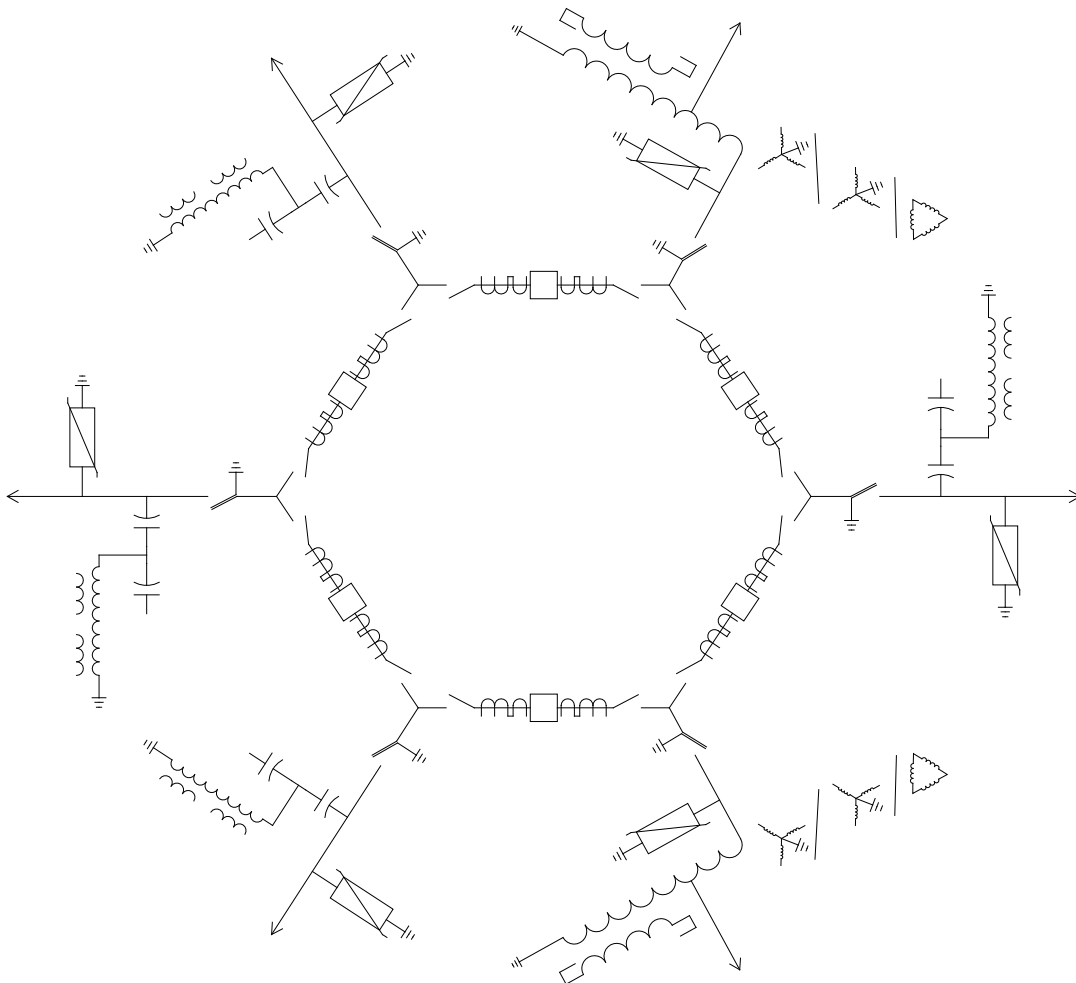
Anillo (mayor confiabilidad y costo)

Arreglo que permite continuidad de servicio, ya que evita la salida completa en caso de falla en las barras. Además, ofrece la posibilidad de dar mantenimiento a los interruptores sin que se pierda el suministro de energía.¹⁵

Cuando un interruptor está en mantenimiento, pueden ocurrir disparos en la protección, debido a que al abrir el anillo se puede incrementar la corriente de carga en los otros interruptores que permanecen en servicio. Esto puede evitarse realizando el mantenimiento en condiciones de baja carga.

Prácticamente requiere el mismo equipo que el arreglo de barra sencilla, por lo que su costo es similar.

Se utiliza en la salida de 23 [kV] de las subestaciones de distribución, utilizando anillo sencillo o doble en caso de haber más de dos transformadores.¹⁶

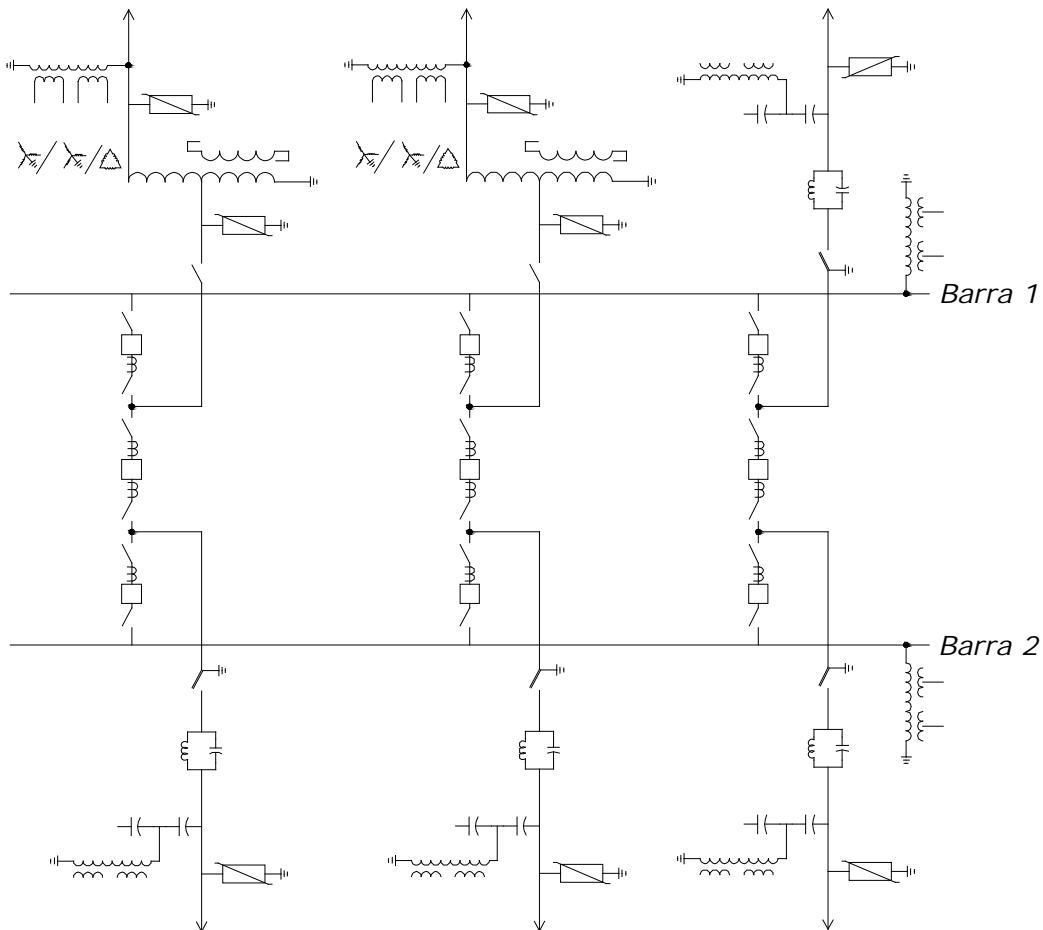


Interruptor y medio

Arreglo que ofrece buena confiabilidad y ventajas para las operaciones de mantenimiento sin tener que interrumpir el servicio. Regularmente las transferencias se hacen a través de los interruptores, lo que permite conservar la protección aun cuando alguno se encuentre en mantenimiento.¹⁷

Ocurre lo mismo que en el arreglo de anillo, cuando un interruptor está en mantenimiento, ya que al tener algún interruptor fuera de servicio, puede manifestarse un exceso de carga en los restantes y provocar disparos en las protecciones.

Este arreglo se utiliza en subestaciones de 115, 230 y 400 [kV], sobre todo en aquéllas de interconexión que forman parte de un sistema en anillo.

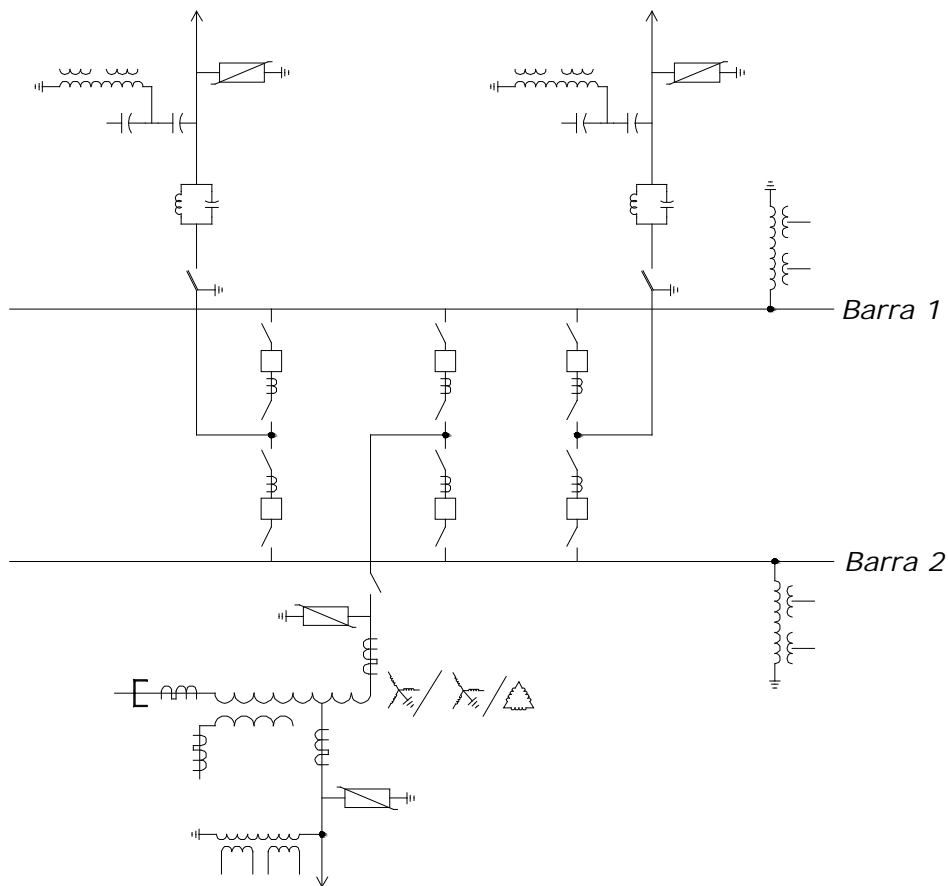


Doble interruptor (mayor confiabilidad y costo)

Es la mejor opción en cuanto a confiabilidad se refiere, no obstante, es un arreglo más costoso que los anteriores y por ello se emplea en aquellos casos en que la continuidad es muy importante.

Con un interruptor fuera de servicio, se ocasiona la pérdida de únicamente el elemento disparado.

Las subestaciones con éste arreglo pueden ser operadas como dos subestaciones independientes de barra simple.¹⁸



1.3.2 Equipo de una subestación

Transformadores de potencia

Un transformador es una máquina eléctrica que eleva o reduce la magnitud de tensión eléctrica.¹⁹

Está formado por tres partes principales:²⁰

- Parte activa: Núcleo, bobinas, cambiador de derivaciones y bastidor.
- Parte pasiva: Comprende el tanque que aloja la parte activa y se utiliza en transformadores cuya parte activa está sumergida en líquidos.
- Accesorios: Son todas las partes y dispositivos que ayudan en la operación y facilitan el mantenimiento del mismo.

Bancos de tierra

Es un transformador que conecta a tierra el neutro del sistema, para proporcionar un circuito de retorno a la corriente de cortocircuito.²¹

Cuando en un sistema de potencia con neutro flotante ocurre una falla de fase a tierra, las otras fases elevan $\sqrt{3}$ veces el valor de la tensión nominal. Éste problema se evita conectando un transformador llamado banco de tierra.

Existen dos tipos de bancos de tierra:²²

- a) Transformador de tierra, con conexión estrella con neutro a tierra en el lado de alta tensión y delta en baja tensión.
- b) Transformador con conexión tipo zig-zag.

Transformadores de instrumentos

Son dispositivos electromagnéticos que reducen a escala las magnitudes de tensión y corriente que se utilizan para la protección y medición de los circuitos de una subestación, ya que los aparatos que realizan éstas funciones no están diseñados para soportar grandes tensiones y corrientes.²³

Existen dos tipos de transformadores de instrumentos: transformadores de corriente y transformadores de potencial.²⁴

a) Transformadores de corriente

Transforman la corriente, es decir, toman la corriente de la línea y la reducen a un nivel seguro y medible. En un transformador de corriente, en condiciones normales de operación, la corriente del secundario es directamente proporcional a la del primario y está en fase con ella.

Los transformadores de corriente pueden ser de medición, de protección o mixtos.

b) Transformadores de potencial

Son de tipo inductivo y tienen como función principal reducir los valores de tensión del sistema a valores suficientemente bajos para alimentar a equipos de protección, control y medición.

En consecuencia, el transformador debe ser muy exacto para que no distorsione los verdaderos valores de tensión.

Dispositivos de potencial capacitivo

Se utilizan para alimentar a equipos de protección, control y medición. Facilita los propósitos de telemedición, control en tiempo real y en general aspectos de comunicación.²⁵

Capacitores

Dispositivos formados por dos placas conductoras, separadas por un elemento dieléctrico y al aplicar una diferencia de potencial almacenan carga eléctrica. En las subestaciones se utilizan capacitores de potencia con arreglos serie-paralelo para conectarlos en alta tensión y dar la capacidad de potencia reactiva requerida.²⁶

Por lo regular, los capacitores de alta tensión están sumergidos en líquidos dieléctricos, cerrados herméticamente dentro de un tanque; sus terminales salen al exterior a través de boquillas de porcelana.

a) Bancos de capacitores

Los capacitores instalados en grupos son llamados bancos, los cuales se utilizan en instalaciones industriales y de potencia.²⁷

Los bancos de capacitores pueden ser conectados en delta, estrella sólidamente aterrizada o flotante, doble estrella sólidamente aterrizada o flotante.

La conexión delta se encuentra en sistemas de baja tensión y se determina generalmente por razones económicas.

Las conexiones estrella y doble estrella sólidamente aterrizada se aplican sólo en sistemas eléctricos de potencia multiaterrizados y en todos los niveles de tensión, en éste caso las armónicas triples existentes (de secuencia cero) fluyen por los circuitos de neutro o de retorno a tierra y pueden causar problemas de interferencia telefónica o en los circuitos de control, la ventaja es que se presentan sobretensiones transitorias menores que en la conexión flotante. La conexión estrella y doble estrella flotante se aplica en cualquier sistema (multiaterrizado o flotante).

Por lo general, los bancos de capacitores de alta tensión se conectan en estrella con neutro flotante, de esta manera se evita la circulación de corrientes armónicas triples que pueden dañar los capacitores.

La instalación de capacitores en los sistemas eléctricos tiene por objeto suministrar potencia reactiva y mejorar el bajo factor de potencia, logrando con esto reducir el flujo de potencia reactiva en líneas y equipos y con ello incrementar la capacidad de carga en los transformadores, líneas y generadores; así como la de regular la tensión de suministro.

Apartarrayos

Dispositivos eléctricos que limitan la magnitud de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas u operación de interruptores y conducen a tierra las corrientes producidas por estas sobretensiones.²⁸

Los apartarrayos se dividen en tres grupos:²⁹ cuernos de arqueo, apartarrayos autovalvulares y apartarrayos de óxidos metálicos. Actualmente éstos últimos son los más utilizados.

a) Cuernos de arqueo

Es el caso más simple y económico para proteger los equipos de distribución. Deben ser capaces de soportar la tensión nominal más alta del sistema y producir la descarga cuando haya una sobretensión.³⁰

Una vez originado el arco, no son capaces de extinguir la corriente de 60 ciclos que precede a la corriente transitoria, produciéndose una falla a tierra que debe ser eliminada por el esquema de protección. Este inconveniente provoca una interrupción, por lo cual se ve limitado su uso.

b) Apartarrayos autovalvulares

Los apartarrayos tipo autovalvular están formados por un entrehierro y una resistencia no lineal. El entrehierro descarga las corrientes transitorias a tierra con una tensión de descarga baja; la resistencia presenta una alta impedancia a la corriente que sigue a la transitoria.³¹

Durante una sobretensión debida a descargas atmosféricas, la corriente de descarga alcanza niveles de miles de amperes, disminuyendo posteriormente a cientos de amperes una vez disipada la sobretensión. Los entrehierros del apartarrayos deben interrumpir esa corriente posterior y permanecer bloqueados ante cualquier sobretensión momentánea que permanezca en las terminales del apartarrayo.

Durante una sobretensión, la resistencia presenta poca oposición y la corriente transitoria fluye libremente.

c) Apartarrayos de óxidos metálicos

Es un dispositivo de protección para sobretensiones basado en las propiedades semiconductoras de los óxidos metálicos, como el óxido de zinc (ZnO). Tiene mejores características de no linealidad que el carburo de silicio, debido a ello y a sus bajas pérdidas a tensiones nominales, ha sido posible no utilizar entrehierro, permitiendo así reducir el tamaño de estos equipos y en consecuencia su peso.³²

Debido a su característica tensión-corriente, éste apartarrayos descarga únicamente a un valor de corriente predeterminado, mejorando el nivel de protección del sistema.

Es importante considerar su temperatura de operación, ya que su comportamiento es sensible a la temperatura; a medida que la temperatura ambiente se eleva, la energía que debe disipar el apartarrayos se incrementa, provocando que la corriente que circula a través de éste se eleve, incrementando nuevamente la temperatura y, por consiguiente,

un calentamiento en el equipo. Por ello el apartarrayos nunca debe trabajar por arriba de su capacidad térmica, de lo contrario puede fallar.

Interruptores de potencia

Los interruptores de potencia son dispositivos destinados al cierre y apertura de los circuitos bajo condiciones de carga, en vacío y en condiciones de falla. Asimismo, permite insertar o retirar equipos y máquinas, líneas aéreas o cables de un circuito energizado.³³

En condiciones de falla, el interruptor debe ser capaz de interrumpir corrientes de corto circuito del orden de kiloamperes y, en consecuencia, soportar los esfuerzos térmicos y dinámicos a que es sometido para poder librar la contingencia.

Los interruptores pueden cerrar o abrir en forma manual o automática por medio de relevadores, los cuales monitorean las condiciones de la red. La interrupción del arco puede llevarse a cabo por medio de:³⁴

- Aceite
- Vacío
- Hexafloruro de azufre (SF₆)
- Soplo de aire
- Soplo de aire-magnético

Asimismo, tienen un mecanismo de almacenamiento de energía que le permite cerrar hasta cinco veces antes de que la energía sea interrumpida completamente; este mecanismo puede ser:³⁵

- Neumático
- Hidráulico
- Neumático-hidráulico
- Mecanismo de resorte

Debido a las funciones tan importantes que desempeña, es uno de los dispositivos del esquema de protección más importante en los sistemas eléctricos.³⁶

Cuchillas

Dispositivos que sirven para conectar y desconectar los elementos de una instalación eléctrica en caso de tener que realizar maniobras de operación o bien para darles mantenimiento.³⁷

Las cuchillas, a diferencia de un interruptor, no pueden abrir circuitos cuando está fluyendo corriente a través de ellas (operan sin carga), siempre debe abrirse primero el interruptor correspondiente.

De acuerdo a su tipo de construcción, las cuchillas pueden ser de tipo:

- a) Horizontal
- b) Horizontal invertida
- c) Vertical
- d) Pantógrafo

Fusibles

Es un dispositivo de protección que opera cuando una sobrecorriente pasa a través de él. Por lo tanto, las funciones de un fusible son aislar la parte del circuito donde se presenta una falla del resto del alimentador y así impedir el daño a los equipos instalados en el mismo.³⁸

Las consideraciones que deben tomarse en cuenta para la selección adecuada de un fusible son:

- Proteger a los equipos bajo condiciones de sobrecorriente que pueda dañarlos
- En condiciones normales de operación el fusible no debe operar
- En caso de falla, cuando dos o más fusibles se encuentran instalados en serie, únicamente deberá operar el que se encuentre más cercano a la falla.

Los fusibles de potencia más conocidos son:³⁹

- a) Fusibles de expulsión
- b) Fusibles limitadores de corriente

Los fusibles se diseñan para fundirse en un tiempo especificado a una determinada corriente, para tal propósito es necesario conocer las curvas de operación tiempo-corriente. Existen tres tipos de curvas: las curvas características promedio de fusión tiempo-corriente, las curvas instantáneas de corriente pico y las curvas I^2t . La primera curva se aplica a toda clase de fusibles y las dos últimas a fusibles limitadores de corriente.⁴⁰

Los fusibles de potencia deben ser seleccionados con base en la máxima tensión entre fases del sistema en donde se apliquen y capacidad interruptiva mayor a la máxima disponible en el lugar de instalación.

Reactores

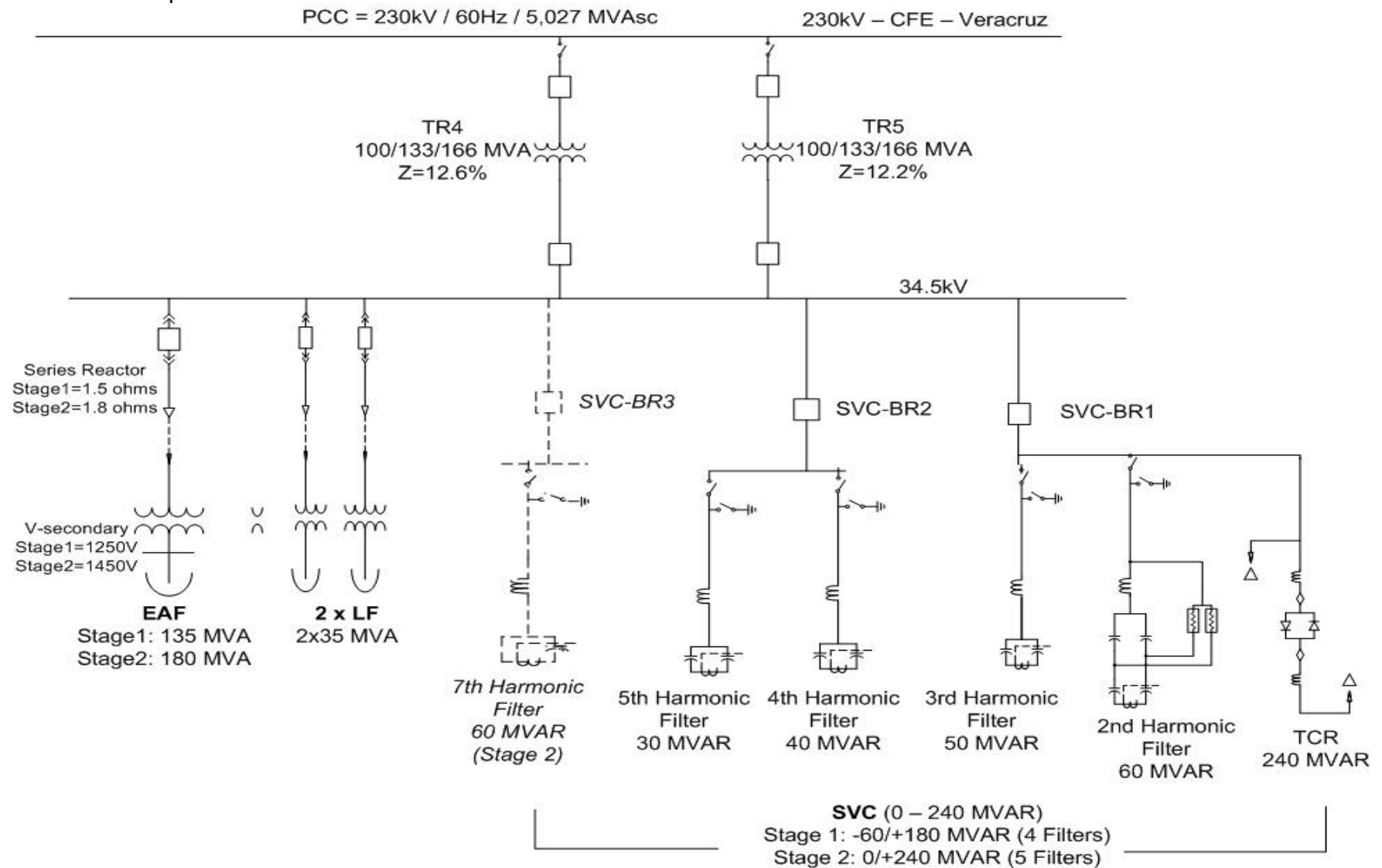
Son bobinas con diversas funciones. Cuando se conectan en serie limitan la corriente de corto circuito para poder disminuir la capacidad interruptiva de interruptores y en paralelo o derivación absorben potencia reactiva (líneas largas en demanda mínima).⁴¹

En subestaciones, los reactores se colocan en el neutro de los bancos de transformadores para limitar la corriente de corto circuito monofásica.

Según su capacidad, los reactores pueden ser de tipo seco para potencias reactivas pequeñas o del tipo sumergido para potencias elevadas.

a) Compensadores estáticos de vars

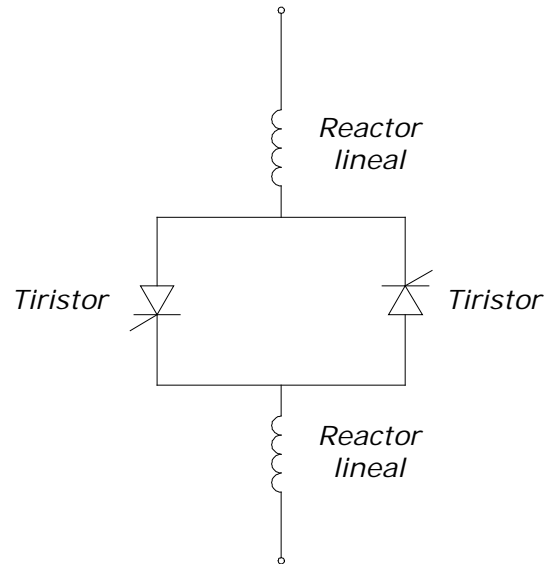
Los compensadores estáticos son equipos formados por reactores controlados por tiristores y capacitores ya sea conmutados por interruptor o tiristores y filtros de corrientes armónicas que son utilizados para suministrar y/o absorber potencia reactiva regulando así la tensión en un sistema eléctrico de potencia.



Los componentes de un compensador estático se conectan en derivación:

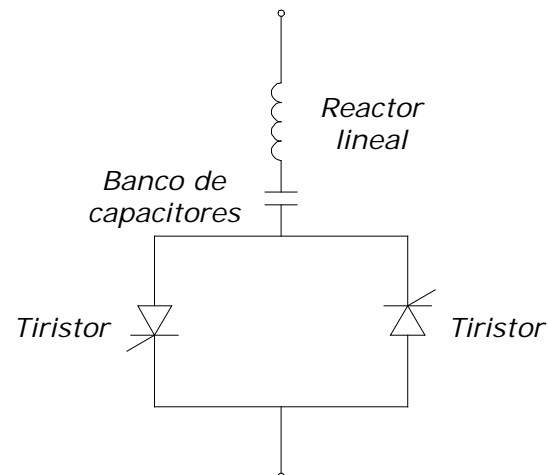
- Reactor controlado por tiristores

Reactores generalmente conectados en delta controlados por tiristores.



- Capacitor switchado por tiristores

El banco de capacitores es conmutado a través de tiristores y conectado en serie con un reactor lineal que se utiliza para limitar la corriente de inrush y outrush.



- Compensador mixto

Es una combinación de los casos anteriores, reactores y bancos de capacitores.

1.4 Referencias

- ¹ VIQUEIRA, Jacinto, L. *“Redes Eléctricas”* Tomo I. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2004, p. 12
- ² Idem
- ³ Ibidem, pp. 18-19
- ⁴ RAÚLL, José M. *“Diseño de Subestaciones Eléctricas”*. 2da. Ed., México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2000, pp. 1
- ⁵ Idem
- ⁶ Idem y NRF-041-CFE-2005, “Esquemas normalizados de protecciones para líneas de transmisión”, p. 1
- ⁷ REUNIÓN de Verano de Potencia (2005, Acapulco, Guerrero). Arreglos de barras en subestaciones. IEEE Sección México, p. 3
- ⁸ Raúl, op. cit., pp. 4-5
- ⁹ ENRÍQUEZ, Gilberto H. *“Elementos de Centrales Eléctricas II”*. Preedición, México, Limusa, 1995, p. 577
- ¹⁰ Raúl, op. cit., p. 5
- ¹¹ Idem
- ¹² Enríquez, op. cit., pp. 578-579
- ¹³ Raúl, op. cit., p. 7
- ¹⁴ Reunión, op. cit., p. 31
- ¹⁵ Enríquez, op. cit., p. 580
- ¹⁶ Raúl, op. cit., p. 12
- ¹⁷ Enríquez, op. cit., p. 581
- ¹⁸ Enríquez, op. cit., p. 55
- ¹⁹ Raúl, op. cit., p. 41
- ²⁰ Ibidem, pp. 41-45
- ²¹ Ibidem, p. 51
- ²² Idem
- ²³ Ibidem, p. 52
- ²⁴ Ibidem, pp. 52-64
- ²⁵ Ibidem, p. 65
- ²⁶ Ibidem, p. 67
- ²⁷ Ibidem, p. 71
- ²⁸ Raúl, op. cit., p. 78
- ²⁹ Idem
- ³⁰ ESPINOSA, Roberto, L. *“Sistemas de Distribución”*. México, Limusa, 1990, pp. 564-566
- ³¹ Ibidem, pp. 573-577
- ³² Ibidem, pp. 590-591
- ³³ Raúl, op. cit., p. 92
- ³⁴ Espinosa, op. cit., p. 452
- ³⁵ Ibidem, p. 453
- ³⁶ Raúl, op. cit., p. 92
- ³⁷ Ibidem, p. 112
- ³⁸ Espinosa, op. cit., p. 490
- ³⁹ Raúl, op. cit., pp. 115-116
- ⁴⁰ Espinosa, op. cit., pp. 500-501
- ⁴¹ Raúl, op. cit., p. 121