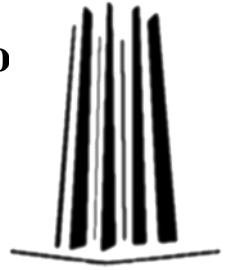




**Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Estudios Superiores  
Aragón.**



**Técnicas Modernas de Compensación de Potencia  
Reactiva en Sistemas de Potencia.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO.**

**Presenta:**

**Arturo Garrido Villasana.**

**Asesor: M. en C. Rodrigo Ocón Valdez.**

**Nezahualcóyotl, Estado de México 2013**

---



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Agradecimiento.**

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo mostrado por el asesor M. en C. Rodrigo Ocón Valdez, quien deposito confianza en mí, para la realización de este proyecto de tesis, a quien le agradezco sus consejos y conocimientos que fueron de gran utilidad.



## **Dedicatoria.**

A mis padres, Linda y Eduardo por contar con su apoyo incondicional en cada momento, que gracias a sus enseñanzas, me inculcaron las bases para sobresalir en lo profesional y en lo personal. Que sin ellos no hubiera podido llegar hasta donde estoy ahora, gracias por todo.

A Lulú la persona con la que comparto mi vida y quien me ha demostrado ser una persona muy valiosa e inteligente, por sus deseos de superación, a la cual quiero mucho.

A mis hermanos Daniel, Hilda y Julieta, que son parte fundamental en mi vida, por sus consejos, los cuales han sido de gran ayuda.

Y a mis sobrinas Valeria y Linda María a quienes quiero mucho, por la alegría que desbordan, la cual siempre ha sido muy motivadora.



**Índice.**

<b>Objetivo.</b>	<b>1</b>
<b>Introducción.</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 1. Compensación de potencia reactiva.</b>	<b>6</b>
1.1. Inductancia.	6
1.2. Capacitancia.	8
1.3. Resistencia.	9
1.4. Factor Q.	10
1.5. Factor D.	11
1.6. Potencia aparente.	12
1.7. Potencia activa.	14
1.8. Potencia reactiva.	15
1.9. Triangulo de potencias.	16
1.10. Teoría sobre compensación reactiva	18
1.11. Ejemplo de compensación de potencia reactiva	27
<b>Capítulo 2. Equipos dentro de los sistemas de compensación de potencia reactiva</b>	<b>30</b>
2.1. Elementos que producen o consumen potencia reactiva.	30
2.2. Capacitores.	33
2.3. Reactores.	39
2.4. Cambiadores de derivación.	41
2.5. Condensadores síncronos.	45
2.6. Dispositivos FACTS.	49
2.6.1. Compensador estático de VARS (SVC).	57
2.6.2. Condensador en serie, fijo y controlado por tiristores (TCSC).	61
2.6.3. Transformador de desplazamiento de fase (PST).	62
2.6.4. Transformador de desplazamiento de fase asistido (APST).	64
2.6.5. Reactor Controlado por Tiristores (TCR).	64
2.6.6. Compensador estático síncrono (STAT-COM).	65
2.6.7. Controlador unificado de flujo de energía (UPFC).	66
2.6.8. Compensador en serie sincrónico estático (SSSC).	67
<b>Capítulo 3. Dispositivos Compensadores estáticos de VARS (SVC)</b>	<b>70</b>
3.1. Principio de operación.	70
3.2. Tipos.	76
3.2.1. Reactor saturado (SR).	76
3.2.2. Reactor controlado por tiristores (TCR).	79
3.2.3. Condensador energizado por tiristores (TSC).	81
3.2.4. Reactor energizado por tiristores (TSR).	82
3.2.5. TCR/TSC. Combinación.	82
3.3 Elementos constructivos.	84

<b>Capítulo 4. Ejemplo de aplicaciones.</b>	<b>88</b>
4.1. Subestaciones de compensación en México	88
4.2. Aplicación Mundial de compensadores Modernos	96
<b>Conclusiones.</b>	<b>98</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>99</b>

## **Objetivo General.**

Conocer y posteriormente analizar las técnicas en relación de la compensación de potencia reactiva en sistemas de potencia.

## **Objetivos Particulares.**

En primera instancia el conocer los conceptos básicos que tienen relación con la compensación de potencia reactiva. Tal es el caso de la inductancia, resistencia, capacitancia, entre otros. Al igual analizar el triángulo de potencia y los tres tipos de potencia, como la potencia activa, potencia aparente y potencia reactiva.

Posteriormente conocer los componentes encargados en generar la potencia reactiva y los que compensan dicha potencia reactiva. Desde los que son elementos pasivos, hasta los que son dispositivos basados en electrónica de potencia.

Dentro de los dispositivos basados en electrónica de potencia tenemos los FACTS (sistemas de transmisión flexible de corriente alterna) y SVC (sistemas de compensación estáticos de vars), los cuales se analizarán diferentes tipos que existen y la forma en que operan por medio de tiristores, seguidamente se aborda un capítulo sobre SVC (sistemas de compensación estáticos de vars), en donde el objetivo es conocer la forma en que trabajan estos dispositivos y las diferentes variantes existentes para compensar.

Y por último conocer las diferentes formas en que son aplicados estos elementos a nivel local y mundial. Desde las principales subestaciones compensadoras existentes en el país así como fuera de él.

## **Introducción.**

El estudio del campo electromagnético posibilitó la creación de generadores eléctricos, los cuales transforman la energía mecánica del movimiento giratorio en energía eléctrica, lo que formó las bases del Sistema Eléctrico de Potencia.

Las principales formas como se compone el sistema eléctrico de potencia son en tres partes generales las cuales consta de generación, transmisión y distribución.

La generación, es donde se produce la energía eléctrica, por medio de las centrales generadoras, las que representan el centro de producción.

La transmisión, es el medio de interconexión entre la generación y la distribución; se componen de líneas de alta tensión, las cuales recorren grandes distancias.

La distribución eléctrica es el suministro de energía que va desde la subestación eléctricas a los usuarios finales, la cual se encarga en proporcionar por medio de transformadores, interruptores, cuchillas, líneas y otros elementos, la energía necesaria para el consumo eléctrico requerido.

En régimen normal, todas las unidades generadoras del sistema se encuentran en "sincronismo", es decir, mantienen ángulos de cargas constantes. En este régimen, la frecuencia debe ser nominal (60 Hz) o muy cercana a ésta. Los voltajes de generación varían de 2.4 a 24 kV, dependiendo del tipo de central.

Las características de las centrales eléctricas se relacionan con la subestación y las líneas de transmisión en función de la potencia a suministrar, distancia a que se transmite y al área por servir.

Los voltajes de transmisión se clasifican en, alta tensión. 400, 230, 115, 85 y 69 KV; media tensión. 34.5, 23, 13, 6.9, 4.16, 2.4 KV y baja tensión. 480, 440, 267, 220, 127 V.

Las formas de clasificar las líneas de transmisión, es de acuerdo a su longitud, las cuales pueden ser, línea corta de menos de 80 Km, línea media de entre 80 y 240 Km y línea larga de 240 Km y más.

Las Subestaciones eléctricas, en función a su diseño son las encargadas en interconectar líneas de transmisión de distintas centrales generadoras, transformar los niveles de voltajes para su distribución o consumo.

A su vez las subestaciones eléctricas se clasifican por su tipo de servicio en, subestaciones elevadoras, subestaciones reductoras, subestaciones de maniobra o switcheo, subestación principal del sistema de distribución, subestación de distribución, subestaciones rectificadoras, subestaciones inversoras y subestaciones compensadoras.



Esta última para corregir el elevado consumo de la Potencia Reactiva (aumento de la necesidad de magnetizar conforme se coloca más equipo a la red).

Ocasiona no solo mala regulación de voltaje o bajo voltaje en una industria, sino que también puede afectar a otros usuarios. Además, disminuirá la eficiencia con la cual los equipos conectados a la red aprovechan la energía que se les suministra.

Mejorar el factor de potencia resulta práctico y económico, por medio de la instalación de condensadores eléctricos estáticos, o utilizando motores sincrónicos disponibles en la industria.

La Industria actualmente está corrigiendo este factor aplicando bancos de capacitores para compensar la potencia reactiva consumida en ella, a través de generarla ellos mismos. El beneficio viene si se colocan lo más cercano a la carga que consume.

Las cargas industriales por su naturaleza eléctrica son reactivas a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, balastos, etc.

Los equipos conectados a una red eléctrica tienen característica inductiva (corriente en atraso al voltaje), consumen corriente y necesitan magnetizar sus elementos internos, inductores, capacitores, campos magnéticos etc., aumentando la necesidad de magnetizar conforme se coloca más equipo a la red. Esta energía que magnetiza los elementos internos se le conoce como reactiva, en general potencia reactiva. Cuanto mayor sea el consumo de energía reactiva, peor será el aprovechamiento de la energía recibida por los equipos.

El factor de potencia es un indicador de dicho aprovechamiento, el cual puede tomar valores entre 0 y 1. Por ejemplo, si el factor de Potencia es igual a 0.80, indica que del total de la energía suministrada (100%) sólo el 80% de esa energía es aprovechada en trabajo útil.

La mejora del factor de potencia debe ser realizada de una forma cuidadosa con objeto de mantenerlo lo más alto posible, pero sin llegar nunca a la unidad, ya que en este caso se produce el fenómeno de la resonancia que puede dar lugar a la aparición de tensiones o intensidades peligrosas para la red. Es por ello que en los casos de grandes variaciones en la composición de la carga es preferible que la corrección se realice por medios automáticos.

De los componentes de un sistema eléctrico los que producen o consumen potencia reactiva se encuentran: generadores sincrónicos, líneas aéreas, cables subterráneos, transformadores, al igual cargas que absorben potencia reactiva, de las cuales se encuentran lámparas incandescentes, sistemas de calefacción resistivos, motores de inducción y las lámparas fluorescentes.

De los dispositivos compensadores encargados de corregir el factor de potencia se encuentran: capacitores, reactores, cambiadores de derivación, condensadores sincrónicos y los Sistemas de transmisión flexibles de corriente alterna (FACTS) entre otros.

Los FACTS, los cuales se utilizan cada vez más en sistemas eléctricos de potencia, tanto en redes de transmisión como en redes de distribución. Los cuales son basados en la incorporación de dispositivos de electrónica de potencia en el lado de alta tensión de las redes eléctricas, con la idea de hacerlas electrónicamente controlables. Estos dispositivos tienen la capacidad de controlar el flujo de potencia o variar características de la red, empleando semiconductores de potencia para controlar el flujo de los sistemas de corriente alterna, cuyo propósito es dar flexibilidad a la transmisión de la energía sobre la base de dos objetivos principales:

- \* Incrementar la capacidad de transferencia de potencia en los sistemas de transmisión.
- \* Mantener el flujo en las trayectorias de la red para que se establezcan de acuerdo a las distintas condiciones operativas.

En relación a los compensadores estáticos de vars (SVC), los cuales son dispositivos estáticos, que ofrecen la alternativa de modificar parámetros que actualmente restringen a los sistemas eléctricos de potencia, permitiendo además operar las líneas de transmisión cerca de sus límites térmicos, lo que anteriormente no se podía efectuar por medio de dispositivos electromecánicos sin violar las restricciones de seguridad del sistema.

En el capítulo de compensadores estáticos de vars, aborda el tipo de operación de este dispositivo, además sobre el ángulo de disparo de los tiristores y sus formas de intensidad de onda en diferentes ángulos.

De los tipos de SVC más comunes se encuentran: Reactor Saturado (SR), Reactor controlado por tiristores (TCR), Condensador energizado por tiristores (TSC), Reactor energizado por tiristores (TSR), combinado (TCR-TSC), Condensador energizado mecánicamente (MSC). Estos algunos de los más notables.

Todos estos dispositivos constan de elementos constructivos, los cuales son indispensables para compensar, de los cuales se encuentran; sistema de control, convertidor con tiristor, reactor de compensación, dispositivo de filtración de armónicos de alto orden, etc.

Ejemplos de aplicación se encuentran tanto en el país como fuera de él, es extensa la aplicación de compensar la potencia reactiva. Debido a los grandes avances tecnológicos sean empleados tecnologías modernas que hacen la tarea de compensar potencia reactiva más fácil debido a la tecnología basada en la electrónica de potencia, que es la más usada actualmente en países con demandas exigentes en electricidad y sus diferentes aplicaciones.

En general este trabajo de tesis tiene una estructura secuencial, el cual se divide en capítulos, en el primer capítulo, se mencionan los conceptos fundamentales que tienen relación con la compensación de potencia reactiva, conceptos como el triángulo de potencia, factor de potencia, potencia aparente, potencia reactiva, potencia real, al igual como conceptos generales como resistencia capacitancia y inductancia.

Ya en el segundo capítulo se presentan las características más sobresalientes y la descripción de los dispositivos más importantes utilizados para la compensación de potencia reactiva.

En el tercer capítulo, se explica con detalle la operación y características del compensador estático de VAR (SVC) y los componentes de una subestación típica de compensación.

Finalmente en el cuarto capítulo, se presentan ejemplos de algunas subestaciones en México y otras partes del mundo.

## Capítulo 1. Compensación de Potencia Reactiva.

### 1.1 Inductancia.

Campo magnético que se crea por una corriente eléctrica al pasar a través de una bobina o conductor que va acompañado de efectos magnéticos. La unidad para la inductancia es el henrio.

El campo magnético, se define como la relación entre el flujo magnético ( $\Phi$ ) y la intensidad de corriente eléctrica ( $I$ ) que circula por la bobina y el número de vueltas ( $N$ ) del devanado. La ecuación 1a, representa a la inductancia.

$$L = \frac{\Phi N}{I}$$

Ecuación 1a. Inductancia.

La transferencia de energía al campo magnético representa trabajo efectuado por la fuente FEM (fuerza electromotriz). Se requiere potencia para hacer trabajo, y puesto que la potencia es igual a la corriente multiplicada por la tensión, debe haber una caída de tensión en el circuito durante el tiempo en que la energía está almacenándose en el campo.

Esta caída de tensión que no tiene nada que ver con la caída de tensión de ninguna resistencia del circuito, es el resultado de una tensión opuesta inducida en el circuito, mientras el campo crece hasta su valor final. Cuando el campo se vuelve constante, la FEM inducida o fuerza contra electromotriz desaparece, puesto que ya no se está almacenando más energía. Puesto que la FEM inducida se opone a la FEM de la fuente, tiende a evitar que la corriente aumente rápidamente cuando se cierra el circuito.

Si se enrolla un conductor, la inductancia aumenta. Con muchas espiras se tendrá más inductancia que con pocas. Si a esto añadimos un núcleo de ferrita, aumentaremos considerablemente la inductancia.

La energía almacenada en el campo magnético de un inductor se calcula con la siguiente ecuación 2a.

$$W = I^2 L/2$$

Ecuación 2a. Energía almacenada.

Siendo:

$W$  = energía (julios);

$I$  = corriente (amperios);

$L$  = inductancia (henrios).

En una bobina habrá un henrio de inductancia cuando el cambio de 1 amperio/segundo en la corriente eléctrica que fluye a través de ella provoque una fuerza electromotriz opuesta de 1 voltio.

En el SI(sistema internacional), la unidad de la inductancia es el henrio (H), llamada así en honor al científico estadounidense Joseph Henry.  $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A}$ , donde el flujo se expresa en weber y la intensidad en amperios.

Cualquier conductor tiene inductancia, incluso cuando el conductor no forma una bobina. La inductancia de una pequeña longitud de hilo recto es pequeña, pero no despreciable si la corriente a través de él cambia rápidamente, la tensión inducida puede ser apreciable.

Un transformador o dos circuitos magnéticamente acoplados tendrán inductancia mutua equivalente a un henrio cuando un cambio de 1 amperio/segundo en la corriente del circuito primario induce tensión equivalente a 1 voltio en el circuito secundario. A continuación esto se expresa en la figura 1a.

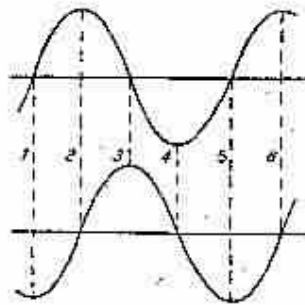


Figura 1a. Señal senoidal de una corriente alterna respecto a una corriente inducida. Arriba, la corriente alterna. Abajo, la corriente inducida por la representada arriba.

1. La corriente inductora aumenta muy rápidamente. La corriente inducida es de sentido contrario.
2. La corriente inductora no varía durante un corto intervalo. La corriente inducida es nula.
3. La corriente inductora disminuye. La corriente inducida tiene el mismo sentido.
4. La corriente inductora no varía durante un corto intervalo. La corriente inducida es nula.

Dentro de la inductancia se maneja el parámetro de la reactancia inductiva la cual se representa por  $X_L$  y su valor viene dado por la ecuación 3a.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

Ecuación 3a. Reactancia inductiva.

Donde:

$X_L$  = Reactancia inductiva en ohm

$L$  = Inductancia en henrios

$f$  = Frecuencia en hertz  
 $\omega$  = Frecuencia angular

El fenómeno de la inducción electromagnética fue descubierto en 1831 por el físico inglés Michael Faraday (*Newington, Inglaterra, 1791 – Londres, 1867*).

## 1.2 Capacitancia.

La capacitancia o capacidad eléctrica es la propiedad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica. Carga y voltaje.

La relación entre la diferencia de potencial existente entre las placas del condensador y la carga eléctrica almacenada en éste, se describe mediante la siguiente ecuación 4a.

$$C = \frac{Q}{V}$$

Ecuación 4a. Capacitancia.

Donde:

$C$  Es la capacidad, medida en faradios (en honor al físico experimental Michael Faraday); esta unidad es relativamente grande y suelen utilizarse submúltiplos como el microfaradio o picofaradio.

$Q$  Es la carga eléctrica almacenada, medida en culombios; Un coulomb equivale a  $6,26 \times 10^{18}$  electrones.

$V$  Es la diferencia de potencial (o tensión), medida en voltios.

La diferencia de potencial aumenta al aumentar la carga almacenada en el condensador. Por lo tanto, la capacitancia de un dispositivo es la medida de su capacidad de almacenar carga y energía potencial eléctrica.

Almacenan carga que pueden proveer al circuito rápidamente. Otros elementos tienen limitaciones en cuánto a cuán rápidamente pueden proveerle carga a un circuito.

Puesto que un condensador difiere de una resistencia pura en que almacena energía electrostática, su efecto se llama reactancia capacitiva, y se calcula por medio de la ecuación 5a.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Ecuación 5a. Reactancia capacitiva

Donde:

$f$  = frecuencia.  
 $C$  = capacitancia.

La reactancia capacitiva junto a la resistencia eléctrica determina la impedancia total de un componente o circuito, de tal forma que la reactancia  $X$  es la parte imaginaria de la impedancia  $Z$  y la resistencia  $R$  es la parte real, ecuación 6a.

$$Z = R + jX$$

Ecuación 6a. Impedancia.

La impedancia  $Z$  se define como la oposición al paso de la corriente alterna. A diferencia de la resistencia, la impedancia incluye los efectos de acumulación y eliminación de carga capacitancia. Este efecto es apreciable al analizar la señal eléctrica implicada en el tiempo. La propia impedancia se describe con números complejos o funciones del análisis armónico.

Otro parámetro ligado a la impedancia se encuentra la admitancia la cual es el inverso de la impedancia, ecuación 7a.

$$Y = \frac{1}{Z} = g_c + jB_s$$

Ecuación 7a. Admitancia.

La conductancia  $g_c$  es la parte real de la admitancia y la susceptancia  $B_s$  la parte imaginaria de la admitancia.

La unidad de la admitancia, la conductancia y la susceptancia es el siemens (símbolo **S**). Un siemens es el inverso de un ohmio.

### 1.3 Resistencia.

Resistencia eléctrica es toda oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones. Cualquier dispositivo o consumidor conectado a un circuito eléctrico representa en sí una carga, resistencia u obstáculo para la circulación de la corriente eléctrica.

La resistencia de cualquier objeto depende únicamente de su geometría y de su resistividad, por geometría se entiende a la longitud y el área del objeto mientras que la resistividad es un parámetro que depende del material del objeto y de la temperatura a la cual se encuentra sometido. Esto significa que, dada una temperatura y un material, la resistencia es un valor que se mantendrá constante.

De acuerdo con la ley de Ohm la resistencia de un material puede definirse como la razón entre la tensión y la corriente en dicha resistencia. La cual se muestra en la ecuación 8a.

$$R = \frac{V}{I}$$

Ecuación 8a. Resistencia eléctrica.

Donde  $R$  es la resistencia en ohmios,  $V$  es la diferencia de potencial en voltios e  $I$  es la intensidad de corriente en amperios.

Según sea la magnitud de esta medida, los materiales se pueden clasificar en conductores, aislantes y semiconductor.

Existen además ciertos materiales en los que, en determinadas condiciones de temperatura, aparece un fenómeno denominado superconductividad, en el que el valor de la resistencia es prácticamente nulo.

Normalmente los electrones tratan de circular por el circuito eléctrico de una forma más o menos organizada, de acuerdo con la resistencia que encuentren a su paso.

Mientras menor sea esa resistencia, mayor será el orden existente en el micromundo de los electrones; pero cuando la resistencia es elevada, comienzan a chocar unos con otros y a liberar energía en forma de calor. Esa situación hace que siempre se eleve algo la temperatura del conductor y que, además, adquiera valores más altos en el punto donde los electrones encuentren una mayor resistencia a su paso.

Todos los materiales y elementos conocidos ofrecen mayor o menor resistencia al paso de la corriente eléctrica, incluyendo los mejores conductores. Los metales que menos resistencia ofrecen son el oro y la plata, pero por lo costoso que resultaría fabricar cables con esos metales, se adoptó utilizar el cobre, que es buen conductor y mucho más barato.

Entre los metales que ofrecen mayor resistencia al paso de la corriente eléctrica se encuentra el alambre nicromo (Ni-Cr), compuesto por una aleación de 80% de níquel (Ni) y 20% de cromo (Cr). Otro elemento muy utilizado para fabricar resistencias es el carbón.

De acuerdo con la “Ley de Ohm”, un ohm ( $1\Omega$ ) es el valor que posee una resistencia eléctrica cuando al conectarse a un circuito eléctrico de un volt (1 V) detensión provoca un flujo de corriente de un Amper (1 A).

#### **1.4 Factor $Q$ .**

También denominado factor de calidad o factor de selectividad, es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva que almacena y la energía que disipa durante un ciclo completo de una señal. Pues proporciona una medida de lo aguda que es su resonancia.

No debe confundirse el factor de calidad con el asociado a los resonadores o filtros.

Los sistemas resonantes responden a una frecuencia determinada, llamada frecuencia natural, frecuencia propia o frecuencia de resonancia, mucho más que al resto de frecuencias. El rango de frecuencias a las que el sistema responde significativamente es el ancho de banda, y la frecuencia central es la frecuencia de resonancia eléctrica.



El factor de calidad se define como la relación o cociente entre el promedio de la energía que almacena un componente y el promedio de la energía que disipa durante ese mismo tiempo de medida. La ecuación 9a, se refiere al factor de calidad.

$$Q \equiv \frac{\text{Energía almacenada}}{\text{Energía disipada}} = \tan \theta = \frac{|X_s|}{R_s}$$

Ecuación 9a. Factor de calidad.

Cuanto mejor es el componente menor es su parte resistiva, menos energía disipa, por ejemplo cuanto más pura es una bobina menor es la resistencia. En consecuencia, mayor será su factor de calidad.

También se define el factor de calidad para componentes, en particular, para los varactores y cristales.

Los cristales, que son resonadores piezoeléctricos, llegan a valores de  $Q$  de varios miles. De manera que candidatos a dieléctricos de excelente calidad pueden ser aquellos con valores de  $Q > 1.000$ , aceptables los de  $Q > 100$  y con ciertos inconvenientes los de  $Q < 100$ . Este factor es exactamente el inverso del factor  $D$  de disipación.

El factor de calidad de circuitos pasivos formados con resistencias, bobinas y condensadores es bajo, inferior a 100, por el efecto de la resistividad del hilo de las bobinas, principalmente, ya que para valores elevados de inductancia se necesitan grandes longitudes de hilo. El uso de circuitos activos, que funcionan como multiplicadores de inductancia o capacidad puede mejorar el factor de  $Q$ .

El factor de calidad  $Q$  se utiliza para ver la relación entre la reactancia total y la resistencia equivalente del condensador.

### 1.5 Factor $D$ .

Las pérdidas de energía de un condensador, en sucesivos ciclos de carga-descarga están relacionadas con el comportamiento al respecto del dieléctrico del condensador.

Un indicador de esas pérdidas nos la registra el factor de disipación  $D$ .

Se denomina factor de disipación  $D$  a la tangente del ángulo de pérdida delta ( $\delta$ ). En la práctica,  $\delta$  puede ser muy chico, y en ese caso:  $\text{tg } \delta \approx \text{sen } \delta = \cos \varphi \rightarrow D = FP$  y el factor de disipación es sensiblemente igual al factor de potencia. En donde  $R_s$  va ser igual a la resistencia equivalente en serie. Figura 2a.

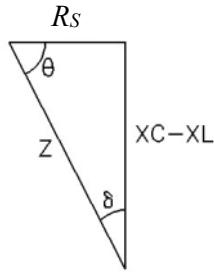


Figura 2a. Ángulo de pérdida.

Las siguientes ecuaciones 10a y 11a corresponden al factor de potencia y al factor de disipación.

$$PF = \cos \theta = \sin \delta = \frac{R_s}{Z}$$

Ecuación 10a. Factor de potencia.

$$DF = \tan \delta = \frac{R_s}{(X_C - X_L)}$$

Ecuación 11a. Factor de disipación.

Excelentes factores de disipación o de pérdidas son del orden o inferiores a  $10^{-3}$ . Valores aceptables estarían en el intervalo de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$ . La disipación de energía eléctrica se torna como un elemento en contra de la selección del material dieléctrico.

El factor de disipación está ligado a la potencia reactiva del condensador, el de calidad lo es a la potencia activa.

### 1.6 Potencia Aparente (S).

Llamada también "potencia total", es el resultado de la suma geométrica vectorial de las potencias activa y reactiva. Esta potencia es la que realmente suministra una planta eléctrica cuando se encuentra funcionando al vacío.

La potencia aparente se representa con la letra "S" y su unidad de medida es el volt-ampere (VA). La fórmula matemática para hallar el valor de este tipo de potencia se muestra en la ecuación 12a.

$$S = V_{rms} I_{rms}$$

Ecuación 12a. Potencia aparente.

En relación a potencias trifásicas para la potencia aparente se aplica la siguiente ecuación numero 13a.

$$S = \sqrt{3} VI$$

Ecuación 13a. Potencia aparente para sistema trifásico.

Con la potencia aparente los equipos eléctricos alcanzan su calentamiento máximo permisible.

El origen de la raíz de tres en la ecuación 13a, se debe básicamente de una operación vectorial en relación al desplazamiento de las fases en  $120^\circ$  eléctricos y que vendría a ser la resta de 2 fases (vectores) desplazados en  $120^\circ$  y el sentido de la resultante será en función de la secuencia. De allí que trabajar con sistemas trifásicos se trabaja con la constante raíz de 3 = 1,732. Conociendo que el ángulo de desfase entre los voltajes en un sistema trifásico es de  $120^\circ$ , mediante el método del paralelogramo trazamos los vectores  $-VA$ ,  $-VB$ ,  $-VC$ . Se saca su proyección y donde se cruzan tenemos el vector resultante  $VAC$ . Analizando los vectores vemos que entre el vector  $VA$  y  $-VC$  existen  $60^\circ$  de desfase, y al trazar la resultante  $VAC$  existe un ángulo de  $30^\circ$  entre  $VA$  y  $VAC$  se tiene:

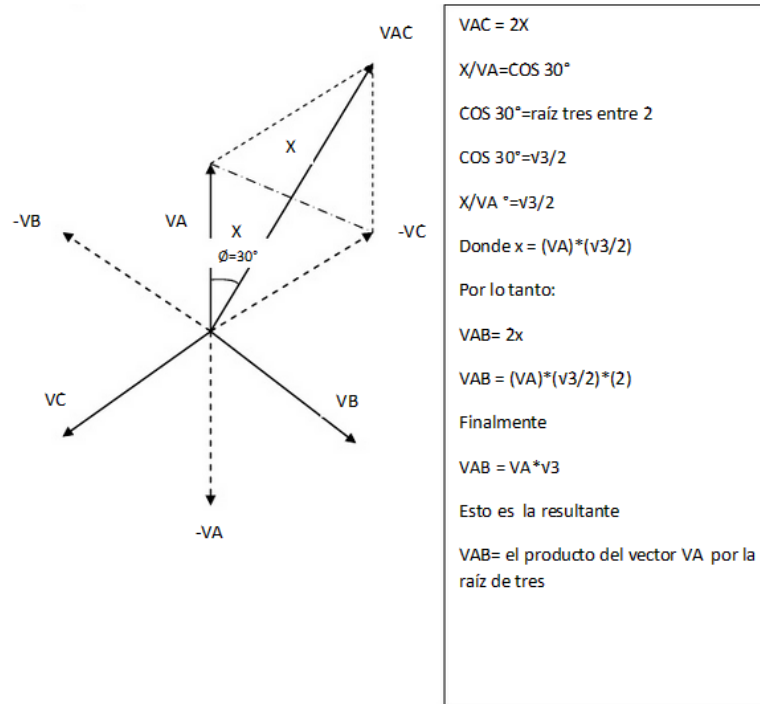


Figura 3a. Análisis de vectores, para el origen de la raíz de tres en sistema trifásicos

La corriente y los voltajes cuando son alternos se expresan de forma común por su valor efectivo o RMS (Root Mean Square – Raíz Media Cuadrática).

La potencia aparente ( $S$ ) no es realmente la "útil", salvo cuando el factor de potencia es la unidad ( $\cos \phi = 1$ ), y señala que la red de alimentación de un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a "almacenar" las bobinas y condensadores. Se mide en volt-amperios ( $VA$ ), aunque para aludir a grandes cantidades de potencia aparente lo más frecuente es utilizar como unidad de medida el kilo volt-amperio ( $kVA$ ), que se lee como "kavea" o "kaveas".

Al medir con un voltímetro la tensión o voltaje ( $V$ ) que llega hasta los bornes de un motor y seguidamente, por medio de un amperímetro, la intensidad de corriente en amperio ( $A$ ) que fluye por el circuito eléctrico de ese motor. Al multiplicar las cifras de los dos valores obtenidos el resultado de la operación será el valor de la potencia aparente ( $S$ ), expresada en volt-ampere ( $VA$ ) que desarrolla dicho motor y no precisamente su potencia activa ( $P$ ) en watts ( $W$ ).

La cifra que se obtiene de la operación matemática de hallar el valor de la potencia aparente ( $S$ ) que desarrolla un dispositivo será siempre superior a la que corresponde a la potencia activa ( $P$ ), porque al realizar esa operación matemática no se está tomando en cuenta el valor del factor de potencia o coseno de “fi” ( $\text{Cos}$ ).

El valor rms de una onda senoidal alterna corresponde a la misma cantidad de corriente o voltaje continuos en Potencia de calentamiento.

Por ejemplo, un voltaje alterno con un valor rms de 115V es igualmente efectivo para calentar el filamento de un foco de 115 V de una fuente estacionaria o estable de voltaje de cc. Por esta razón, el valor rms se llama también, valor efectivo.

Las letras V e I se usan para indicar el voltaje y la corriente rms. Por ejemplo,  $V = 220V$  (un voltaje de línea de alimentación de ca) se entiende que significa 220 V rms.

La tabla 1a, muestra una manera conveniente para convertir un valor característico en otro.

Multiplíquese el valor:	Por	Para obtener el valor
Pico	2	Pico a pico
Pico a pico	0,5	Pico
Pico	0,636	Promedio
Promedio	1,570	Pico
Pico	0,707	Efectivo o rms
Efectivo o rms	1,414	Pico
Promedio	1,110	Efectivo o rms
Efectivo o rms	0,901	Promedio

Tabla 1a. Conversión del voltaje y la corriente alternos con onda senoidal.

### 1.7 Potencia activa ( $P$ ).

La potencia activa, por ejemplo, es la que proporciona realmente el eje de un motor eléctrico cuando le está transmitiendo su fuerza a otro dispositivo mecánico para hacerlo funcionar.

Cuando conectamos una resistencia ( $R$ ) o carga resistiva en un circuito de corriente alterna, el trabajo útil que genera dicha carga determinará la potencia activa que tendrá que proporcionar la fuente de fuerza electromotriz ( $FEM$ ). La potencia activa se representa por medio de la letra ( $P$ ) y su unidad de medida es el watt ( $W$ ).

Los múltiplos más utilizados del watt son: el kilowatt ( $kW$ ) y el megawatt ( $MW$ ) y los submúltiplos, el miliwatt ( $mW$ ) y el microwatt ( $\mu W$ ).

La fórmula matemática para hallar la potencia activa que consume un equipo eléctrico cualquiera cuando se encuentra conectado a un circuito monofásico de corriente alterna se muestra en la ecuación 14a.

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos(\Theta)$$

Ecuación 14a. Potencia activa.

Es la potencia capaz de desarrollar trabajo útil, esta potencia es la consumida por los circuitos.

La ecuación 15a, muestra otra variante en cuanto a la potencia activa, en este caso para potencias trifásicas.

$$P = \sqrt{3} V I \cos\theta$$

Ecuación 15a. Potencia activa para sistema trifásico.

### 1.8 Potencia reactiva ( $Q$ ).

Esta potencia la consumen los circuitos de corriente alterna que tienen conectadas cargas reactivas, como pueden ser motores, transformadores de voltaje y cualquier otro dispositivo similar que posea bobinas o enrollados. Esos dispositivos no sólo consumen la potencia activa que suministra la fuente de *FEM*, sino también potencia reactiva.

La potencia reactiva o inductiva no proporciona ningún tipo de trabajo útil, pero los dispositivos que poseen enrollados de alambre de cobre, requieren ese tipo de potencia para poder producir el campo magnético con el cual funcionan. La unidad de medida de la potencia reactiva es el volt-ampere reactivo (*VAR*).

La fórmula matemática para hallar la potencia reactiva de un circuito eléctrico es la mostrada en la ecuación 16a.

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin(\Theta)$$

Ecuación 16a. Potencia reactiva.

Genera campos magnéticos y campos eléctricos, es originada por dispositivos de tipo inductivo y de tipo capacitivo.

La origina la componente de la corriente que está a  $90^\circ$  con el voltaje, en adelanto o en atraso.

En sistemas trifásicos se emplea la ecuación 17a, para el cálculo de la potencia reactiva.

$$Q = \sqrt{3} V I \sin\theta$$

Ecuación 17a. Potencia reactiva para sistema trifásico

### 1.9 Triángulo de potencia.

El llamado triángulo de potencias es la mejor forma de ver y comprender de forma gráfica qué es el factor de potencia o coseno de “fi” ( $\text{Cos}\Phi$ ) y su estrecha relación con los restantes tipos de potencia presentes en un circuito eléctrico de corriente alterna.

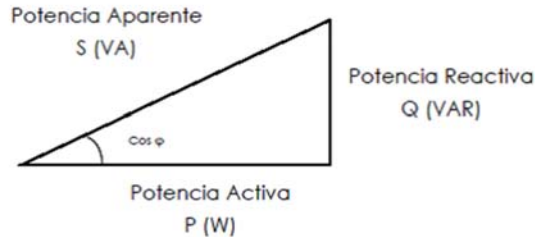


Figura 4a. Triángulo de potencia.

Como se podrá observar en el triángulo de la figura 4a, el factor de potencia o coseno de “fi” ( $\text{Cos}\Phi$ ) representa el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la potencia activa ( $P$ ) y la potencia aparente ( $S$ ), es decir, la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por la carga o el consumidor conectado a un circuito eléctrico de corriente alterna. Esta relación se puede representar también, de forma matemática, por medio de las ecuaciones 18a y 19a siguientes.

$$fp = P/S$$

Ecuación 18a. Factor de potencia.

$$fp = \cos(\Theta)$$

Ecuación 19a. Factor de potencia.

El resultado de esta operación será “1” o un número fraccionario menor que “1” en dependencia del factor de potencia que le corresponde a cada equipo o dispositivo en específico. Ese número responde al valor de la función trigonométrica “coseno”, equivalente a los grados del ángulo que se forma entre las potencias ( $P$ ) y ( $S$ ).

Factor de potencia, es la relación de la potencia activa  $P$  con la potencia aparente  $S$ .

Las cargas de tipo resistivo tienen un factor de potencia entre cero y uno y la corriente se encuentra en fase con respecto a la tensión. Figuras 5a y 6a.

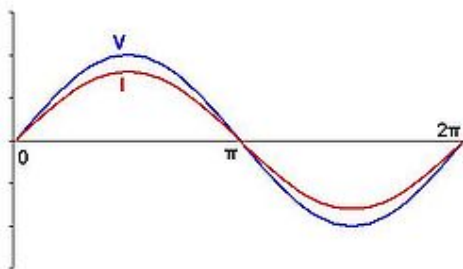


Figura 5a. Ondas de tensión ( $V$ ) y corriente ( $I$ ) en fase.



Figura 6a. Ángulo de fase  $\varphi=0^\circ$   
Tipo resistivo.

El factor de potencia de las cargas de tipo resistivo – inductivo se encuentran desfasada, la corriente respecto a la tensión está en atraso y se denomina de tipo inductivo. Figuras 7a y 8a.

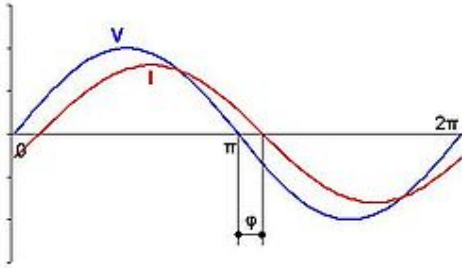


Figura 7a. Onda de corriente (I) atrasada en relación a la onda de tensión (V).

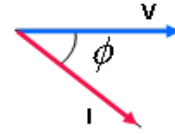


Figura 8a.  $FP < 1$  (atrasado) tipo inductivo.

El factor de potencia de las cargas de tipo resistivo – capacitivo, las ondas se encuentran desfasadas, la corriente se encuentra en adelanto con respecto a la tensión y se denomina de tipo capacitivo. Figuras 9a y 10a.

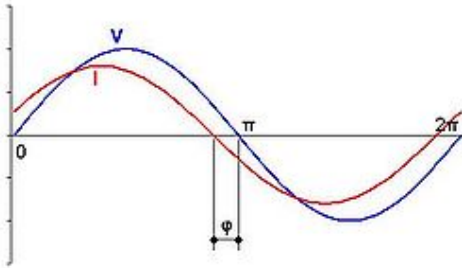


Figura 9a. Onda de corriente (I) adelantada en relación a la onda de tensión (V).

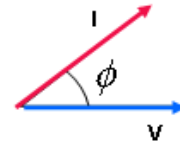


Figura 10a.  $FP < 1$  (adelantado) tipo capacitivo.

Si el número que se obtiene como resultado de la operación matemática es un decimal menor que “1” (como por ejemplo 0,95), dicho número representará el factor de potencia correspondiente al desfase en grados existente entre la intensidad de la corriente eléctrica y la tensión o voltaje en el circuito de corriente alterna.

Lo ideal sería que el resultado fuera siempre igual a “1”, pues así habría una mejor optimización y aprovechamiento del consumo de energía eléctrica, o sea, habría menos pérdida de energía no aprovechada y una mayor eficiencia de trabajo en los generadores que producen esa energía.

En los circuitos de resistencia activa, el factor de potencia siempre es “1”, porque en ese caso no existe desfase entre la intensidad de la corriente y la tensión o voltaje. Pero en los circuitos inductivos, como ocurre con los motores, transformadores de voltaje y la mayoría de los dispositivos o aparatos que trabajan con algún tipo de enrollado o bobina, el valor del factor de potencia se muestra con una fracción decimal menor que “1” (como por ejemplo 0,8), lo que indica el retraso o desfase que produce la carga inductiva en la senoidal correspondiente a la intensidad de la corriente con respecto a la senoidal de la tensión o voltaje.

Por tanto, un motor de corriente alterna con un factor de potencia  $\text{Cos}\phi=0,95$  por ejemplo, será mucho más eficiente que otro que posea un  $\text{Cos}\phi=0,85$ .

### 1.10 Teoría sobre compensación reactiva.

La potencia reactiva es fundamental para los sistemas c.a, debido a que muchas de las cargas en el sistema, requieren de reactivos para funcionar, así como, hay elementos de la red que generan reactivos. Siempre debe existir un equilibrio, debido a que una falta de potencia reactiva en un sistema, genera depresiones en las tensiones e igualmente al inverso, un exceso de potencia reactiva, ocasionaría sobretensiones.

Para tener una idea sobre la teoría de compensación de potencia reactiva necesitamos primero saber los principios de la corriente alterna y de ahí al análisis de compensación en sistemas que generan potencia reactiva.

Un ejemplo claro de como es que se comporta el voltaje de corriente alterna es por medio de la onda senoidal que presenta una señal, la cual es generada por el movimiento de una espira dentro de un campo magnético, esta onda senoidal tiene la misma forma para el voltaje como para la corriente eléctrica. La figura 11a, muestra la onda senoidal para un voltaje alterno, de una espira dentro de un campo magnético.

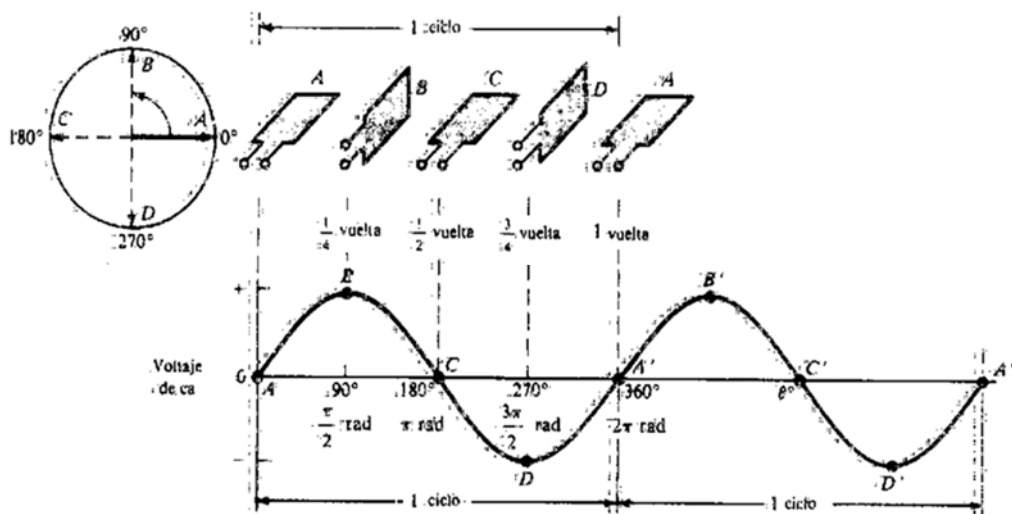


Figura 11a. Dos ciclos de un voltaje alterno generado por la espira giratoria.

Un voltaje de c.a. cambia continuamente en magnitud y periódicamente invierte su polaridad. El voltaje de c.a. puede ser producido por un generador llamado alternador.

En el generador simplificado que se muestra en la figura 11a, la espira conductora gira en el campo magnético y corta las líneas de fuerza para generar un voltaje inducido de c.a. entre sus terminales. Una revolución completa de la espira es un ciclo.

Como los ciclos del voltaje corresponden a una rotación de la espira describiendo un círculo, las partes del círculo se expresan como ángulos. El círculo completo es 360°, Medio ciclo, o una alternación, es 180°. Un cuarto de vuelta es 90°



Los ángulos se expresan también en radianes (rad).

El número de ciclos por segundo se llama frecuencia, se indica con el símbolo  $f$  y se expresa en hertz ( $Hz$ ). Un ciclo por segundo es igual a un hertz. Por tanto, 60 ciclos por segundo es igual a 60Hz. La figura 12a, muestra dos señales senosoidales de distinta frecuencia.

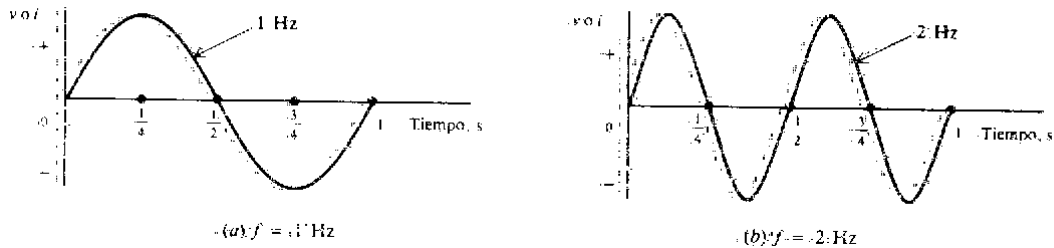


Figura 12a. Comparación de las frecuencias.

El tiempo que se requiere para completar un ciclo se llama período. Se indica por el símbolo  $T$  (por tiempo) y se expresa en segundos ( $s$ ). La frecuencia y el período son recíprocos.

Cuanto mayor sea la frecuencia, menor será el período. El ángulo de  $360^\circ$  representa el tiempo de 1 ciclo, o sea, el período  $T$ .

El ángulo de fase entre dos formas de onda de la misma frecuencia es la diferencia angular en cualquier instante. Por ejemplo, el ángulo de fase entre las ondas B y A de la figura 13a, es  $90^\circ$ . Tómese el instante correspondiente a  $90^\circ$ . El eje horizontal está indicado en unidades de tiempo angulares. La onda B comienza con valor máximo y se reduce a cero a  $90^\circ$ , mientras que la onda A comienza en cero y aumenta al valor máximo a  $90^\circ$ . La onda B alcanza su valor máximo  $90^\circ$  antes que la onda A, así que la onda B se adelanta a la onda A por  $90^\circ$ . Este ángulo de fase de  $90^\circ$  entre las ondas B y A se conserva durante todo el ciclo y todos los ciclos sucesivos.

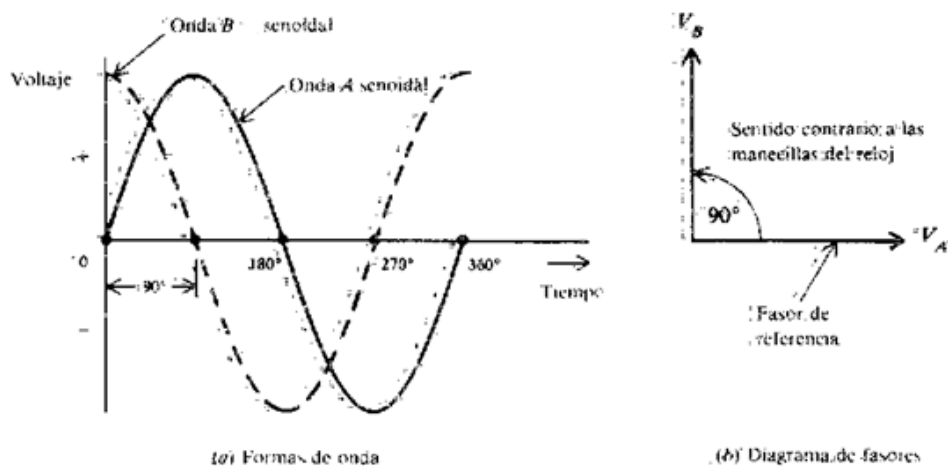


Figura 13a. Ángulo de fase entre dos formas de onda.

Para comparar los ángulos de fase o las fases de voltajes o corrientes alternas, es conveniente usar diagramas de fasores correspondientes a las formas de onda del voltaje y de la corriente.

Un fasor es una cantidad que tiene magnitud y dirección. Los términos fasor y vector se utilizan con las cantidades que tienen dirección. Sin embargo. Una cantidad fasorial varía con el tiempo, mientras que una cantidad vectorial tiene su dirección (fija) en el espacio.

La longitud de la flecha en un diagrama de fasores indica la magnitud del voltaje alterno. El ángulo de la flecha con respecto al eje horizontal indica el ángulo de fase.

Una forma de onda se escoge como referencia y la otra forma de onda se compara con la referencia mediante el ángulo entre las flechas de los fasores, figura 13a. Un ejemplo, se tiene en las figura 8a y 10a. Donde se muestra un ángulo de fase en atraso o en adelanto respectivamente entre la tensión y la corriente. Los ángulos en adelanto se muestran en dirección contraria a las manecillas del reloj desde el fasor de referencia en tanto los ángulos en atraso corresponden al sentido de las manecillas del reloj. La figura 14a, muestra dos ángulos de referencia.

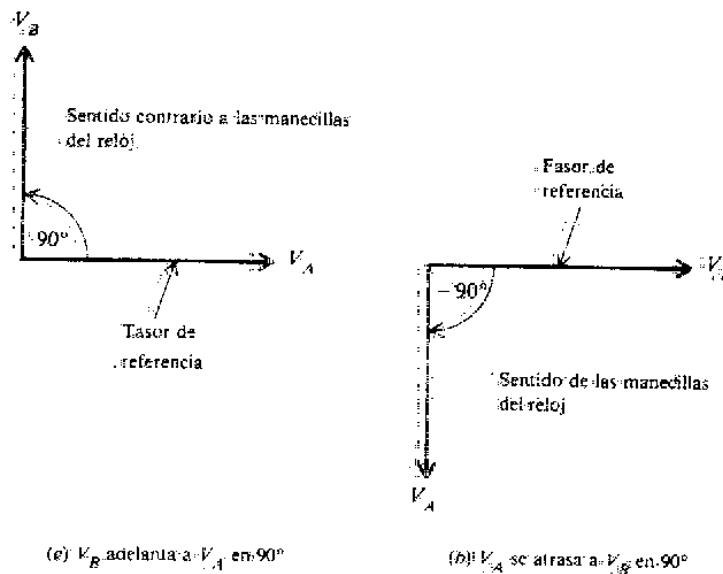


Figura 14a. Ángulos de fase de adelanto y atraso

Cuando dos ondas están en fase figura 15, el ángulo de fase es cero; las amplitudes se suman. Cuando dos ondas están fuera de fase Figura 16a, el ángulo de fase es  $180^\circ$ . Sus amplitudes se oponen. Valores iguales con fase opuesta se cancelan.

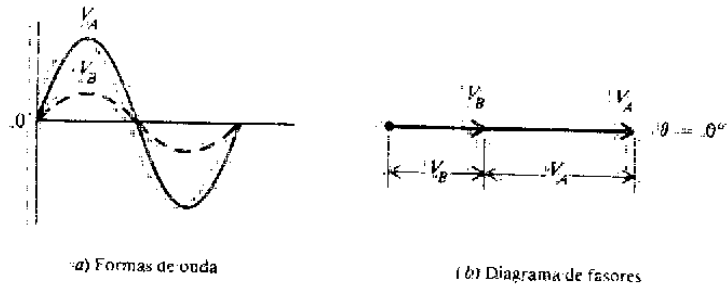


Figura 15a. Dos ondas en fase con un ángulo de  $0^\circ$

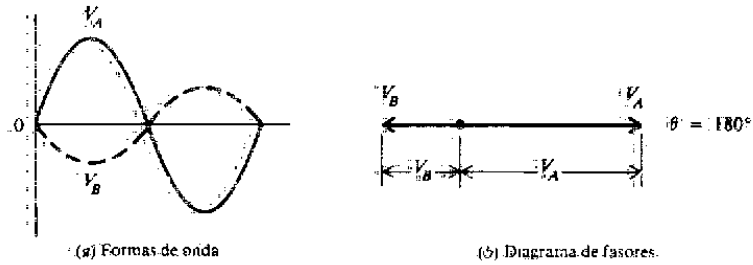


Figura 16a. Dos ondas opuestas en fase con un ángulo de  $180^\circ$

Como una señal senoidal de voltaje o de corriente alterna tiene muchos valores instantáneos a lo largo del ciclo, es conveniente especificar las magnitudes con las que se pueda comparar una onda con otra. Se pueden especificar los valores pico, promedio o raíz cuadrática media (*rms*) figura 17a. Estos valores son aplicables a la corriente o al voltaje.

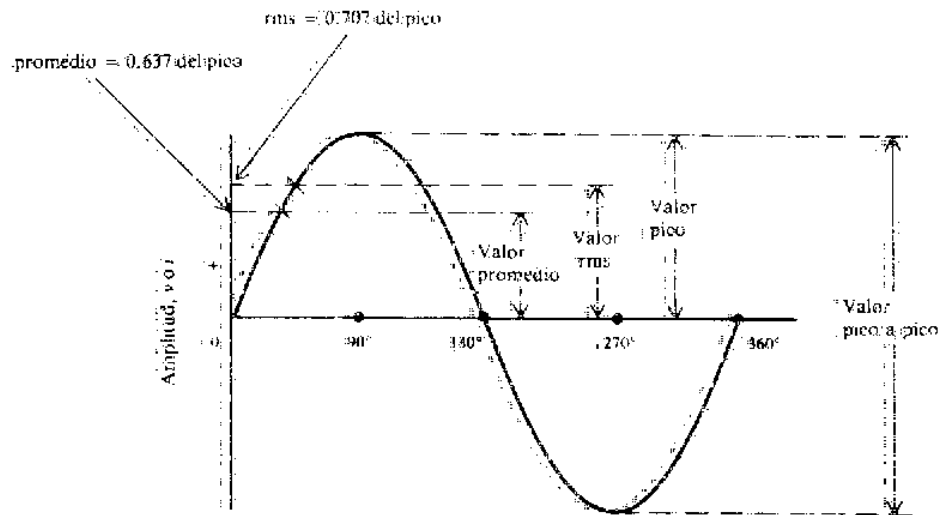


Figura 17a. Valores de la amplitud de una onda de c.a. senoidal.

Todo esto es un poco de información a grandes rasgos sobre tensión de corriente alterna, esto con la finalidad de conocer el comportamiento de una señal senoidal y los ángulos de fase, entre otros parámetros en general, ya que tienen que ver mucho con el tema.

El análisis de la tensión de corriente alterna, se hizo referencia por la razón de que es en ella, en donde se generan los efectos de que se estudiarán para la compensación de potencia reactiva.

En donde los efectos de la potencia reactiva son el desaprovechamiento y sobrecarga de las redes de distribución y de nuestra instalación, haciendo que disminuya la potencia activa que circula por ellas en favor de la potencia reactiva. En los transformadores el efecto es el mismo haciendo que esta máquina proporcione menos potencia activa de la que está diseñada.

Para comprobar si la cantidad de potencia reactiva que se está consumiendo en una instalación es excesiva se usa el término factor de potencia, que es la diferencia de ángulos entre la suma de los vectores de la potencia activa y la potencia reactiva. Así un factor de potencia de 0,95 en un factor de potencia alto, por tanto bueno para nuestra instalación y un factor de potencia de 0,7 es bajo y muy malo para nuestra economía.

Para evitar este problema las compañías eléctricas fijan un factor de potencia máximo de 0,9 en las industrias para evitar la saturación de las líneas de distribución. En el momento que la potencia reactiva consumida por una industria produzca un factor de potencia inferior a 0,9 la compañía eléctrica penaliza esta empresa con un recargo en el recibo de la luz en concepto de energía reactiva. En el caso de que se mantenga el factor de potencia en 0,9 o superior la compañía eléctrica no penaliza a la empresa.

Para elevar el factor de potencia se utilizan baterías de condensadores conectadas en el cuadro general de distribución de baja tensión de la empresa. Normalmente se usan baterías de condensadores regulables de forma automática, haciendo que el factor de potencia se mantenga lo más constante posible según la variación de potencia reactiva consumida por la industria.

En todo suministro eléctrico mayor de 15 kW trifásico, tiene especial importancia por su influencia en la factura mensual, el factor de potencia. *El factor de potencia se define como el desfase entre la tensión y la intensidad*, o en otras palabras, el retraso en el tiempo que sufren la onda de tensión y de intensidad en pasar por un punto determinado.

Este desfase viene producido por la creación de campos electromagnéticos necesarios para muchos procesos en la industria, comercio y vivienda. Figura 18a.

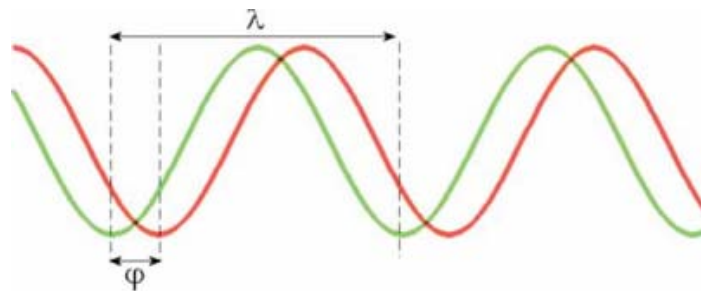


Figura 18a. Representación de la onda de desfase entre la tensión y la corriente.

Cualquier motor, reactancia o transformador necesita para su funcionamiento la creación de una inducción magnética.

Esta inducción magnética aparece cuando se hace circular una determinada intensidad a través de un arrollamiento, creándose un campo magnético que se hace incidir sobre un segundo arrollamiento. Este segundo arrollamiento puede ser fijo (en los transformadores y reactancias) o móvil (en los motores). La figura 19a, muestra un ejemplo sobre inducción magnética en un transformador.

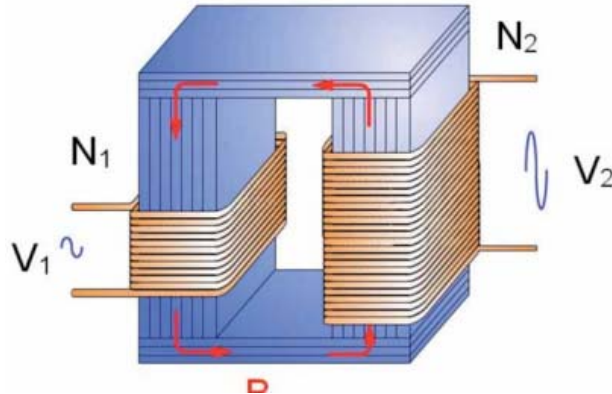


Figura 19a. Transformador elevador de tensión.

En este fenómeno de creación del campo magnético se produce una división de la energía entregada por la red: una parte se utiliza para la generación de trabajo llamada energía activa y otra para la generación del campo magnético llamada energía reactiva.

Desde el punto de vista estrictamente técnico, una instalación correctamente dimensionada puede funcionar con normalidad incluso en presencia de un bajo factor de potencia; por este motivo, no existen normas que indiquen el valor exacto del factor de potencia que debe tener una instalación eléctrica.

El por qué corregir el factor de potencia, existen dos razones importantes, una es en lo económico, la cual es la de reducir recargos en la facturación eléctrica.

El otro motivo para la instalación de equipos para la compensación del bajo factor de potencia, es para instalaciones donde los consumos se acercan al límite de su diseño, compensar la energía reactiva permite disminuir la cantidad de energía transmitida por la red y mejorar el rendimiento de la misma. Los efectos principales del bajo factor de potencia son:

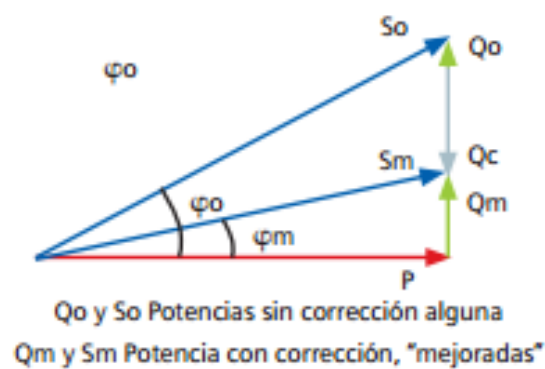
- Aumento de la potencia aparente.
- Incremento en la corriente.

Una de las causas del incremento de la corriente eléctrica es la reducción de la tensión. La corrección de este fenómeno, se logra con la instalación de condensadores los cuales permite reducir la energía reactiva transportada por las líneas de alta tensión, las cuales generan caídas de tensión en la línea. La figura 20a, muestra la fotografía de un gabinete de banco de capacitores con características particulares.



Figura 20a. Gabinete de banco de capacitores con características particulares.

La figura 21a, muestra el triangulo de potencia en donde se representan la compensación de la potencia reactiva antes y después de compensarla.



La figura 21a. Triangulo de potencia con corrección y sin corrección.

### Métodos de compensación de la energía reactiva.

La instalación de condensadores permite aumentar la potencia disponible en una instalación sin necesidad de ampliar los equipos como cables, aparatos y transformadores.

#### 1. Compensación centralizada y regulada.

Es la más utilizada entre todos los tipos de compensación. Se trata de compensar en la acometida de la instalación, de forma que la instalación quede sin energía reactiva justo antes del contador de energía eléctrica.

Para ello es necesaria una batería de condensadores regulada. El equipo, pues, contiene un regulador que a partir de las señales de intensidad y tensión provenientes de la instalación es capaz de conectar y/o desconectar aquellos pasos necesarios para alcanzar el nivel de compensación requerido. Figura 22a.

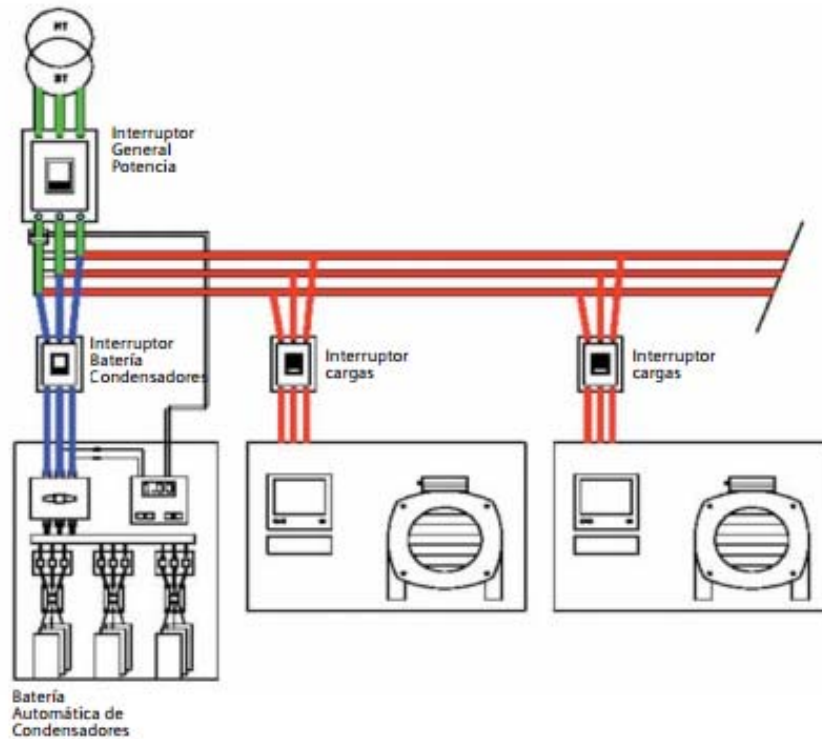


Figura 22a. Compensación centralizada y regulada.

## 2. Compensación fija: motores y transformadores

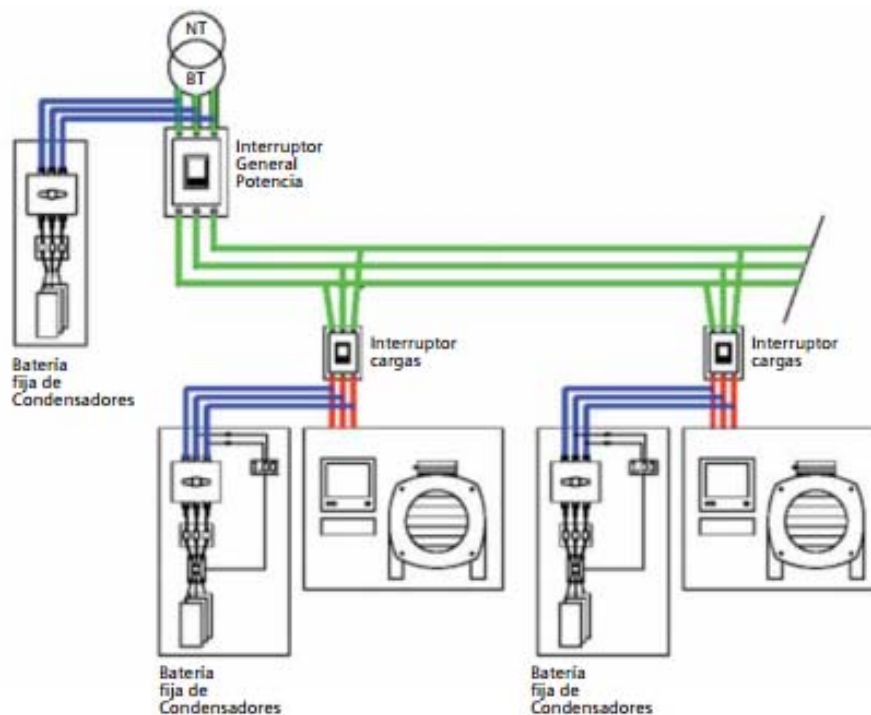
La compensación fija o distribuida se realiza a todos los elementos generadores de energía reactiva punto a punto.

Para los motores se realiza una compensación retardada para evitar la desexcitación del rotor durante la arrancada del motor.

Para los transformadores se instalan condensadores fijos dimensionados al 5% de la potencia nominal del transformador.

La compensación de transformadores se realizan en instalaciones donde el contador de la compañía se halla situado en media tensión, debiéndose compensar en esta situación, la energía reactiva del mismo.

Es aconsejable la colocación de seccionadores en carga para la eventual sustitución de fusibles. La figura 23a, muestra la imagen respecto a la compensación fija.



La figura 23a. Compensación fija.

Generalmente, la compensación centralizada es la más utilizada, dado que el precio del equipo y de la instalación es más económica que la distribución de toda la fábrica. Tiene el inconveniente de que la mejora en el rendimiento de la instalación se realiza únicamente a nivel del interruptor general de la empresa.

La compensación distribuida, aunque más cara, tiene la ventaja de dejar toda la instalación en el mejor punto de funcionamiento.

### **Cálculo de la energía reactiva.**

La potencia reactiva necesaria en las instalaciones se puede obtener de varias formas:

1. Análisis de las facturas eléctricas: los datos obtenidos en las facturas más representativas son:

La energía consumida en horas punta, que se debe contrastar con la potencia contratada para realizar una aproximación a la cantidad de horas de trabajo de la instalación. El mínimo de facturas necesaria es de 3 consecutivas.

2. Análisis de la instalación:

Mediante un analizador de redes donde queden registrados el consumo en potencia activa y reactiva. Las mediciones aconsejables son de un mínimo de 1 semana.



### 3. Toma de lecturas del contador:

Importante en este caso conocer el número de horas trabajadas y el número de máquinas en marcha.

Con estos métodos, se deduce una potencia de energía reactiva con la que dimensionar la batería de condensadores adecuada.

#### 1.11 Ejemplo de compensación de potencia reactiva.

##### Instalación sin condensador.

En una instalación sin condensadores los  $kVAr$  (*kilo Volts Ampers reactivos*) en exceso son facturados y la potencia en  $kVA$  (*kilo Volts Ampers*) es superior a las necesidades en  $kW$  (*kilo Watts*).

En la ecuación 21a, se muestra que la suma de la potencia activa en  $kW$  y la potencia reactiva en  $kVAr$ , en donde tendremos su equivalente en potencia aparente  $kVA$ .

$$kVA = kW + kVAr$$

Ecuación 21a. Relación entre unidades de potencias.

##### Característica de la instalación.

- Potencia activa ( $P$ ) = 500 kW,  $\cos\theta = 0,75$

- Transformador (630 kVA, 400 V)

La ecuación 22a, muestra como se puede obtener la potencia aparente, partiendo de la combinación de las ecuaciones 14a y 19a. Siempre que conozcamos la potencia activa y el coseno del ángulo.

$$S = \frac{P}{\cos\phi}$$

Ecuación 22a. Potencia aparente, conociendo la potencia activa y el coseno del ángulo.

$$S = 500 \text{ kW} / 0,75 = 666 \text{ kVA} \quad S = \text{Potencia aparente}$$

Transformador sobrecargado por la potencia aparente a 666 kVA.

Calculamos la corriente con factor de potencia de 0.75, utilizando la ecuación 15a y posteriormente despejando a la corriente tenemos, la ecuación 23a.

$$I = \frac{P}{\cos\theta V\sqrt{3}}$$

Ecuación 23a. Cálculo de la corriente de la potencia activa.

$$I_1 = \frac{500 \text{ kW}}{(400)(\sqrt{3})(0.75)} = 963 \text{ A}$$

Los componentes como el interruptor automático y los cables son elegidos para una corriente total de 963 A.

La tabla 2a, siguiente muestra el aumento de la potencia que puede suministrar un transformador corrigiendo a  $\cos\phi = 1$ .

Cos $\phi$	Potencia disponible
1	100%
0,8	90%
0,6	80%
0,4	60%

Tabla 2a. Aumento de la potencia de un transformador corrigiendo a  $\cos\phi$ .

### Instalación con condensador.

El consumo de *KVAr* queda suprimido o disminuido según el  $\cos\phi$  deseado.

Las penalizaciones en el conjunto de la facturación quedan suprimidas.

El contrato de potencia en *kVA* se ajusta a la demanda real en *kW*.

Característica de la instalación.

$$P = 500 \text{ kW}, \text{ Cos } \phi = 0,928$$

$$S = \frac{P}{\text{Cos } \phi} = \frac{500 \text{ kW}}{0,928} = 539 \text{ kVA}_2 \quad S = \text{Potencia aparente}$$

*Del transformador de 600 kVA solo es utilizada la potencia de 539 kVA, por lo tanto queda una potencia aproximada del 10 % disponible en el transformador.*

El interruptor automático y los cables son elegidos a partir de los resultados obtenidos en la ecuación 23a, para el cálculo de la corriente.

$$I_2 = \frac{500 \text{ kW}}{(400)(\sqrt{3})(0.928)} = 779 \text{ A}$$

$$\text{Reducción de corriente} = I_1 - I_2$$

$$= 963 \text{ A} - 779 \text{ A} = 185 \text{ A}$$

**Planteamiento analítico para la corrección del factor de potencia.**

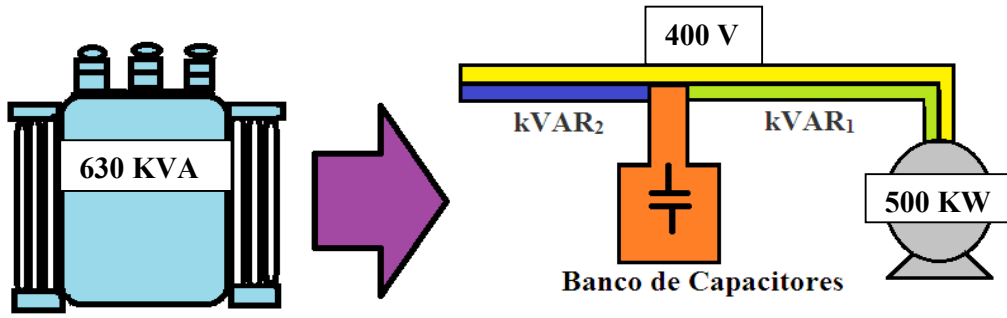


Figura 24a. Instalación con banco de capacitores.

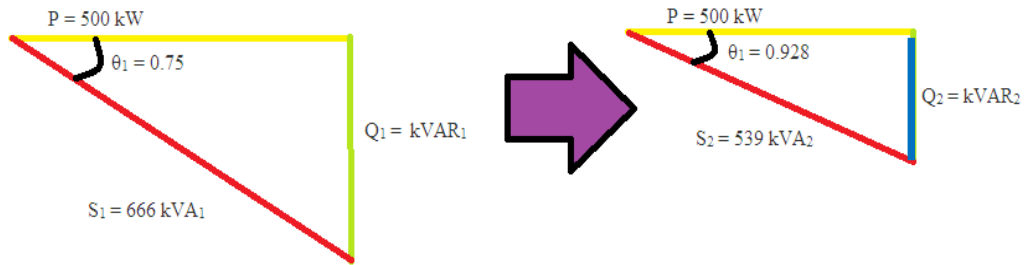


Figura 25a. Representación de triángulos de potencia.

$$Q_C = Q_1 - Q_2$$

$$kVAR_1 = kW \times \tan \theta_1 \quad \tan \theta_1 = \cos^{-1} 0.75 = \tan 41.40$$

$$kVAR_1 = 500kW \times \tan 41.40$$

$$kVAR_2 = kW \times \tan \theta_2 \quad \tan \theta_2 = \cos^{-1} 0.928 = \tan 21.928$$

$$kVAR_2 = 500kW \times \tan 21.928$$

$$Q_C = kVAR_1 - kVAR_2$$

$$= 500 kW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$= 500 kW (\tan 41.40 - \tan 21.928)$$

$$= 240kVAR_C$$

La energía reactiva está suministrada mediante la batería de condensadores, la cual debe ser de 240 kVAR.

## Capítulo 2. Equipos dentro de los sistemas de compensación de potencia reactiva.

### 2.1 Elementos que producen o consumen potencia reactiva.

Antes de abordar los distintos equipos utilizados dentro de los sistemas de compensación de potencia reactiva, consideremos cuáles son los equipos de un sistema eléctrico que producen o consumen potencia reactiva.

**Generadores síncronos:** Está formado por dos devanados independientes: el devanado inductor o de excitación alimentado por una corriente continua y el devanado inducido en trifásico y por el que fluye corriente alterna. Normalmente, al contrario que en los motores, el inductor es el rotor y el inducido el estator que es de donde se "recogerá" la energía eléctrica.

Para excitar el inductor, normalmente, la corriente continua procede de un generador c.c. o excitatriz que se encuentra unido mecánicamente con la turbina y el generador, es decir, otro generador en el mismo eje, de forma que su salida se aplica al rotor del generador mediante anillos rozantes y escobillas.

Pueden generar o consumir potencia reactiva dependiendo de su excitación. La función del sistema de excitación es suministrar corriente continua (cc) a los devanados de campo del generador principal. A la vez, este campo magnético hace que los devanados del estator produzcan voltaje de salida.

La autoexcitación es el proceso por medio del cual el sistema de excitación recibe energía del sistema que está regulando. Veamos el sistema en la figura 1b. Un regulador de voltaje vigila el voltaje a través de los devanados. El regulador de voltaje aplica más voltaje al sistema para compensarlo. El regulador de voltaje es alimentado por el mismo voltaje. El voltaje se alimenta dentro del estator excitador como corriente continua (cc).

Normalmente los generadores síncronos están equipados con reguladores automáticos que controlan de forma continua la tensión en el punto de conexión.

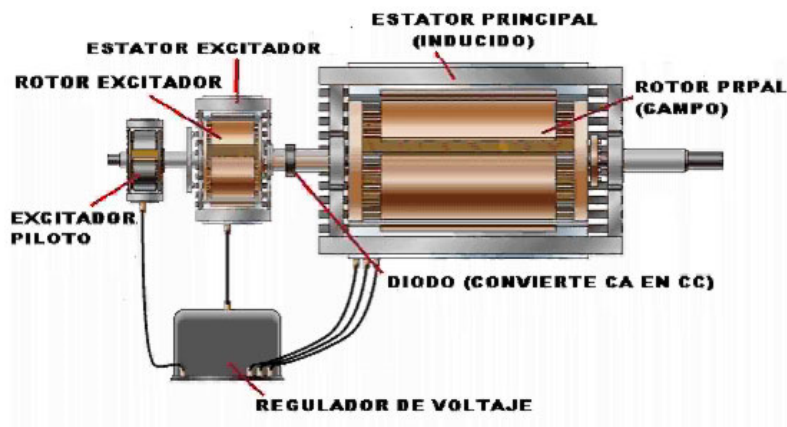


Figura 1b. Componentes de un generador síncrono.

Los generadores más nuevos no tienen anillos rozantes o escobillas, y la excitatriz la componen dos generadores, uno principal y el piloto.

El de la excitatriz principal es un generador síncrono donde el inducido es el rotor y el devanado inductor el estátor, cuya salida principal (en trifásica) se convierte en continua mediante un puente rectificador de seis diodos giratorios montados sobre el mismo eje y su salida es la que alimenta al rotor (inductor) del generador principal. El devanado de la excitatriz principal se alimenta mediante el otro generador de pequeña potencia, llamado excitatriz piloto y cuyo rotor no está bobinado, sino que utiliza imanes permanentes, que son los que van acoplados al eje. Figura 2b.

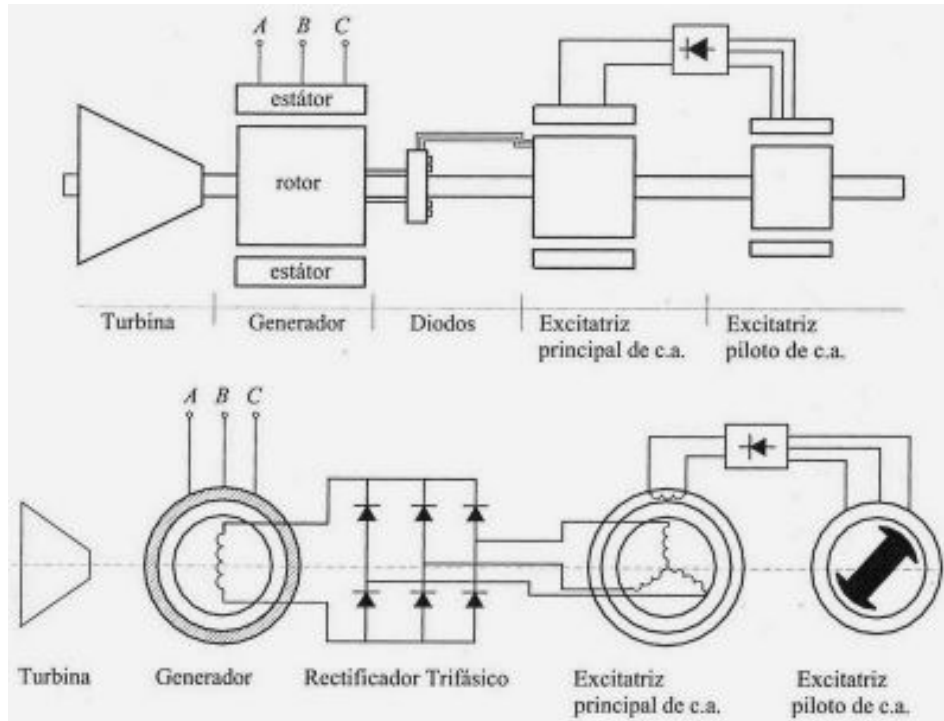


Figura 2b. Esquema de excitación moderna de la máquina síncrona.

**Líneas aéreas:** En función de su carga, absorben o generan potencia reactiva. En general, cuando están cargadas absorben reactiva, y cuando están descargadas la generan, por el hecho de ser un conductor de grandes longitudes, que a la vez esta generando un campo magnético, entre líneas lo cual tiende a generar potencia reactiva. En la figura 3b, se muestra algunas torres para diferentes tensiones en líneas aéreas.

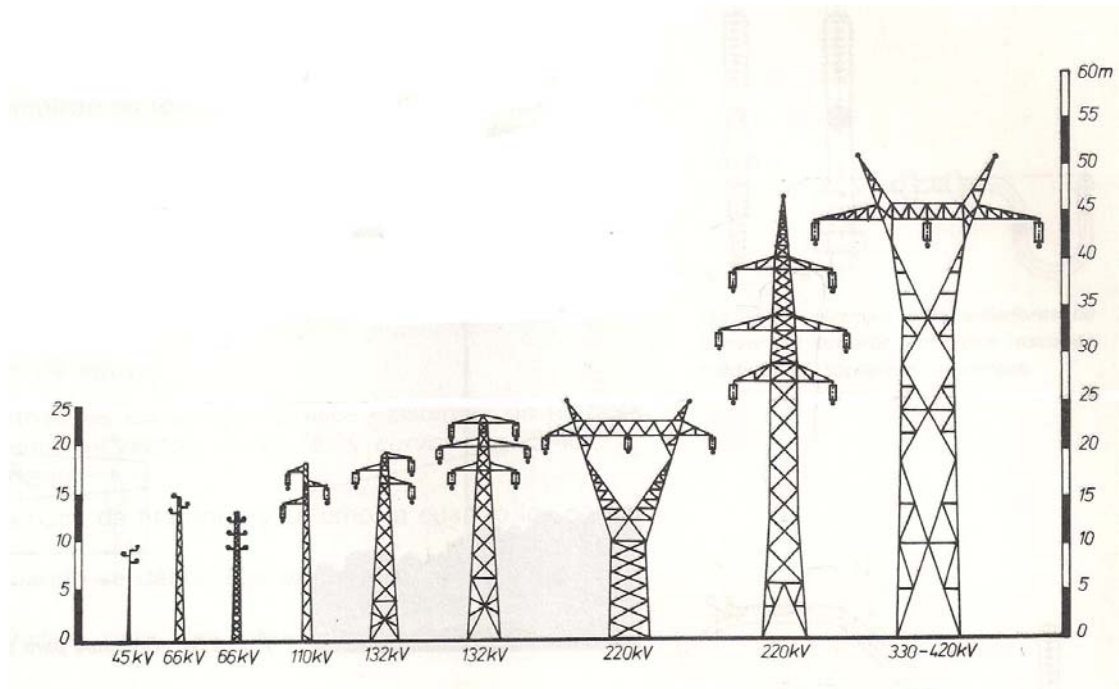


Figura 3b. Torres para diferentes tensiones en líneas aéreas.

**Cables subterráneos:** Debido a su elevada capacidad distribuida, generan potencia reactiva, debido al efecto Ferranti la cual es una sobretensión producida en una larga línea de transmisión, relativa a la tensión al final de la misma, que ocurre cuando esta está desconectada de la carga, o bien con una carga muy pequeña.

Este efecto es debido a la capacitancia distribuida o capacidad distribuida, de la línea. El efecto Ferranti será más acentuado cuanto más larga sea la línea, y mayor el voltaje aplicado. La sobretensión es proporcional al cuadrado de la longitud de la línea. Debido a su alta capacitancia, éste efecto es mucho más pronunciado en cables subterráneos, incluso en líneas cortas.

Cuando la línea está en vacío o con muy poca carga, al no circular una cantidad significativa de corriente a través de las inductancias serie distribuidas la absorción de reactivos por parte de la línea será mínima en comparación con la inyección de reactivos por parte de las capacitancias distribuidas.

**Transformadores:** Siempre consumen potencia reactiva. Cuando están descargados lo hacen por la reactancia de magnetización, y cuando están cargados por la reactancia en serie, debido a que se trata de bobinas y siempre están en serie con el elemento (resistencia asociada).

**Cargas:** Normalmente absorben potencia reactiva, si bien depende de la naturaleza de la carga: las lámparas incandescentes y los sistemas de calefacción son resistivos, mientras los motores de inducción y las lámparas fluorescentes son inductivos. Las compañías eléctricas penalizan económicamente las cargas inductivas, las cuales suelen compensarse la potencia reactiva mediante la instalación de baterías de condensadores.

**Dispositivos compensadores:** Generan o consumen potencia reactiva para contribuir al control de compensación.

## 2.2 Capacitores.

El condensador o capacitor almacena energía en la forma de un campo eléctrico y se llama capacitancia o capacidad a la cantidad de cargas eléctricas que es capaz de almacenar.

En aplicación en la teoría de la electricidad un capacitor regula voltaje y proporciona reactivos capacitivos.

Formada por dos placas metálicas separadas por un aislante llamado dieléctrico. Figura 4b.

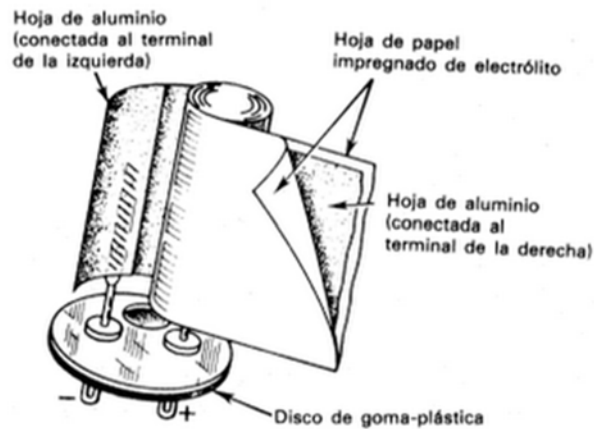


Figura 4b. Estructura interna del capacitor.

### La capacidad depende de las características físicas del condensador:

- Si el área de las placas que están frente a frente es grande la capacidad aumenta.
- Si la separación entre placas aumenta, disminuye la capacidad.
- El tipo de material dieléctrico que se aplica entre las placas también afecta la capacidad.
- Si se aumenta la tensión aplicada, se aumenta la carga almacenada.

### Dieléctrico o aislante.

Un dieléctrico o aislante es un material que evita el paso de la corriente, y su función es aumentar la capacitancia del capacitor.

Los diferentes materiales que se utilizan como dieléctricos tienen diferentes grados de permitividad (diferente capacidad para el establecimiento de un campo eléctrico) en la tabla 1b, se muestra componentes y grados de permitividad relativa.

material	Permitividad relativa (Er)
vacío	1
Aire	1,0059
Polietileno	2,5
Porcelana	5...6
Mica	7
Pentóxido tántalo	26
cerámica	10 a 50000

Tabla 1b. Grados de permitividad relativa para distintas componentes.

Mientras mayor sea la permitividad, mayor es la capacidad del condensador. La capacitancia de un condensador está dada por la ecuación 1b.

$$C = \epsilon_r \times A / d$$

Ecuación 1b. Capacitancia.

Donde:

- C = capacidad
- Er = permitividad
- A = área entre placas
- d = separación entre las placas

Las principales características eléctricas de un condensador son su capacidad o capacitancia y su máxima tensión entre placas (máxima tensión que es capaz de aguantar sin dañarse).

La frecuencia de resonancia de un capacitor se puede determinar por medio de los elementos parásitos, los cuales implican una resistencia y una inductancia propias del capacitor.

### **Carga/descarga de un capacitor.**

El capacitor constituye un componente pasivo que, a diferencia de la batería, se carga de forma instantánea en cuanto la conectamos a una fuente de energía eléctrica.

Su descarga se produce también de forma instantánea cuando se encuentra conectado en un circuito eléctrico o electrónico energizado con corriente. Una vez que se encuentra cargado, si éste no se emplea de inmediato se auto-descarga en unos pocos minutos.

En un circuito RC con un resistor y un capacitor en serie, es en donde las corrientes, voltajes y potencias cambian en el tiempo, pero para ello se debe cargar o descargar dicho capacitor.

Muchos dispositivos importantes incluyen circuitos en los que se carga y descarga alternativamente un capacitor. Entre ellos se encuentran los marcapasos cardiacos, los semáforos intermitentes, las señales direccionales de los automóviles y las unidades de destello electrónico.



## Diferentes tipos de capacitores.

Existen tres categorías diferentes de capacitores:

- De capacidad fija, con láminas metálicas paralelas.
- Semifijos o de capacidad ajustable.
- De capacidad variables (prácticamente en desuso, pues han sido sustituido por diodos varicap o varistor).

Además, de acuerdo con el tipo de corriente que emplean para su funcionamiento, los capacitores fijos pueden ser “polarizados” o “no polarizados”. Los no polarizados se emplean en circuitos de corriente alterna (C.A.), mientras los polarizados como son, por ejemplo, los capacitores “electrolíticos”, se emplean en circuitos energizados con corriente directa (C.D.). Estos últimos se diferencian de los anteriores en que el extremo de conexión negativo se identifica con uno o varios signos menos (–) impresos a un costado del cuerpo. Resulta estrictamente necesario respetar esa polaridad cuando se conectan los capacitores electrolíticos en un circuito eléctrico de corriente directa (C.D.), porque de lo contrario se hinchan quedando inutilizados o, incluso, pueden llegar a explotar.

Capacitores más utilizados en la actualidad de acuerdo con el tipo de dieléctrico que utilizan:

- Cerámica.
- Cerámica multicapa.
- Mica-plata.
- Poliéster metalizado.
- Poliestireno.
- Polipropileno.
- Supercapacitores.
- Tantalio.

La figura 5b. Muestra algunos de estos tipos de capacitores.

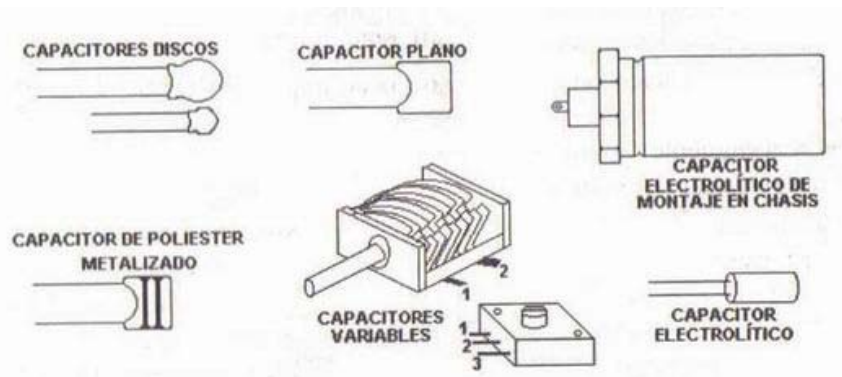


Figura 5b. Capacitores más comunes.

En la actualidad los capacitores se fabrican en diferentes tamaños y formas para trabajar con tensiones que cubren desde muy pocos volt hasta miles de volt y variadas capacidades. Su tamaño puede ser lo mismo de unos pocos milímetros solamente, como

es el caso de los SMD (*Surface Mounted Device* – Dispositivo montado en superficie), o de varios centímetros de longitud o altura, como los empleados para corregir el factor de potencia en las líneas de distribución eléctrica.

**Algunas tareas que requieren el uso de capacitores, como son:**

- Acoplar diferentes pasos o secciones de los circuitos electrónicos.
- Filtrar la corriente alterna cuando queremos convertirla en corriente directa completamente rectificadas.
- Actuar como filtro “pasa altos” para desviar frecuencias de audio agudas hacia altoparlantes del tipo “*tweeter*”.
- Actuar como filtro “pasa bajos” para desviar las frecuencias de audio más graves hacia el altoparlante “*subwoofer*”.
- Actuar como filtro “pasa banda” permitiendo solamente el paso de un rango estrecho de frecuencias en receptores de radio y televisión.
- Sintonizar estaciones de radio en receptores.
- Bloquear la corriente directa, permitiendo solamente la circulación de corriente alterna por un circuito electrónico.
- Formar un circuito oscilante u oscilador local cuando trabaja acoplado con una inductancia, con el fin de generar ondas de radiofrecuencia, incluyendo las microondas en hornos domésticos.
- Retener información en dispositivos de memoria USB y tarjetas como son las SD (*Secure Digital*) utilizadas en las cámaras fotográficas, teléfonos celulares, etc.
- Seleccionar funciones de operación en diferentes dispositivos y equipos, tocando simplemente un selector táctil o una pantalla con la yema de los dedos.
- Realizar la descarga inmediata de la energía acumulada en determinado momento, tal como requieren las lámparas *flash* de las cámaras fotográficas.
- Eliminar las interferencias de radio que generan las líneas de transmisión eléctrica de corriente alterna y algunos aparatos domésticos como las lámparas de luz fluorescente.
- Desfasar el campo magnético giratorio que se produce entre el rotor y el estator en motores eléctricos de corriente alterna monofásica para romper la inercia en el momento del arranque.
- Corregir el factor de potencia o “coseno de  $\phi$ ” en fábricas e industrias donde existen muchos equipos consumidores de potencia inductiva.

**Características principales de capacitores para la corrección de potencia.**

- Bobinas de polipropileno metalizado auto-regenerativo y con dieléctrico seco.
- Dispositivo interruptor de seguridad contra alta presión interna.
- Máxima corriente de falla permitida de 10000 A.
- Pérdidas dieléctricas menores a 0,4 W/ kVAr.
- Resistencias de descarga incorporadas en las unidades trifásicas, módulos y bancos.

A continuación se muestra imágenes de sistemas de corrección del factor de potencia por medio de banco de capacitores. Figuras 6b, 7b y 8b.



Figura 6b. Sistemas de corrección del factor de potencia para baja tensión por medio de capacitores.



Figura 7b. Sistemas de corrección del factor de potencia para baja tensión por medio de capacitores polipropileno metalizado auto-regenerativo.



Figura 8b. Banco de capacitores para corregir el factor de potencia para una industria.

### **Instalación de los Capacitores.**

Para la instalación de los capacitores deberán tomarse en cuenta diversos factores que influyen en su ubicación como lo son: La variación y distribución de cargas, el factor de carga, tipo de motores, uniformidad en la distribución de la carga, la disposición y longitud de los circuitos y la naturaleza del voltaje. No se debe efectuar una compensación excesiva de potencia reactiva ya que, en tal caso, debido a sobrecompensación se puede establecer un aumento de la tensión de los equipos con respecto a la de la red.

Los capacitores han de ser localizados cerca de las cargas a fin de obtener el mínimo costo y los máximos beneficios.

Aunque desde el punto de vista físico un condensador no almacena carga ni corriente eléctrica, sino simplemente energía mecánica latente; al ser introducido en un circuito se comporta en la práctica como capaz de almacenar la energía eléctrica que recibe durante la carga, a la vez que la cede de igual forma durante la descarga.

Los capacitores se utilizan junto con las bobinas, formando circuitos en resonancia, en las radios y otros equipos electrónicos. Además, en los tendidos eléctricos se utilizan grandes capacitores para producir resonancia eléctrica en el cable y permitir la transmisión de más potencia.

Generalmente, todos los Capacitores son secos, esto quiere decir que son fabricados con cintas de plástico metalizado, auto-regenerativos, encapsulados en plástico para mejor aislamiento eléctrico, de alta estabilidad térmica y resistente a la humedad.

El principal inconveniente de los condensadores es que su generación de potencia reactiva es proporcional al cuadrado de la tensión, por lo que su capacidad de aportar potencia reactiva disminuye cuando las tensiones son muy bajas, precisamente cuando es más necesaria.

Los condensadores en paralelo son muy frecuentes, tanto en la red de transporte como en líneas de distribución.

### 2.3 Reactores.

Los reactores de potencia son el medio más compacto y de mejor relación coste-eficacia para compensar la generación capacitiva en líneas de alta tensión de transmisión larga o en sistemas de cables de gran longitud. Figura 9b.

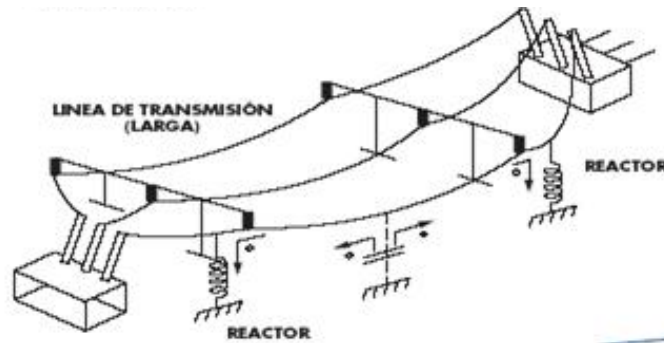


Figura 9b. Reactores en líneas de transmisión.

Las soluciones alternativas son más costosas, se traducen en mayores pérdidas, requieren más equipos y exigen recursos adicionales. Usados en servicio permanente para estabilizar la transmisión de potencia, o conectados solamente en condiciones de carga ligera para control de tensión, los reactores de potencia combinan alta eficacia con bajos costes de ciclo de vida para reducir los costes de transmisión y aumentar los beneficios.

Puesto que la corriente capacitiva es proporcional al voltaje del sistema, los volts-ampere reactivos son proporcionales al cuadrado del voltaje de la línea. Esta energía reactiva debe ser controlada, pues de lo contrario, puede provocar grandes sobre tensiones en las terminales de los equipos conectados al sistema de potencia.

Las reactancias y condensadores en paralelo constituyen el medio sencillo y económico de inyectar o consumir potencia reactiva en el nudo en el que son conectados.

Típicamente las reactancias se conectan en horas valle, cuando las líneas están menos cargadas y las tensiones tienden a subir, mientras los condensadores se conectan en horas punta, cuando las tensiones son más bajas.

En la red de transporte, se encuentran repartidos con el fin de minimizar las pérdidas y las diferencias de tensión. En las líneas de distribución, se usan para compensar el factor de potencia de las cargas y para controlar el perfil de tensiones.

Esta energía reactiva debe ser controlada ya que pueden provocarse grandes sobretensiones en las terminales de los equipos conectados al sistema de potencia. Los reactores en derivación de potencia absorben esta energía reactiva y por lo tanto regulan el voltaje del sistema. Los reactores de potencia acorazados tienen un núcleo de aire en aceite aislante.

Externamente es idéntico a un transformador, pero internamente cuenta sólo con un devanado. Este tipo de reactores tienen una mejor característica de impedancia lineal, esto significa una corriente más senoidal derivada durante las condiciones de sobre voltaje. La figura 10b, muestra la imagen de algunos reactores.

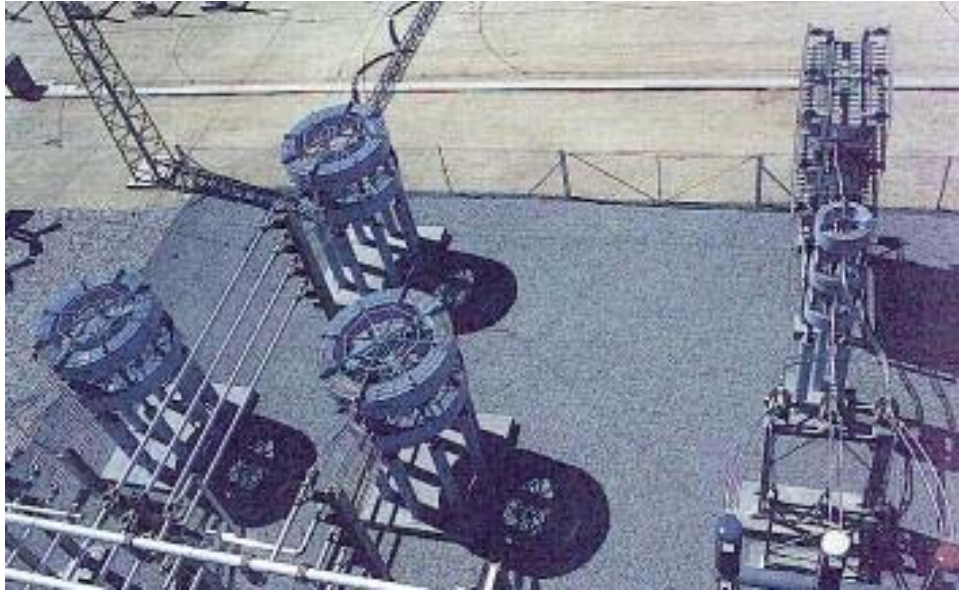


Figura 10b. Reactores

### **Clasificación.**

El reactor está clasificado en un número de categorías de acuerdo a las siguientes formas:

1. Agente de estructura y refrigeración. Reactor en aire tipo seco, reactor con centro de hierro, reactor inmerso en aceite, etc.
2. Modo de conexión. Reactor en derivación y reactor en serie
3. Función. Reactor limitador de corriente y reactor de compensación.
4. Subdivisión por uso específico. Reactor de línea, reactor de salida, reactor a tierra y más.

## **Función.**

El reactor tipo seco normalmente usado en sistemas de potencia incluye reactores en serie y reactores en derivación. El primero es principalmente adoptado para limitación de corriente de cortocircuitos, o prevención de armónicos altos en conexiones en serie o paralelas con un condensador en el filtro. El voltaje de operación puede ser regulado ajustando el número de reactores en derivación, que es regularmente usado para reactivar compensación y filtrado de potencia. El reactor en derivación con exceso de voltaje tiene muchas funciones en mejorar la energía reactiva en sistemas de potencia por ejemplo.

1. El reactor en derivación de exceso de voltaje reduce el tiempo corto de frecuencia de exceso de voltaje por medio de su efecto de capacidad mejorada en circuitos de cargas livianas.
2. El reactor tipo seco optimiza la distribución de voltaje en la línea de transmisión larga.
3. En circuitos de carga ligera, el reactor en derivación actúa para equilibrar la potencia reactiva para prevenir de un flujo no razonable, reduciendo pérdidas de energía en la línea.
4. Cuando hay una conexión paralela entre un set de máquina grande y el sistema de potencia, sirve para disminuir el voltaje de estado fijo de frecuencia para facilitar la operación paralela sincrónica de los generadores.
5. El inductor también puede evitar resonancia de auto-excitación.

## **2.4 Cambiadores de derivación.**

El cambiador de derivaciones suministra los medios de cambiar la relación de tensión de un transformador.

Se usa para obtener una relación de espiras ligeramente distintas, a modo de que se puedan hacer ajustes para compensar pequeñas diferencias de voltaje en el sistema.

Actualmente se usan una amplia variedad de cambiadores de derivación, operados de forma manual en los transformadores tipo distribución o bajo carga en los transformadores de potencia en los sistemas de transmisión. La figura 11b, muestra un cambiador de derivación.

Se refiere a un aparato para seleccionar una de una pluralidad de derivaciones de al menos dos transformadores.

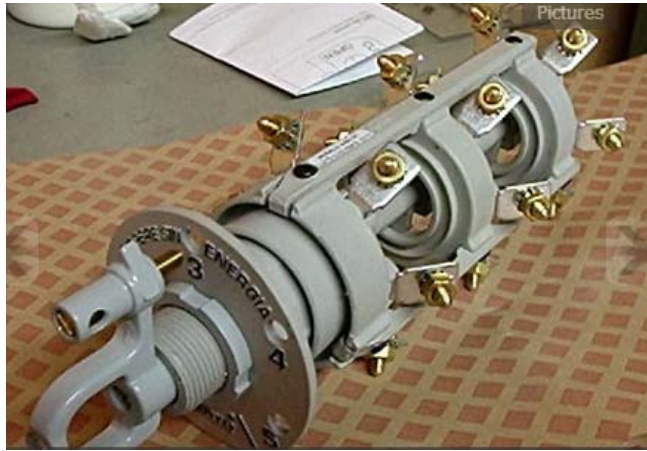


Figura 11b. Cambiador de derivación.

Dichas derivaciones del transformador son derivaciones de un devanado de cada uno de los transformadores.

Una de las derivaciones del transformador de cada uno de dichos transformadores es una derivación de partida del devanado y las derivaciones restantes son derivaciones seleccionables.

Consta de:

Una pluralidad de elementos de enchufe hembra.

Cada elemento de enchufe está asociado con el transformador.

Cada elemento de enchufe tiene una pluralidad de espigas que corresponden a la pluralidad de derivaciones.

Cada espiga de un elemento de enchufe respectivo se conecta operativamente a una derivación de transformador seleccionable predeterminada de un transformador correspondiente.

De manera que las derivaciones seleccionables correspondientes de los transformadores se conectan operativamente a una espiga diferente correspondiente para cada uno de los elementos de enchufe correspondientes.

Los transformadores usualmente son suministrados con un cambiador de derivaciones de alta tensión para operación externa, ubicado cerca de los aisladores de alta tensión.

Algunas unidades grandes tienen un cambiador de derivaciones de transformadores de fuerza con acción que requiere jalar un perno de cierre y dar una vuelta completa del mango para cada cambio de posición del cambiador de derivaciones. La figura 12b, muestra la parte frontal de un cambiador de derivación, donde se muestra el perno de cierre.



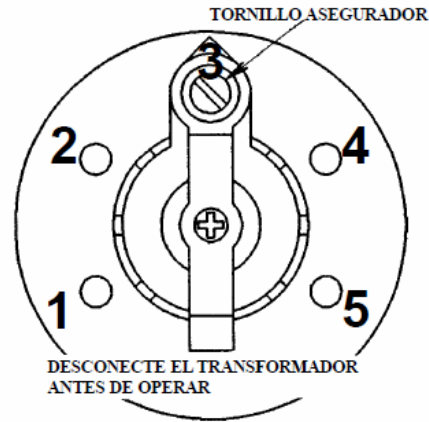


Figura 12b. Parte frontal de un cambiador de derivación.

El cambiador de derivación para operar sin tensión es un dispositivo que se acciona desde el exterior del transformador, sumergido en líquido refrigerante que permite seleccionar la derivación de un devanado cuando el transformador está desenergizado.

Se fabrican de dos tipos.

- Monofásicos.
- Trifásicos.

El cambio de derivaciones puede hacerse en vacío o bajo carga, siendo ésta última, la que permite la regulación automática. El cambio de derivaciones en vacío, exige la desconexión previa del transformador y su operación es siempre manual. El cambio de taps por el control remoto mediante algún mecanismo o motor eléctrico, se emplea para ajustar el voltaje en algunos procesos que permiten la interrupción de energía (transformador des-energizado) por algunos segundos, tales, como, hornos eléctricos y otros.

Desde hace algunos años se han desarrollado mecanismos y dispositivos que permiten hacer el cambio de derivaciones manual o automáticamente en un transformador sin necesidad de desenergizar el transformador y desconectar la carga, permitiendo así la regulación de voltaje en grandes bloques de potencias (desde algunos KVA hasta cientos de MVA y altas tensiones desde volts a cientos de KV), sin interrupción de la energía a la carga. El cambio de derivaciones bajo carga permite mantener un voltaje secundario constante con voltaje primario variable, controlar el voltaje secundario para carga variable, controlar el flujo de potencia reactiva entre dos ramas de una red en anillo cerrado, etc.

La regulación se hace por pasos, estando la magnitud de los pasos determinada por la calidad de la regulación necesaria. El mecanismo con que se hace el cambio de taps recibe el nombre de Cambiador de Derivaciones Bajo Carga (Load TapChanger).

La figura 13b, muestra el diagrama del cambiador de derivación donde se puede ver sus funciones de cambios.

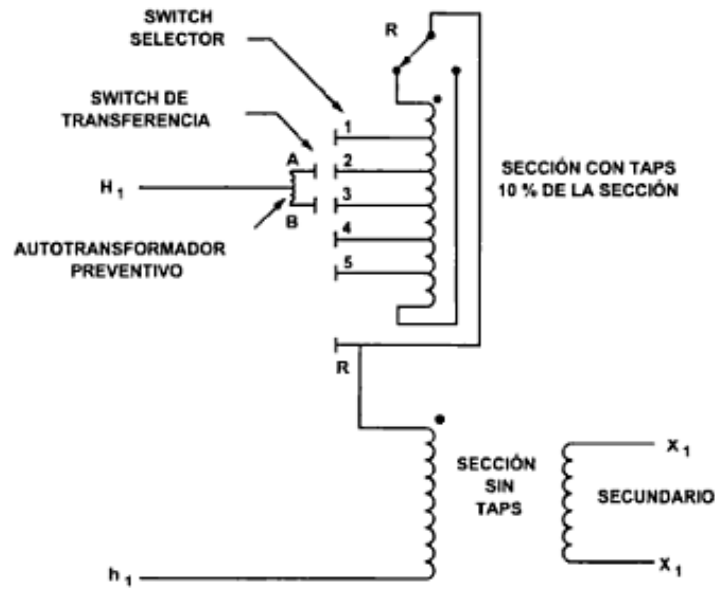


Figura 13b. Diagrama del cambiador de derivación.

La figura 14b, muestra la vista desde la parte superior y lateral del cambiador de derivación.

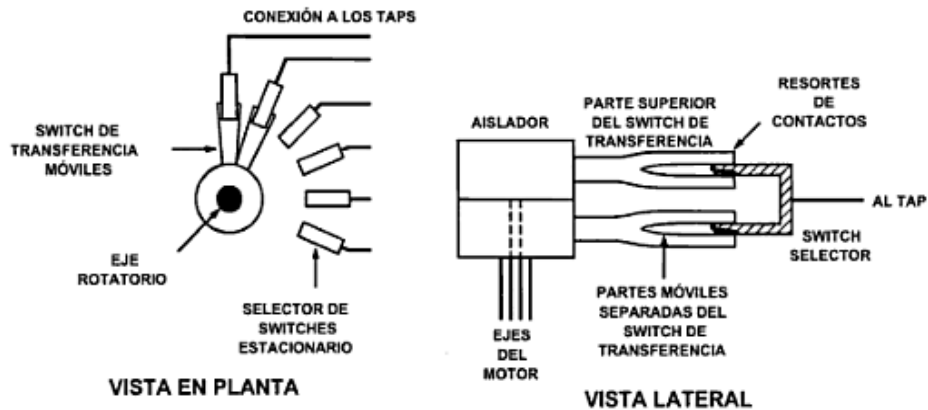


Figura 14b. Arreglo mecánico del mecanismo del cambiador de derivación.

La figura 15b, muestra el diagrama de funcionamiento del cambiador de derivación. En tanto en la figura 16b, se muestra el tipo de señal tipo sierra de voltaje obtenida al momento del cambio de derivación.

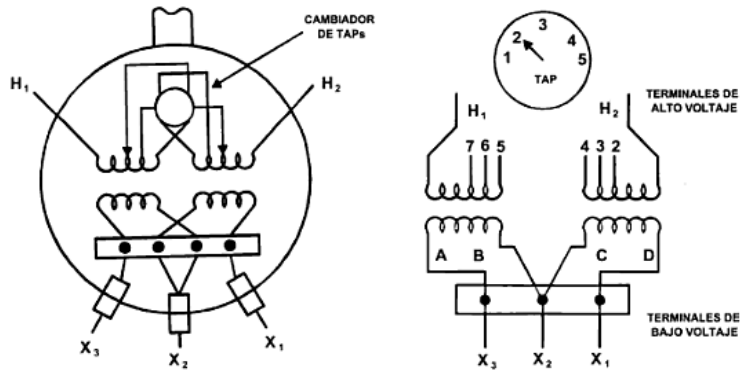


Figura 15b. Función del cambiador de derivación.

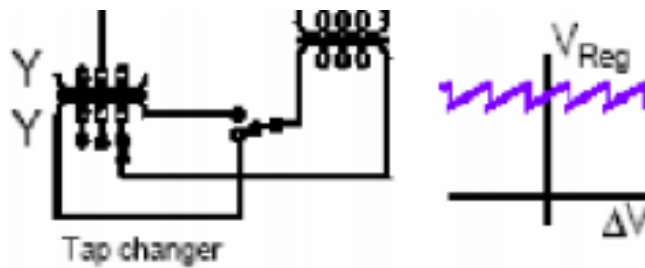


Figura 16b. Cambiadores de tap para regulación de voltaje.

Su funcionamiento se basa en ajustar el voltaje secundario al voltaje deseado, aumentando o eliminando vueltas en el devanado primario. Y va conectado generalmente a derivaciones o “taps” del devanado de alta tensión.

## 2.5 Condensadores síncronos.

Las Máquinas Síncronas están entre los tres tipos más comunes de máquinas eléctricas; se llaman así porque trabajan a velocidad constante y frecuencia constante en condiciones de operación estacionarias. Como la mayoría de las máquinas giratorias, una máquina síncrona es capaz de trabajar como motor o generadore incluso como reactor o como condensador.

Un condensador síncrono, también llamado compensador síncrono, es una máquina síncrona cuyo eje no está unido a ninguna carga. La corriente en su devanado de campo se controla a través de un regulador de tensión, de forma que la máquina genera o consume potencia reactiva según lo requiera el sistema al que está conectada. En la figura 17b, se muestra el diagrama de un generador síncrono.

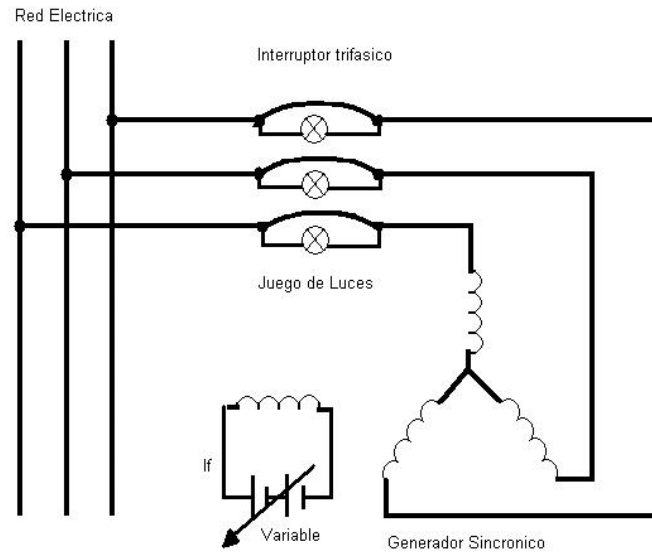


Figura 17b. Diagrama de un generador síncrono.

Es utilizada en la industria eléctrica como generador y se utiliza como motor a partir de potencias bastante elevadas.

Ofrece la posibilidad de controlar tanto la tensión de salida en sus bornes, así como la potencia activa entregada a la red.

Algunas de sus ventajas, en comparación con otros dispositivos de compensación, son las siguientes:

- Regula la tensión de forma continua, sin los transitorios electromagnéticos asociados a los cambios de tomas de otros tipos de dispositivos.
- No introduce armónicos en la red, ni se ve afectado por ellos.
- No causa problemas por resonancia eléctrica.

Otra característica particular de los compensadores síncronos es que en caso de caída de tensión por un fallo en la red son capaces de proporcionar corriente de cortocircuito durante un tiempo limitado, facilitando el ajuste de las protecciones de sobrecorriente.

La potencia de salida de un generador síncrono debe ser igual a la potencia mecánica de entrada, excluyendo todas las pérdidas. Debido a que las máquinas síncronas giran a una velocidad fija, la potencia de salida termina siendo una función directa del par aplicado al rotor de la misma. Controlando el caudal de entrada a la turbina, se controla entonces la potencia entregada a la red.

Esto permite idealmente el control de la potencia activa en un rango que va desde cero hasta el máximo permisible por la máquina.

No obstante, las máquinas síncronas presentan problemas de vibraciones que comprometen la vida útil de la misma, cuando la potencia de salida se encuentra debajo

de cierto valor. Esto hace que toda máquina síncrona tenga un mínimo de potencia a generar por debajo del cual no se debe operar y se estarán violando los límites operacionales, poniendo en juego la integridad de la máquina misma. Debido a ello el control de potencia activa se encuentra realmente en un rango que oscila entre los valores de máxima y mínima potencia que soporta la máquina en cuestión.

Las dos partes básicas de una máquina síncrona son la estructura del campo magnético, que lleva un devanado excitado por corriente continua y la armadura.

El devanado de corriente continua sobre la estructura giratoria del campo se conecta a una fuente externa por medio de anillos deslizantes y escobillas.

Algunas estructuras de campo no tienen escobillas, sino que tienen excitación sin escobillas por medio de diodos giratorios. En algunos aspectos, el estator que lleva los devanados de armadura es semejante al estator de un motor de inducción polifásico.

Las condiciones que se debe cumplir, para conectar una máquina síncrona, funcionando como generador, a la red, son las siguientes:

- la secuencia debe ser igual a la de la red.
- la magnitud de voltaje debe ser igual a la de la red.
- el desfase debe ser igual a la de la red.
- la frecuencia debe ser igual a la de la red.

Un motor síncrono carece de un par de arranque; para conseguir ponerlo en marcha por si mismo, se le añade un devanado en jaula de ardilla, denominado devanado amortiguador, ubicado en las expansiones polares del rotor.

### Funcionamiento del motor síncrono.

Esta fundamentado en la reversibilidad de un alternador. El campo interior de una espira se orienta de acuerdo a la polaridad que adopta en cada momento el campo giratorio la Figura 18b, muestra como se origina el campo giratorio cuando el devanado trifásico de armadura se alimenta con tres corrientes desfasadas  $120^\circ$  E. su velocidad es  $n_s$  (síncrona).

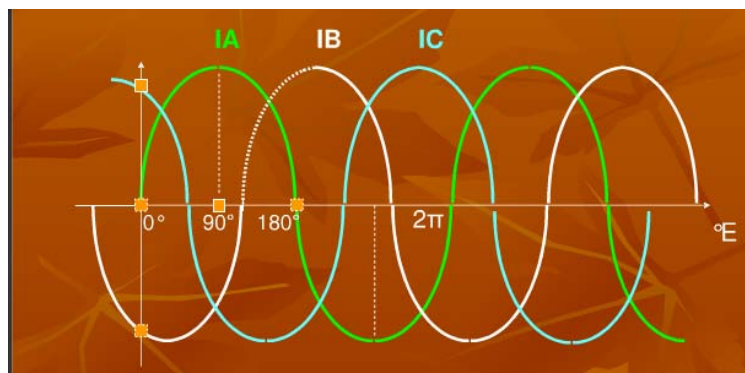


Figura 18b. Campo giratorio

La espira sigue cambiando con la misma velocidad con que lo hace el campo giratorio. La velocidad síncrona se obtiene con la ecuación 2b, siguiente.

$$N_s = 120 f / P$$

Ecuación 2b. Velocidad de sincronismo.

Se produce un perfecto sincronismo entre la velocidad de giro del campo y la de la espira, figura 19b.



Figura 19b. Acoplamiento de campo.

Si tomamos un estator de doce ranuras y lo alimentamos con corriente trifásica, se creará un campo giratorio. Si al mismo tiempo a las bobinas del rotor le aplicamos una cc, girará hasta llegar a sincronizarse con la velocidad del campo giratorio, de tal manera que se enfrentan simultáneamente polos de signos diferentes, este motor no puede girar a velocidades superiores a las de sincronismo, de tal forma que será un motor de velocidad constante.

La velocidad del campo y la del rotor, dependerán del número de pares de polos magnéticos que tenga la corriente. Un motor de doce ranuras producirá un solo par de polos y a una frecuencia de 60 Hz, girará a 3600 R.P.M.

Como se verá el principal inconveniente que presenta los motores síncronos, es que necesitan una cc. para la excitación de las bobinas del rotor, pero en grandes instalaciones, el avance de corriente que produce el motor síncrono compensa parcialmente el retraso que determinan los motores asíncronos, mejorando con ello el factor de potencia general de la instalación, es decir, el motor produce sobre la red el mismo efecto que un banco de condensadores, el mismo aprovechamiento de esta propiedad, es la mayor ventaja del motor síncrono.

La excitatriz es un generador de C.A con su inducción en el rotor. El Rotor de polos salientes es para baja velocidad y alta capacidad, en tanto el rotor cilíndrico para alta velocidad en alta y baja capacidad. Con sobreexcitación se opera con factor de potencia adelantado permitiendo mejorar el factor de potencia de la instalación de la cual forma parte.

## 2.6 FACTS

Son sistemas de transmisión de corriente alterna que tienen incorporados controladores basados en electrónica de potencia y otros controladores estáticos para mejorar su operación.

Los FACTS son utilizados para reducir costes y mejorar las líneas de distribución y transporte de energía eléctrica, además de tener una gran flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones de trabajo.

Los FACTS re-direccionan los flujos de potencia de manera tal que se mejora la utilización de la red de transmisión

Los FACTS hacen la red de transmisión "más corta"; esto mejora la estabilidad y reduce las pérdidas de energía.

### **Las aplicaciones básicas de los dispositivos FACTS son:**

- \* Control de flujo de potencia.
- \* Incremento de la capacidad de transmisión.
- \* Control de voltaje.
- \* Compensación de energía reactiva.
- \* Mejoras de estabilidad.
- \* Mejoras de calidad de potencia.
- \* Condicionamiento de potencia.
- \* Mitigación de flicker.
- \* Interconexión de generación renovable y distribuida.

### **Tipos de FACTS.**

- \* Compensador estático (SVC).
- \* Condensador en serie, fijo y controlado por tiristores (TCSC).
- \* Transformador de desplazamiento de fase (PST).
- \* Transformador de desplazamiento de fase asistido (APST).
- \* Compensador estático síncrono (STAT-COM).
- \* Compensador en serie estático síncrono (SSSC).
- \* Controlador unificado de flujo de energía (UPFC).
- \* Reactor controlado por tiristores (TCR).

Una de las más grandes ventajas de los FACTS es que mejoran la estabilidad del sistema lo que permite mayores niveles de transferencia de potencia a través de largas distancias.

### **Se clasifican de acuerdo a su conexión dentro del Sistema de Potencia.**

La figura 20b, muestran diferentes diagramas de conexión de los FACTS dentro de los sistemas de potencia.

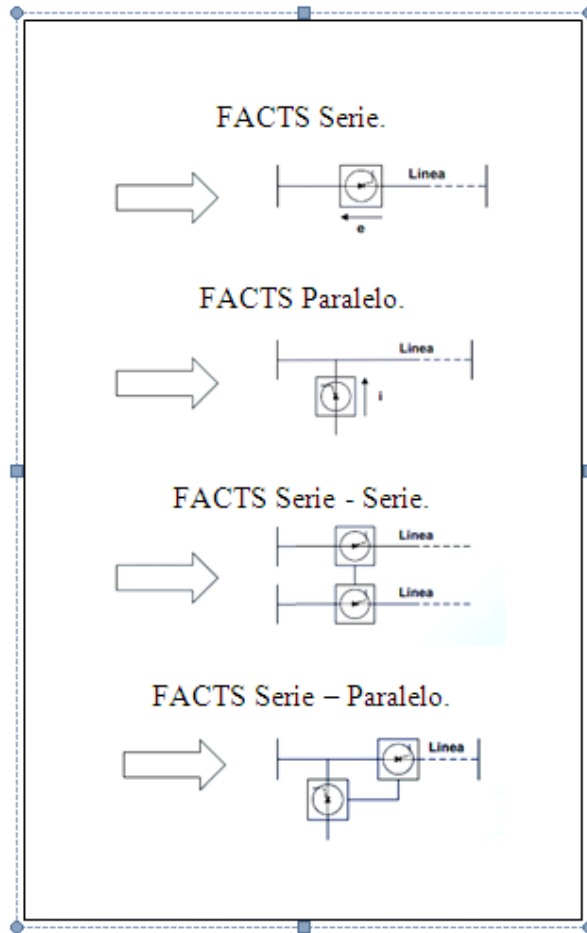


Figura 20b. Diferentes diagramas de conexión de los FACTS

**Se clasifican de acuerdo al parámetro de control.**

La tabla 2b, muestra la clasificación de los FACTS de acuerdo al parámetro de control.

Tipo	Parámetro Controlado	Sistema FACTS
A	Pserie y Q	UPFC
B	Pserie	TCSC
C	Qshunt	SVC, STATCOM

Tabla 2b. Clasificación de los FACTS de acuerdo al parámetro de control.

**Se clasifican por el tipo de tecnología utilizada.**

Las figura 21b, muestra el diagrama y foto aérea de aplicación de los tiristores de 1ª generación.



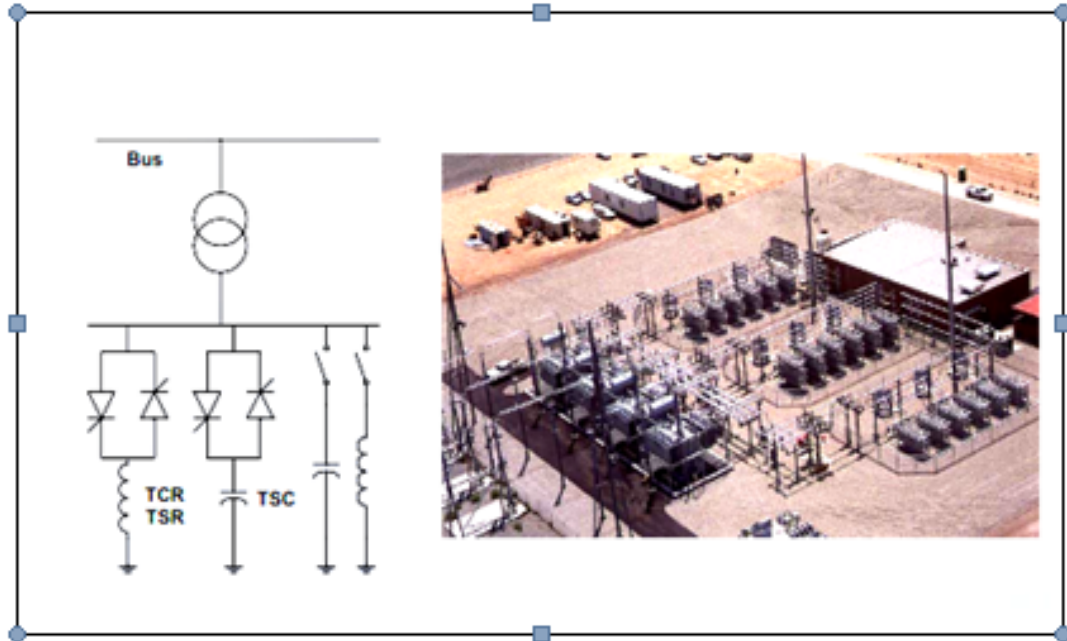


Figura 21b. Diagrama y foto aérea de aplicación de los tiristores de 1ª generación.

En la figura 22b, se muestra el diagrama y foto de la aplicación de FACTS basado en convertidor de fuente de Voltaje.



Figura 22b. Diagrama y foto de la aplicación basada en convertidor de fuente de Voltaje VSC.

### Síntesis de la clasificación de los FACTS.

La tabla 3b, muestra una síntesis de los FACTS respecto a su tipo de conexión y generación, de los más comunes.

NOMBRE	CONEXIÓN	GENERACIÓN
Compensador serie estático sincrónico (SSSC)	SERIE	2 <sup>3</sup>
Controlador de flujo de potencia interlínea (IPFC)	SERIE	2 <sup>3</sup>
Condensador serie controlado por tiristores (TCSC)	SERIE	1 <sup>3</sup>
Compensador estático de reactivos (SVC)	PARALELO	1 <sup>3</sup>
Compensador estático sincrónico (STATCOM)	PARALELO	2 <sup>3</sup>
Controlador unificado de flujos de potencia (UPFC)	SERIE - PARALELO	2 <sup>3</sup>

Tabla 3b. Síntesis de los FACTS más comunes.

**FACTS Serie.**

A continuación se muestra diferentes diagramas de FACTS serie.

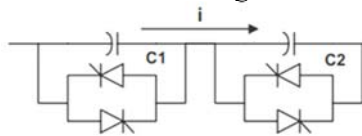


Figura 23b. Diagrama de Capacitor Serie Suicheado por Tiristor TSSC.

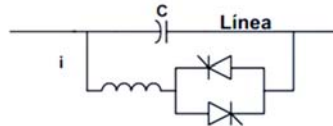


Figura 24b. Diagrama de Capacitor Serie Controlado por Tiristor TCSC.

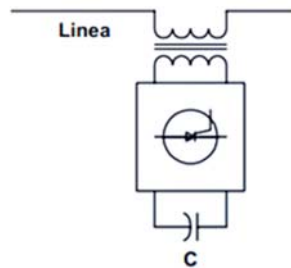


Figura 25b. Diagrama de Compensador Estático Sincrónico Serie SSSC.

**FACTS Paralelo.**

De igual forma se muestran diferentes diagramas FACTS en paralelo.

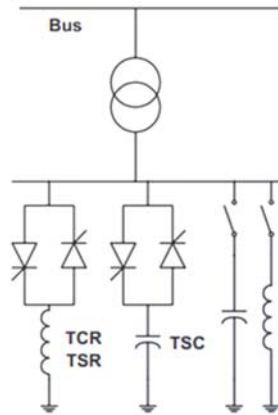


Figura 26b. Diagrama de Compensador Estático de Vares SVC.

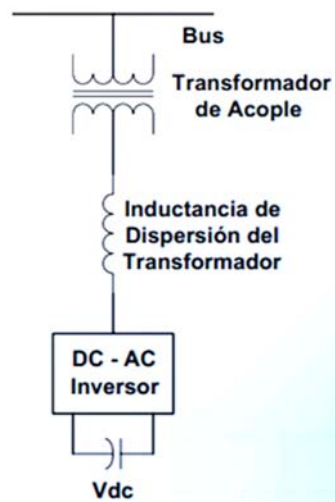


Figura 27b. Diagrama de Compensador Estático Sincrónico STATCOM.

**FACTS Serie-Paralelo.**

Otra forma de conexión con el sistema de potencia es la de los FACTS serie-paralelo. A continuación se muestra el diagrama de este tipo de conexión, figura 28b.

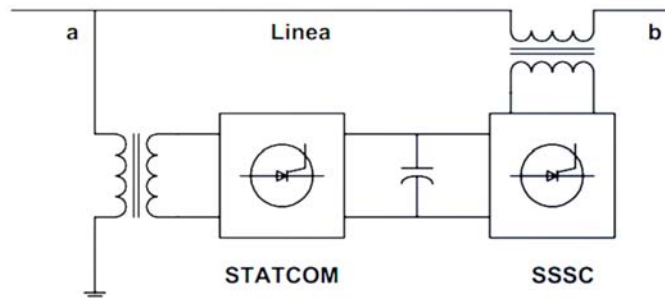


Figura 28b Diagrama de Controlador de Flujo de Potencia Unificado UPFC.

## FACTS Serie-serie.

Y por ultimo tenemos la conexión con el sistema de FACTS serie- serie a continuación se muestra un diagrama de este tipo de conexión, figura 29b.

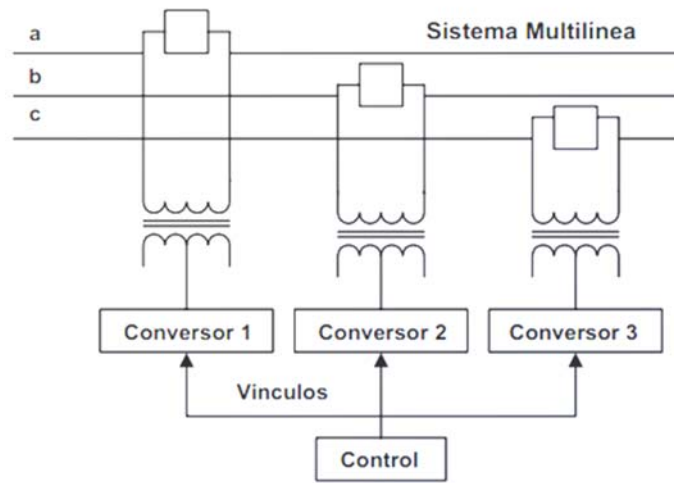


Figura 29b. Diagrama de Controlador de Flujo de Potencia Interlínea IPFC.

## Problemas y soluciones en relación con algunos dispositivos FACTS.

A continuación se muestra algunos problemas en los sistemas de generación y potencia y soluciones con diferentes dispositivos.

### Caso 1. Límites de tensión.

#### Problema 1. Baja tensión con demanda alta.

La acción correctiva es el de generar potencia reactiva, para esto se tiene que buscar una solución convencional.

Solución convencional, sería la instalación de condensadores en paralelo o en serie.

Los dispositivos FACTS para estos casos sería SVC, por que es un compensador estático de reactivos y su conexión es en paralelo en relación con el sistema y maneja transistores de primera generación, el TCSC, por que se trata de un condensador y es lo que realmente se necesita para elevar el voltaje y su conexión es en serie con el sistema y por ultimo el STATCOM, por que de igual manera se trata de un compensador estático síncrono, en conexión en paralelo con el sistema solo que los transistores son de segunda generación.

#### Problema 2. Alta tensión con demanda baja.

La acción correctiva es la de suspender generación de potencia reactiva, y en su caso absorber potencia reactiva.

La solución convencional, sería la de conectar una línea de extra alto voltaje (EHV) para no provocar calentamiento en conductores de menor calibre o un condensador en paralelo, el propósito de este, es almacenar esos voltajes tan altos, para que a su vez sea distribuida a los componentes con baja demanda.

Los dispositivos FACTS para estos casos sería SVC, TCSC, STATCOM. Por las características que representan con respecto a la tabla 3b, la cual se empleara para tener una idea de cual sistema es el más adecuado a emplear para las soluciones siguientes.

### **Problema 3. Alta tensión posterior a un paro.**

La acción correctiva es la de absorber potencia reactiva y proteger los equipos. La solución convencional es la de agregar un reactor en paralelo (SVC, STATCOM), agregar un descargador (SVC). Esto por que ambos presentan la característica de estabilizar el voltaje.

### **Problema 4. Baja tensión posterior a un paro.**

La acción correctiva es la de generar potencia reactiva, conectando un condensador en paralelo, un reactor o un condensador en serie, (SVC, STATCOM).

Otra acción correctiva es la de prevenir sobrecargas, esto se logra conectando reactor en serie o un regulador de ángulo de fase (PAR), (TCPAR, TCSC).

### **Problema 5. Baja tensión y sobrecarga.**

La acción correctiva, es la de generar potencia reactiva y limitar la sobrecarga. La solución convencional es la de combinación de dos o más dispositivos (TCSC, UPFC, STATCOM, SVC).

## **Caso 2. Límites térmicos.**

### **Problema 1. Sobrecarga de una línea o de un transformador.**

La acción correctiva es la de reducir la sobrecarga, la solución convencional es agregar una línea o un transformador, para este caso los dispositivos FACTS utilizados sería. (TCSC, UPFC, TCPAR). En el caso de agregar un reactor en serie (SVC, TCSC)

### **Problema 2. Falla de un circuito paralelo (una línea).**

La acción correctiva es la de limitar la carga del circuito (la línea), la solución convencional es agregar un reactor en serie o un condensador (UPFC, TCSC).

## **Caso 3. Oscilaciones de flujo.**

### **Problema 1. Desviación de carga a una línea en paralelo.**

La acción correctiva ajustar la reactancia serie, por medio de una solución convencional, la cual es agregar un condensador/reactor en serie (UPFC, TCSC).

### **Problema 2. Distribución post-falla.**

La acción correctiva es reorganizar la red o tomar acciones de límites térmicos. La solución convencional es agregar un PAR o un condensador/reactor en serie, (TCSC, UPFC, SVC, TCPAR).

### **Problema 3. Flujo inverso.**

La acción correctiva es ajustar el ángulo de fase por medio de un PAR en este caso los dispositivos FACTS adecuados son (TCPAR y UPFC).

### **Caso 4. Niveles de corto circuito.**

#### **Problema 1. Excesiva corriente de falla en el corta circuito-circuito.**

La acción correctiva es limitar la corriente de cortocircuito, por medio de una solución convencional la cual es la de agregar un reactor en serie, (UPFC, TCSC), o una nueva corta-circuito.

Otra acción correctiva es la de reorganizar la red por medio de un nodo auxiliar.

### **Caso 5. Resonancia subsincrona.**

#### **Problema 1. Potencial daño en eje turbina/generador.**

La acción correctiva es mitigar las oscilaciones, por medio de una solución convencional en este caso una compensación en serie, (TCSC).

#### **Atributos de los FACTS.**

**STATCOM.** Control de voltaje, compensación de reactivos, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización del voltaje.

**Compensador Estático de reactivos (SVC, TCR, TCS, TRS).** Control de voltaje, compensación de reactivos, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización transitoria y dinámica, estabilización de voltaje.

**Compensador serie estático síncrono (SSSC).** Control de la corriente, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización transitoria y dinámica, limitación de la corriente de falla.

**Condensador serie controlado por tiristores (TCSC, TSSC).** Control de la corriente, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización transitoria y dinámica, limitación de la corriente de falla.

**Reactor serie controlado por tiristores (TCRS, TSSR).** Control de la corriente, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización transitoria y dinámica, limitación de la corriente de falla.

**Transformador intercambiador de fase controlado por tiristores (TCPST o TCPR).** Control de potencia activa, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización transitoria y dinámica, estabilización del voltaje.

**Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC).** Control de potencia activa y reactiva, control de voltaje, compensación de reactivos, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización transitoria y dinámica, estabilización del voltaje, limitación de la corriente de falla.

**Limitador de voltaje controlado por tiristores (TCVL)** limitación transitoria y dinámica del voltaje.

**Regulador de voltaje controlado por tiristores (TCVL)** control de potencia reactiva, control de voltaje, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización transitoria y dinámica, estabilización de voltaje.

**Controlador de flujo de potencia interlinea (IPFC)** Control de potencia reactiva, control de voltaje, amortiguamiento de las oscilaciones, estabilización del voltaje.

### 2.6.1 Compensador estático de VARS (SVC) Static Var Compensator.

Un SVC está conformado por un banco de capacitores fijo y un banco de reactores suicheables, en paralelo. La figura 30b, muestra el esquema de un SVC.

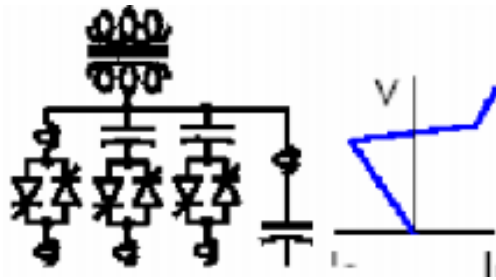


Figura 30b. Compensador Estático de Vars SVC.

Los componentes más característicos de un SVC son los condensadores conmutados por tiristores (TSC) y las bobinas conmutadas (TSR) o controladas (TCR) por tiristores, ya que estos dispositivos son los que incluyen la electrónica de potencia. En la figura 31b, se muestra un esquema simplificado para un SVC donde se incluyen los elementos anteriormente mencionados.

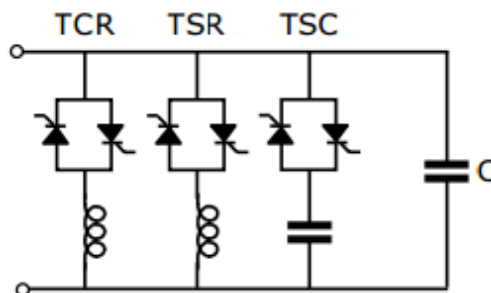


Figura 31b. Esquema simplificado para un SVC.

**TSC. (Condensador Conmutado por Tiristores).** Representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactiva.

Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un condensador o batería de condensadores.

**TCR. (Bobina Controlada por Tiristores).** La principal misión de este componente es la de conseguir una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por una bobina.

**TSR. (Bobina Conmutada por Tiristores).** Los tiristores se emplean como si fuesen un interruptor estático.

Estos compensadores pueden entregar (capacitivo) o absorber (inductivo) potencia reactiva de la red, permitiendo de esta forma:

- Regular el voltaje.
- Mejorar la estabilidad (estado estable y dinámica).
- Evitar sobre voltajes.
- Reducir flicker.

La utilidad o ventaja del SVC estriba en su capacidad para cambiar su capacitancia-inductancia a alta velocidad, haciendo uso de electrónica de potencia.

Los compensadores estáticos son dispositivos conectados en paralelo en la red eléctrica que a través de semiconductores controlados generan o absorben potencia reactiva.

El adjetivo estático hace referencia a que no poseen ninguna parte móvil, al contrario que los compensadores síncronos.

Desde el punto de vista de la operación del sistema eléctrico, un sistema de compensación estático consiste en un condensador y una bobina en paralelo, regulables, cuya capacidad e inductancia puede ajustarse para controlar la tensión y el intercambio de reactiva en sus terminales.

Un sistema de compensación estático ideal tendría una capacidad ilimitada de generar y absorber potencia reactiva, y sería capaz de mantener una tensión constante en sus terminales. Su característica tensión-corriente sería una línea recta horizontal, como la indicada en la figura 32b, además, no tendría pérdidas y respondería de forma instantánea.



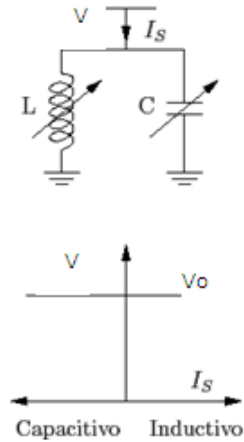


Figura 32b. Característica de un compensador estático ideal.

Al ser la bobina regulable, se puede elegir la pendiente de su característica, siempre que nos mantenga dentro de la zona limitada por la inductancia máxima y mínima. Esta pendiente se programa, a través del sistema de control, de forma que imponga una relación entre tensión y corriente representada por una línea recta con ligera pendiente ascendente, tal como indica la figura 33b.

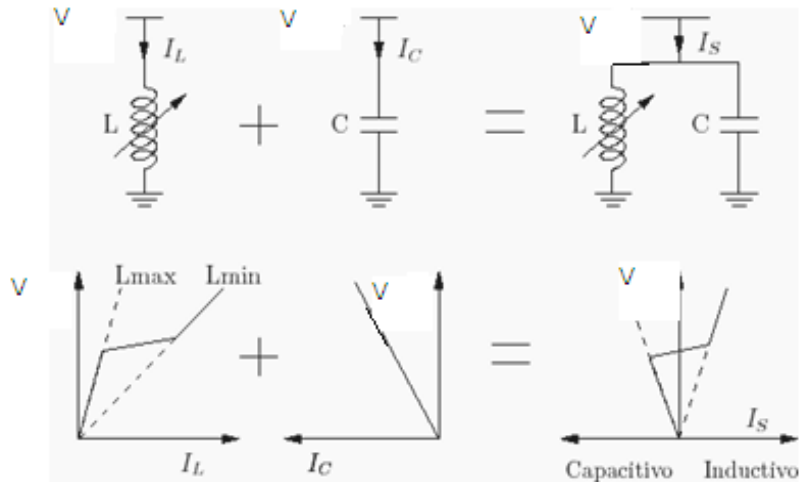


Figura 33b. Composición de la característica de un compensador estático.

La figura anterior, muestra, a la derecha, la característica tensión-corriente de ambos elementos conectados en paralelo. Dado que la corriente total  $I_S$  del sistema es la suma de las corrientes por la bobina y por el condensador, esta característica se obtiene fácilmente sumando ambas corrientes. El resultado es un elemento con tres zonas lineales, que puede operar en el semiplano inductivo y en el capacitivo, y con una ligera pendiente positiva en la zona central. Típicamente, la corriente nula corresponde aproximadamente a la tensión nominal del nudo de conexión.

Si la tensión en el nudo de conexión es superior a la nominal, el compensador estático absorbe potencia reactiva. Si la tensión es inferior, el compensador genera potencia reactiva. De esta forma, el compensador tiende a estabilizar la tensión, acercándola a su valor nominal.

Cuando es sometido a tensiones anormalmente bajas, el compensador opera en la zona capacitiva marcada por la recta que pasa por el origen, de forma que tan sólo es capaz de aportar poca corriente reactiva. En esta zona de operación la inductancia queda reducida al mínimo y el compensador estático se comporta como un condensador, de forma que el aporte de potencia reactiva es proporcional al cuadrado de la tensión. Esta es una característica importante de los SVCs, que limita su aporte de reactiva durante, por ejemplo, huecos profundos de tensión provocados por un cortocircuito.

### **Aplicaciones del SVC:**

Los compensadores estáticos comenzaron a ser utilizados en la década de los 70, y hoy en día se encuentran aplicaciones tanto en las redes de transporte como en las de distribución. Algunas de ellas son las siguientes.

En las redes de transporte:

- Control de sobretensiones temporales.
- Prevención del colapso de tensión.
- Mejora de la estabilidad transitoria.
- Atenuación de las oscilaciones electromecánicas en la red.

En las redes de distribución:

- Balance de sistemas desequilibrados.
- Reducción del efecto parpadeo (flicker) en las proximidades de hornos de arco u otras cargas variables.

Los SVC se instalan para desempeñar las siguientes funciones:

- Estabilización de la tensión dinámica: aumento de la capacidad de transferencia de energía, reducción de la variación de tensión.
- Mejora de la estabilidad sincrónica: aumento de la estabilidad en régimen transitorio, mejor amortiguación del sistema de transmisión de energía eléctrica.
- Equilibrio dinámico de la carga.
- Soporte de la tensión en régimen permanente.

Habitualmente, los SVC se dimensionan de modo que puedan variar la tensión del sistema  $\pm 5\%$  como mínimo. Esto significa que, normalmente, la gama de funcionamiento dinámico está entre el 10 % y el 20 % aproximadamente de la potencia de cortocircuito.

### 2.6.2 Condensador en serie, fijo y controlado por tiristores (TCSC).

El uso de capacitores en serie en líneas de transmisión de grandes longitudes físicas incrementa la capacidad de transmitir potencia. El TCSC provee un control activo en el flujo de potencia con un retardo muy pequeño, mejorando la estabilidad del circuito de transmisión. En la figura 34b, muestra la forma de la señal, y su diagrama.

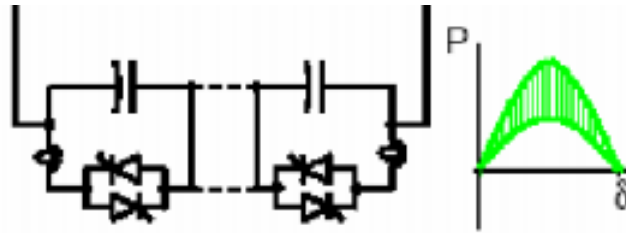


Figura 34b. Condensador en serie, fijo y controlado por tiristores (TCSC) diagrama y señal.

El TCSC básico está formado por un SVC conectado en serie con la línea de transmisión. En la figura 35b, se muestra el esquema básico del TCSC.

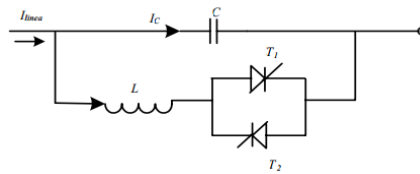


Figura 35b. Esquema básico del TCSC.

De acuerdo al ángulo de conducción, el TCSC tiene los siguientes modos de operación. Figura 36b, en donde se muestra diferentes formas de operación para el TCSC.

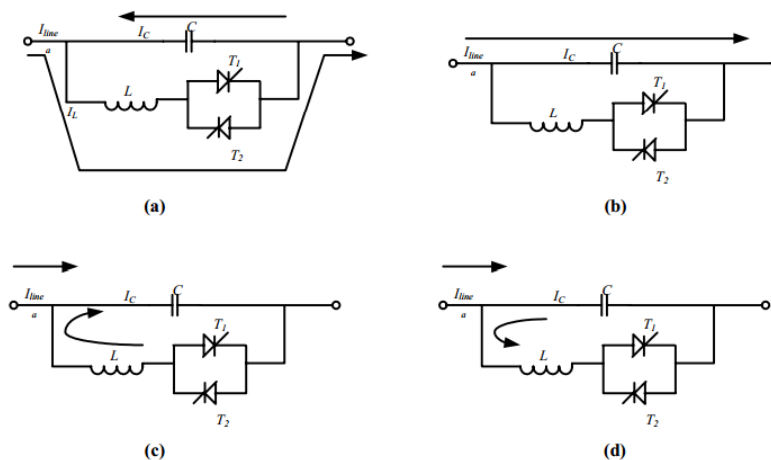


Figura 36b. Diferentes formas de operación para el TCSC. (a) Modo bypassed (b) Modo bloqueado (c) Conducción parcial (capacitivo) (d) Conducción parcial (inductivo).

**a) Modo tiristor pasa todo (Bypassed) .**

En este modo los tiristores se encuentran en una conducción total, con un ángulo de conducción de  $180^\circ$ , los pulsos de compuertas son aplicados lo más rápido posible después de que el voltaje a través del tiristor es cero y se vuelve positivo, resultando en una corriente continua senoidal a través de los tiristores.

El comportamiento del TCSC es el de un capacitor-inductor en paralelo.

La corriente a través del módulo es inductiva, por el motivo que la susceptancia del inductor es mayor a la del capacitor.

**b) Modo tiristor bloqueado (Blocked).**

Los pulsos de disparo en el tiristor están bloqueados. El dispositivo TCSC es entonces reducido a un capacitor serie y la reactancia total por supuesto que es capacitiva.

**c) Conducción parcial del tiristor modo capacitivo.**

El comportamiento del TCSC tiene una reactancia capacitiva y una inductiva controladas por el ángulo de conducción. En el modo capacitivo, los tiristores son disparados cuando el voltaje y la corriente del capacitor tienen polaridad opuesta.

**d) Conducción parcial del tiristor modo inductivo.**

La última variante es el modo inductivo, en el cual el TCSC puede operar con conducción alta en los tiristores. En este modo la dirección de la corriente circulante es revertida y el control presenta una impedancia inductiva.

**2.6.3 Transformador de desplazamiento de fase (PST) (phaseshifting).**

Los transformadores de regulación del ángulo de fase (desplazamiento de fase) se utilizan para controlar el flujo de energía eléctrica a lo largo de las líneas de transmisión.

Tanto la magnitud como la dirección del flujo de energía pueden ser controladas variando el desplazamiento de fase mediante el transformador en serie.

El transformador de desplazamiento de fase (PST) es un dispositivo para controlar el flujo de energía a través de líneas específicas en una red de transmisión de potencia compleja.

La función básica de un transformador de desplazamiento de fase es cambiar el desfase entre la tensión eficaz de entrada y la tensión de salida de una línea de transmisión, controlando así la cantidad de potencia activa que puede fluir en la línea.

Esto es para evitar que en un determinado momento se pueda sobrecargar la línea del sistema que tiene menor impedancia que está conectada en paralelo.

En la figura 37b, se muestra la señal obtenida y el diagrama del transformador de desplazamiento de fase (PST).

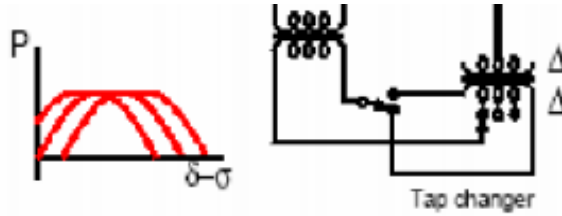


Figura 37b. Señal y diagrama del transformador de desplazamiento de fase (PST).

El PST lo que hace es agregar un ángulo al ya existente para cambiar el ángulo total y así que halla ahora un desfase. Este ángulo puede ser controlado con ciertos límites.

De esta manera se logra controlar la potencia que fluye en la línea por medio del transformador de cambio de fase.

Los PST tienen diferentes formas y pueden ser clasificados por esas características:

- 1) PST asimétrico directo.
- 2) PST simétrico directo.
- 3) PST asimétrico indirecto.
- 4) PST simétrico indirecto.

### Principio de funcionamiento.

El desplazamiento de fase se consigue extrayendo una tensión línea-tierra de una de las fases e inyectando una parte de ella en serie con otra fase. Esto se lleva a cabo utilizando dos transformadores: el transformador regulador o magnetizante, en derivación, y el transformador en serie.

Las conexiones usadas, estrella-estrella y estrella-triángulo, hacen que la tensión en serie inyectada esté en cuadratura de fase con la tensión entre la línea y tierra.

Una parte de la tensión de la línea es seleccionada por la red de conmutación e introducida en serie con la tensión de línea. La tensión añadida está en cuadratura de fase con la tensión de la línea ya que, por ejemplo, la tensión añadida en la fase «a» es proporcional a  $V_{bc}$ .

El ángulo de desplazamiento de la fase es ajustado normalmente por dispositivos de conmutación de tomas en carga (LTC). La tensión en serie puede ser variada por el LTC según incrementos determinados por las tomas del devanado de regulación.

### 2.6.4 Transformador de desplazamiento de fase asistido (APST).

Avances en el campo de la electrónica de alta potencia han hecho posible que los tiristores se utilicen en la red de conmutación.

La figura 38b, muestra la Topología de un transformador asistido de desplazamiento de fase (APST).

$\phi$  Desplazamiento de fase

L Inductancia en paralelo

$L_k$  Inductancia del PST

PST Transformador de desplazamiento de fase

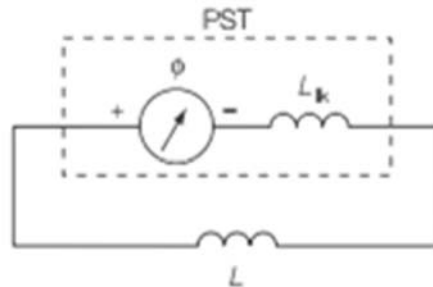


Figura 38b. Topología de un transformador asistido (APST) de desplazamiento de fase.

Este dispositivo puede utilizarse para aumentar la capacidad de transmisión, en condiciones normales y en diversas contingencias, de un PST ya existente o para establecer un PST equivalente de alta capacidad a un menor coste.

### 2.6.5 Reactor Controlado por Tiristores (TCR).

TCR (Reactor Controlado por Tiristores). Consiste de una combinación de reactores de seis o doce pulsos controlados por tiristores y un banco fijo de capacitores.

Los elementos básicos de un TCR son: un reactor en serie con un suiche de tiristores bidireccional, figura 39b.

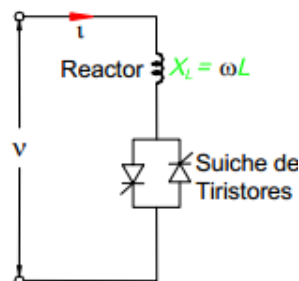


Figura 39b. Elementos básicos de un TCR.

### 2.6.6. Compensador estático síncrono (STAT-COM).

Conformado generalmente por una fuente de voltaje DC, convertidores auto-conmutables y un transformador de acople.

Se utiliza para producir un conjunto de salidas de voltaje multi-fásico ajustables que pueden ser acopladas a un sistema de potencia AC para los propósitos de intercambio de potencia activa y reactiva de modo controlable e independiente, permitiendo de esta forma:

- Regular el voltaje y el factor de potencia.
- Mejorar la estabilidad (estado estable y dinámica).
- Amortiguamiento de resonancia sub-sincrónicas.
- Compensación de flicker, desbalances y asimetrías.
- Filtrado activo de corrientes armónicas.

- Comparado con el SVC, provee características mejoradas de desempeño y de aplicabilidad uniforme para el control del voltaje de transmisión, impedancia y ángulo.

También presenta el potencial único de intercambio de potencia activa con el sistema AC.

La figura 40b, muestra el diagrama y el tipo de señal que genera un STATCOM.

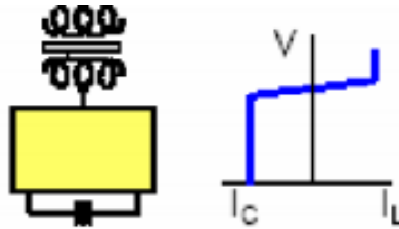


Figura 40b. Diagrama y señal que genera un STATCOM.

#### Operación en la red.

Si el almacenamiento de energía es de capacidad adecuada, el STATCOM puede intercambiar tanto potencia activa como reactiva con el sistema AC. La potencia activa intercambiada por el STATCOM en sus bornes de AC con el sistema AC debe ser suministrada o absorbida por sus bornes DC por medio del dispositivo de almacenamiento de energía. En contraste, la potencia reactiva intercambiada se genera internamente por el STATCOM, sin que el dispositivo de almacenamiento de energía tenga un rol fundamental.

#### Compensación reactiva.

Si el STATCOM se utiliza únicamente para compensación reactiva en derivación, como un SVC convencional, entonces el dispositivo de almacenamiento de energía DC se puede reemplazar por un condensador de DC relativamente pequeño.

### Modos de operación.

La figura 41b, muestra tres formas de operación, la primera sin carga, la segunda con una carga capacitiva y la última con una carga inductiva, nos muestra la forma de onda de cada una de ellas respectivamente y la forma de la señal de voltaje de fase.

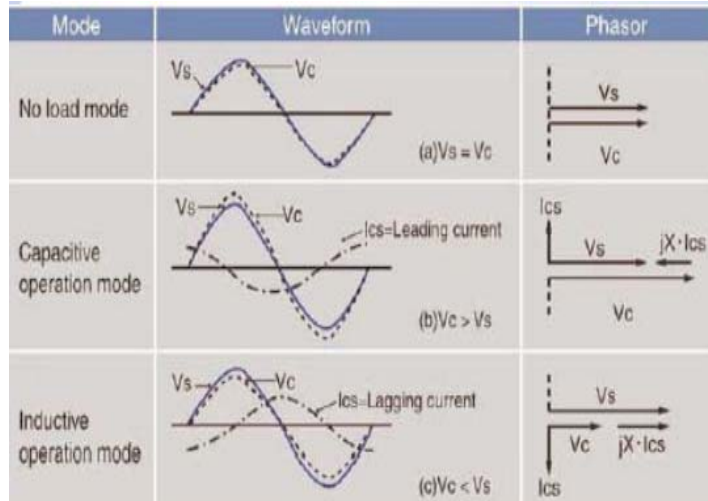


Figura 41b. Modos de operación del STATCOM.

### 2.6.7. Controlador unificado de flujo de energía (UPFC).

La función principal de un UPFC es el control del flujo de potencia activa y reactiva. Se puede utilizar en estado estacionario o en estado dinámico para reaccionar ante una perturbación en la red. También es apropiado para llevar a cabo las siguientes funciones simultáneamente, aunque es necesario realizar un diseño apropiado del sistema de control para cada una de ellas:

- Mejoramiento de la estabilidad transitoria.
- Amortiguamiento de oscilaciones de potencia.
- Mejoramiento de la estabilidad de voltaje.

La figura 42b, muestra el diagrama esquemático de un UPFC.

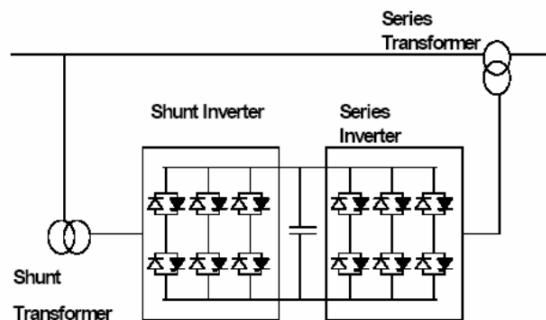


Figura 42b. Diagrama esquemático de un UPFC.



El control del sistema de potencia: Externo al UPFC. Comprende la ejecución de funciones requeridas en el nivel de la red de transmisión. Estas funciones pueden ser simples (control de potencia activa o de voltaje por medio de puntos de ajuste sencillo), o pueden ser funciones más complejas (control de estabilidad transitoria o amortiguamiento de oscilaciones utilizando diagramas de bloques de control más complejos).

El control del sistema convertidor: Interno al UPFC. Está diseñado para llevar a cabo las siguientes funciones:

- Encendido y apagado del UPFC.
- Protección de los convertidores.
- Balance de corrientes entre los convertidores.
- Generar el fasor de voltaje de la parte serie del UPFC.
- Control de secuencia negativa.
- Reducción de la corriente DC en el lado de AC.
- Control y regulación del voltaje del condensador DC.
- Limitación de la corriente del convertidor.
- Control voltaje DC para fines de balance (cuando hay múltiples niveles de convertidores).

#### Las Funciones del UPFC suelen ser.

- Regulación de voltaje.
- Compensación impedancia de línea.
- Regulación de ángulo de fase.
- Control simultaneo de voltaje, impedancia y ángulo.

#### 2.6.8 Compensador en serie sincrónico estático (SSSC).

Es un convertidor de fuente de tensión conectado en serie.

En principio, un SSSC es capaz de intercambiar potencia activa y reactiva con el sistema de transmisión de energía eléctrica. La figura 43b, muestra el diagrama y el tipo de señal del SSSC.

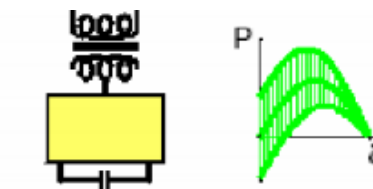


Figura 43b. Diagrama y señal del SSSC.

Sin embargo, si sólo se pretende compensar la potencia reactiva, la fuente de energía podría ser bastante pequeña. La tensión inyectada puede controlarse, en cuanto a magnitud y fase, si se dispone de una fuente de energía suficientemente grande. Con compensación de potencia reactiva sólo es controlable la magnitud de la tensión, puesto que el vector de la tensión inyectada es perpendicular a la intensidad de la línea. En este caso, la tensión inyectada en serie puede adelantar o retrasar 90 grados la intensidad de la línea.

Esto significa que el SSSC puede ser controlado uniformemente en cualquier valor, de adelanto o de retardo, dentro del intervalo de funcionamiento del VSC. Por consiguiente, un SSSC puede comportarse como un condensador en serie y una reactancia en serie controlables. La diferencia fundamental es que la tensión inyectada por un SSSC no está relacionada con la intensidad de la línea y puede ser controlada independientemente. Esta importante característica implica que el SSSC puede ser utilizado con excelentes resultados tanto con cargas bajas como con cargas altas.

### Aplicaciones.

La aplicación general de un condensador en serie controlable es también válida en el caso del SSSC: control dinámico del flujo de energía y mejora de la estabilidad de la tensión y del ángulo. El hecho de que un SSSC pueda inducir tensión capacitiva y tensión inductiva en una línea amplía el campo de operación del dispositivo. Para controlar el flujo de energía se puede utilizar un SSSC, tanto para aumentar como para reducir el flujo.

Dentro del intervalo de estabilidad ofrece más potencial para amortiguar oscilaciones electromecánicas.

Sin embargo, la inclusión de un transformador de alta tensión en el esquema da lugar a una desventaja de costes en comparación con los condensadores en serie controlables.

El transformador también reduce el rendimiento del SSSC, debido a que se introduce una reactancia adicional. Este defecto podrá ser eliminado en el futuro mediante la utilización de dispositivos SSSC sin transformador.

El esquema también exige un aparato de protección que ponga en derivación el SSSC en caso de que en la línea existan altas intensidades de fallo.

La figura 44b, muestra la configuración básica de un compensador en serie sincrónico estático (SSSC).

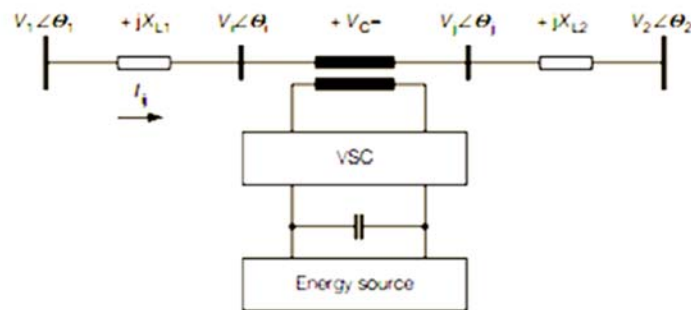


Figura 44b. Configuración básica de un compensador en serie sincrónico estático (SSSC).

Donde:

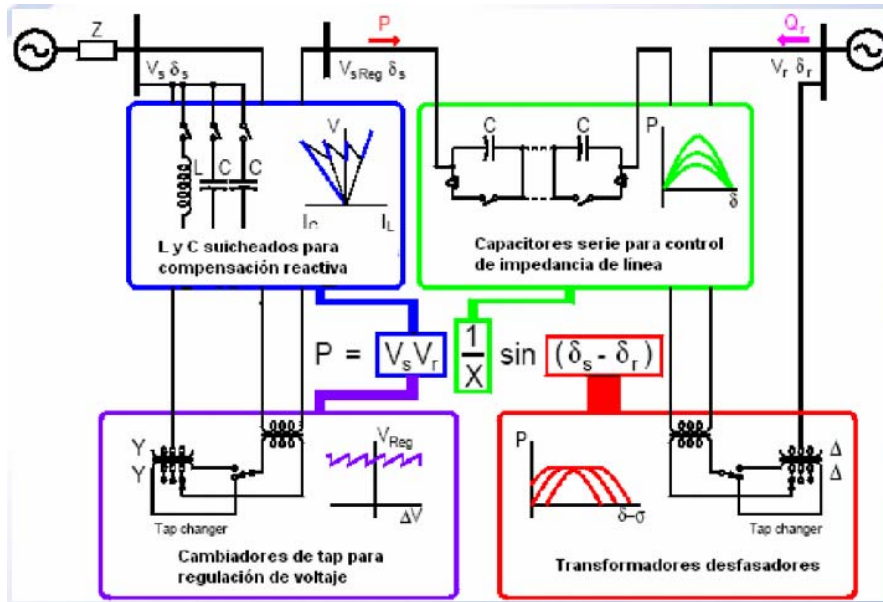
$I_i$  Intensidad entre barras  $i$  y  $j$

$V_{i,j}$  Magnitud de tensión, barras  $i$  y  $j$

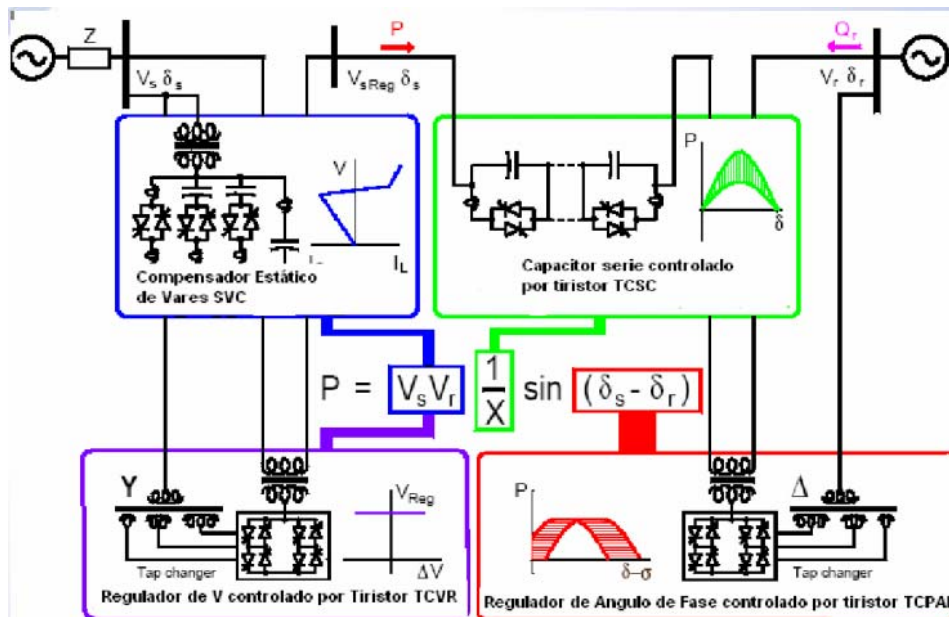
$\theta_{1,2}$  Ángulo de tensión, barras 1 y 2

$X_C$  Reactancia del condensador en serie  
 $\Theta_{i,j}$  Ángulo de tensión, barras i y j  
 $V_{1,2}$  Magnitud de la tensión, barras 1 y 2  
 $X_{L1,L2}$  Reactancias del segmento de la línea

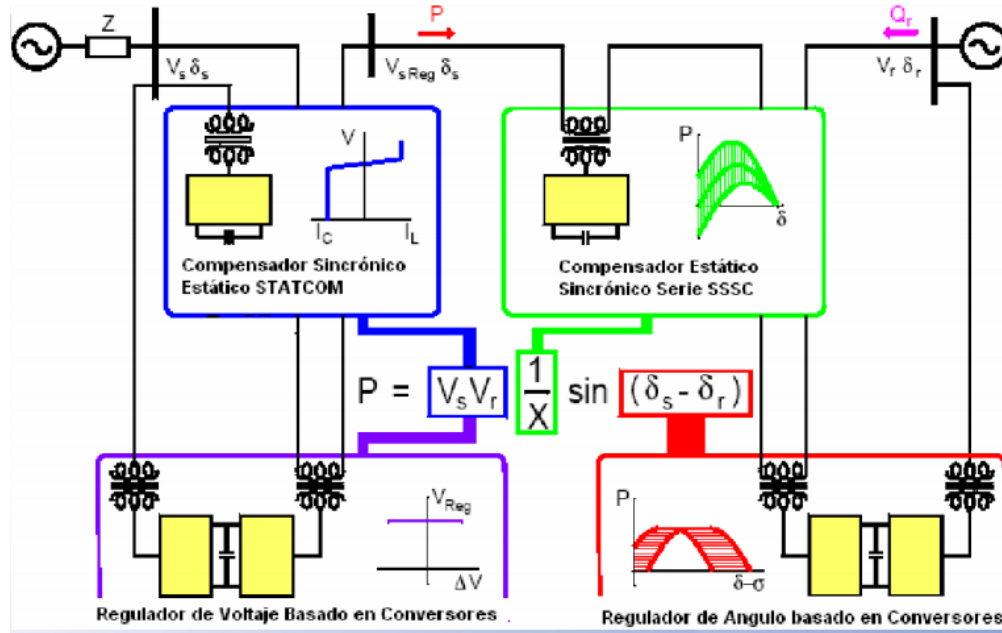
Las figuras 45 (a, b, c) muestra las diferentes etapas de evolución de los FACTS.



(a)



(b)



(c)

Figuras 57. Evolución de los FACTS (a, b, c)

### Capítulo 3. Compensadores estáticos de VARS (SVC).

#### 3.1 Principio de operación (TCR)

Cuando se aplica el control de fase sobre los tiristores, se consigue que vayan conduciendo alternativamente de forma que la intensidad resultante es una sucesión de transitorios sobre un conjunto RL.

Donde a partir de un instante definido por el ángulo de disparo  $\alpha$  se inicia la conducción de cada uno de los tiristores TR1 y TR2, figura 1c.

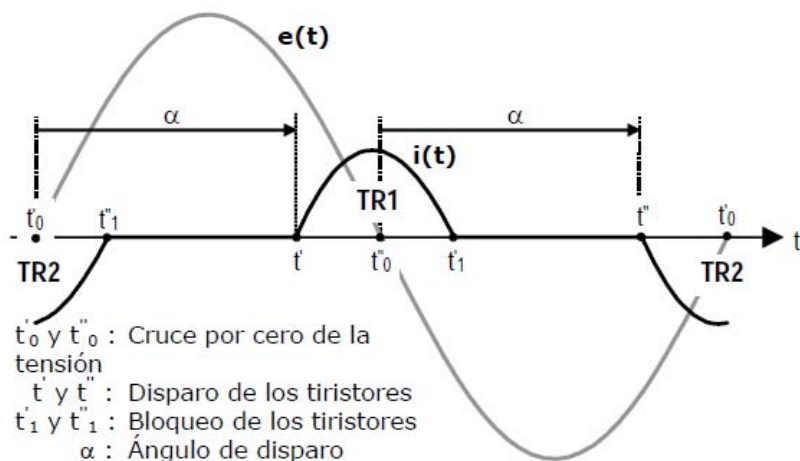


Figura 1c. Formas de onda de intensidad en un TCR.

El margen de control del compensador estático puede ampliarse mediante la conexión de condensadores conmutados, que se conectan y desconectan en función de la tensión, por medio de etapas. Un ejemplo de esto se ve La figura 2c, en donde se ilustra el circuito y su característica tensión-corriente.

La etapa 1 está constituida por la bobina regulable y un filtro capacitivo, y da origen a la característica marcada con el número 1.

La misión del filtro, además de aportar reactiva, es reducir el contenido de armónicos. Si la tensión desciende, se conectan sucesivamente las etapas 2 y 3, que desplazan la característica tensión-corriente hacia la zona capacitiva.

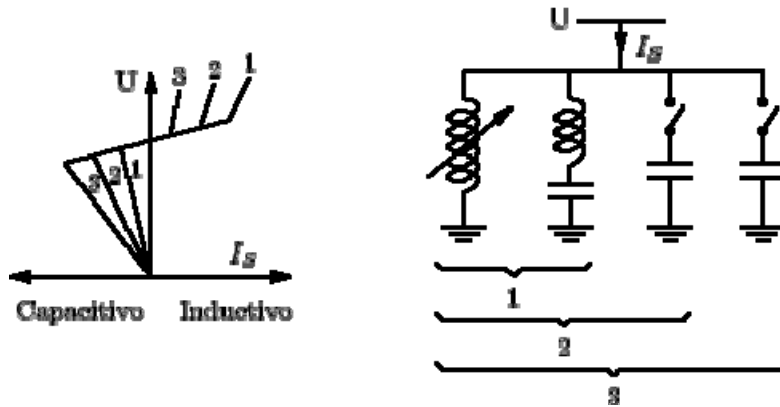


Figura 2c. Compensador estático con tres escalones de condensadores. Uso de capacitores suicheables para extender el rango continuo

El elemento central del sistema descrito de compensación estática, es la bobina regulable, con sus semiconductores y su correspondiente sistema de control.

La figura 3c, muestra el circuito eléctrico y el ciclo de conducción de una bobina controlada mediante dos tiristores.

Cada tiristor comienza a conducir cuando se encuentra polarizado en secuencia directa, y además recibe la orden de disparo a través de la puerta correspondiente.

El disparo es ordenado por el sistema de control en el instante determinado por el ángulo de disparo  $\alpha$  (alfa), que se mide a partir del paso por cero de la tensión en el tiristor. El ángulo  $\sigma$  (sigma) durante el cual un tiristor conduce se llama ángulo de conducción.

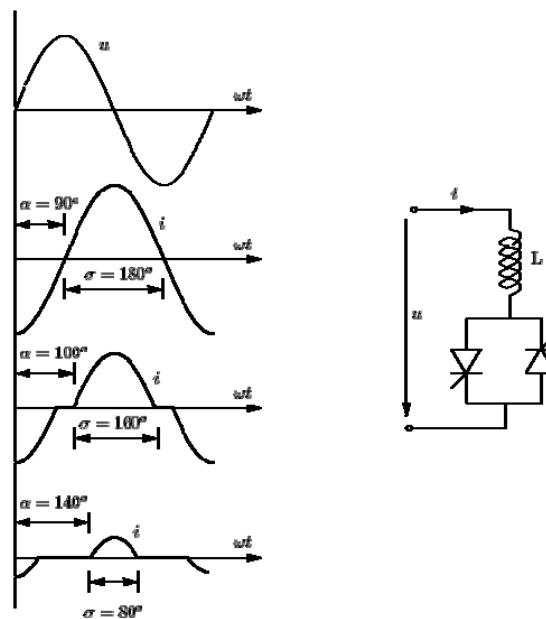


Figura 3c. Reactancia controlada mediante tiristores.

Como indica la figura 3c, un ángulo de disparo  $\alpha = 90^\circ$  corresponde a un ángulo de conducción  $\sigma = 180^\circ$  en cada tiristor, y por tanto la bobina conduce a lo largo de todo el ciclo. Este modo de funcionamiento equivale a tener la bobina permanentemente conectada.

Si aumenta el ángulo de disparo  $\alpha$ , disminuye el ángulo de conducción  $\sigma$ . La figura anterior muestra los ciclos de conducción para los ángulos de disparo  $\alpha = 100^\circ$  y  $\alpha = 140^\circ$ . Conforme aumenta  $\alpha$ , la corriente por la bobina es menor. Además la corriente se distorsiona y se aleja de la forma sinusoidal.

Aplicando el análisis de Fourier, es posible calcular el valor de la componente fundamental de 60 Hz de la corriente, en función del ángulo de disparo. Este análisis da como resultado la siguiente relación entre la susceptancia de la bobina controlada y el ángulo de disparo, ecuación 1c.

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L}$$

Ecuación 1c. Ángulo de disparo.

Donde  $I_1$  y  $V$  son los valores eficaces, y  $X_L$  la reactancia de la bobina a la frecuencia fundamental. Aplicando la ecuación podemos modificar la susceptancia de la bobina a voluntad, a través del ángulo de disparo  $\alpha$ .

El sistema de control ejecuta la característica tensión-corriente deseada, representada por el tramo con ligera pendiente positiva en las figuras de composición de la característica de un compensador estático y compensador estático con tres escalones de condensadores, a través de la elección del ángulo de disparo. Durante el funcionamiento del compensador, el sistema de control mide la tensión, y aplica en función de la misma el ángulo de disparo correspondiente. El método para diseñar el sistema de control puede ser el siguiente:

- 1.- Se elige un punto de la característica tensión-corriente deseada, al que llamaremos  $(V_X, I_X)$ .
- 2.- Se obtiene el valor de la susceptancia correspondiente.  $B_X = I_X / V_X$ .
- 3.- A través de la ecuación 1c, se obtiene el ángulo de disparo deseado.
- 4.- El proceso se repite en otros puntos, para construir la característica  $\alpha - V$  deseada.

Conforme aumenta el ángulo de disparo, la corriente se vuelve menos sinusoidal, o lo que es lo mismo, aumenta su contenido en armónicos. Si el disparo de los tiristores es simétrico, únicamente se crean armónicos de orden impar. Para reducir el contenido en armónicos se usan diversas configuraciones. Por ejemplo, si las tres fases del compensador estático se conectan en triángulo, los armónicos triples (3, 9...) circulan por dentro del triángulo y no se transmiten a la red. Usando un transformador con tres devanados, con el secundario conectado en triángulo y el terciario en estrella, es posible generar entre ambos un desfase de  $30^\circ$  que permite eliminar los armónicos de orden 5 y 7. De esta forma, los primeros armónicos inyectados son los de orden 11 y 13.

Para el estudio del comportamiento del TCR de la figura 1c, se supone un comportamiento ideal de los tiristores y que la tensión de alimentación es sinusoidal pura, esto es:

$$e(t) = 2E \sin \omega t \quad \text{Ecuación 2c}$$

En primer lugar se estudia los instantes de conexión de los tiristores. El tiristor de ciclos positivos, TR1, se activará en el instante  $t'$ , se calcula como:

$$t' = t'_0 + \alpha / \omega = \alpha / \omega \quad \text{Ecuación 3c}$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de disparo y  $t'_0$  es el instante de cruce por cero de la tensión con pendiente positiva. Análogamente, el tiristor para ciclos negativos, TR2, se activará en el instante  $t''$  cuya expresión es:

$$t'' = t''_0 + \alpha / \omega = (\pi + \alpha) / \omega \quad \text{Ecuación 4c}$$

Donde  $t''_0$  es el instante de cruce por cero de la tensión con pendiente negativa.

Los instantes de final de conducción de los tiristores (apagado, bloqueo), se producen en el cruce por cero de la intensidad, después de iniciada la conducción, ver  $t'_1$  y  $t''_1$  en la figura 1c.

Una vez definidos los instantes de conducción y apagado, la intensidad se puede definir según los siguientes intervalos:

Para los ciclos positivos,  $t' \leq t \leq t'_1$ , la intensidad se ajusta a la ecuación:

$$i(t) = K_1 e^{-a(t-t')} + \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{Ecuación 5c}$$

Para los ciclos negativos,  $t'' \leq t \leq t''_1$ , la intensidad se ajusta a la ecuación:

$$i(t) = K_2 e^{-a(t-t'')} + \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{Ecuación 6c}$$

Para los instantes no incluidos en los intervalos anteriores se tiene:

$$i(t) = 0 \quad \text{Ecuación 7c}$$

Donde:

- $I$  es el valor eficaz de la intensidad en régimen estacionario, es decir:

$$I = E / \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad \text{Ecuación 8c}$$

- $\varphi$  (phi) es el ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad en régimen estacionario:

$$\varphi = \arctan(\omega L / R) \quad \text{Ecuación 9c}$$



Generalmente  $\omega L \gg R$ , con lo que se puede afirmar que  $\varphi \approx \pi/2$  ( $90^\circ$ )

- $a$  es la atenuación y se define como:  $a = R/L$
- $K_1$  y  $K_2$  son constantes definidas a partir de las condiciones iniciales. Las constantes  $K_1$  y  $K_2$ , si se consideran las condiciones iniciales nulas de forma que,  $i(t') = 0$  e  $i(t'') = 0$ , resultan:

$$K_1 = -\sqrt{2I} \operatorname{sen}(\omega t' - \varphi) = -\sqrt{2I} \operatorname{sen}(\alpha - \varphi) \quad \text{Ecuación 10c}$$

$$K_2 = -\sqrt{2I} \operatorname{sen}(\omega t'' - \varphi) = -\sqrt{2I} \operatorname{sen}(\pi + \alpha - \varphi) \quad \text{Ecuación 11c}$$

De donde se puede deducir, debido a la igualdad supuesta para los ángulos de disparo de TR1 y TR2, que:

$$K = K_1 = -K_2 \quad \text{Ecuación 12c}$$

El ángulo de disparo  $\alpha$  tiene unos valores máximos y mínimo, tal y como se puede observar si se analiza el comportamiento del tiristor TR1:

- Si  $\alpha > \pi$ , entonces la orden de disparo se produce en el instante que la tensión es negativa, por lo tanto no hay conducción e  $i(t) = 0$
- Si  $0 < \alpha < \varphi$ , el apagado ( $i(t) < 0$ ) no se produce hasta que la tensión rebasa su valor mínimo  $-\sqrt{2}E$ , de forma que ya estaría disparado el tiristor de la otra rama TR2. En unos cuantos ciclos la intensidad sería la de régimen permanente,  $i(t) = i_e(t)$  figura 4c.

Según lo expuesto, los límites para el ángulo de disparo son:

$$\varphi \leq \alpha \leq \pi \quad \text{Ecuación 13c}$$

De forma que para  $\alpha \leq \varphi$  la intensidad es la de régimen permanente,  $i(t) = i_e(t)$ , y para  $\alpha \geq \pi$  la intensidad es nula  $i(t) = 0$ .

En la figura 4c y 5c se muestra la intensidad para un TCR con  $R = 1 \Omega$ ,  $L = 0,1 \text{ H}$ ,  $f_r = 60 \text{ Hz}$ ,  $E = 230 \text{ V}$  para  $\alpha = 45^\circ$  y para  $\alpha = 120^\circ$ , respectivamente.

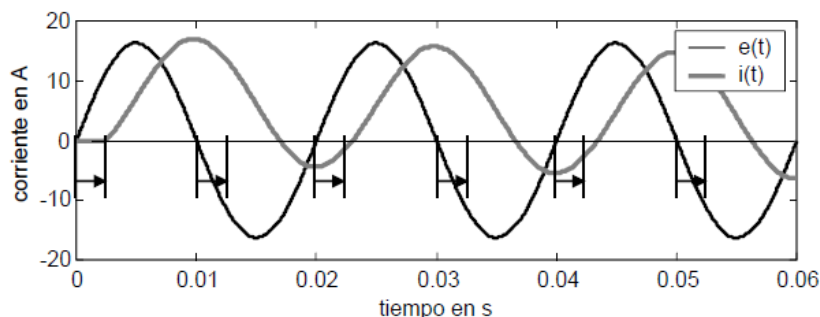
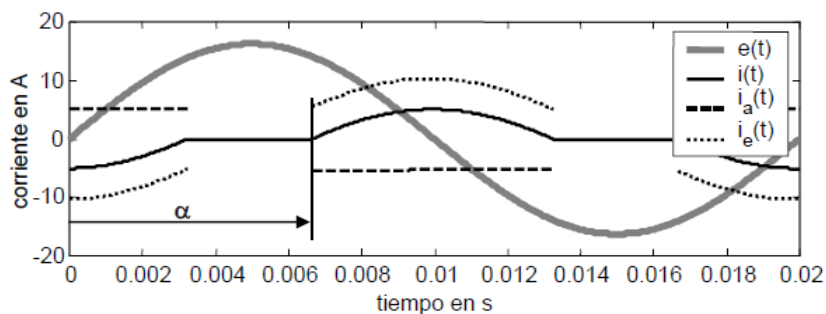


Figura 4c. Formas de onda de intensidad en un TCR para  $\alpha = 45^\circ$

Figura 5c. Formas de onda de intensidad en un TCR para  $\alpha = 120^\circ$ 

### 3.2 Tipos.

Los siguientes son diferentes tipos de SVC para los sistemas de control de energía reactiva.

#### 3.2.1 Reactor Saturado (Saturated Reactor -SR).

Este compensador fue el primero de los sistemas de compensación estática en ser desarrollado y aplicado con éxito en los sistemas de potencia. Se compone de un reactor saturado y de un banco de condensadores fijos, con el fin de evitar los efectos de resonancia; aunque genera muy pocos armónicos. No posee control, ya que es auto controlado.

El reactor saturado es esencialmente monofásico y está compuesto por elementos tanto en serie como en derivación. El elemento básico de un SR es un núcleo magnético, el cual para una magnetización ideal presenta las siguientes formas de onda de voltaje, flujo y corriente. Figura 6c.

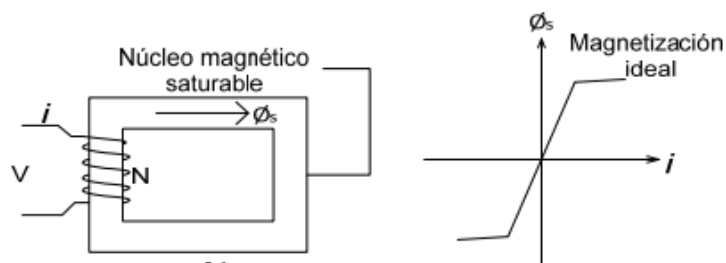


Figura 6c. Principios de un reactor saturado.

#### Componentes del Compensador de Reactor Saturado.

La figura 7c, muestra el diagrama y listados de los componentes del compensador de reactor saturado.

Este compensador se compone de:

1. Ls: Reactor saturado.
2. Cs: Condensador de corrección de pendiente.

3. R: Resistencia no lineal.
4. G: Gap.
5. C: Banco de condensadores fijos.

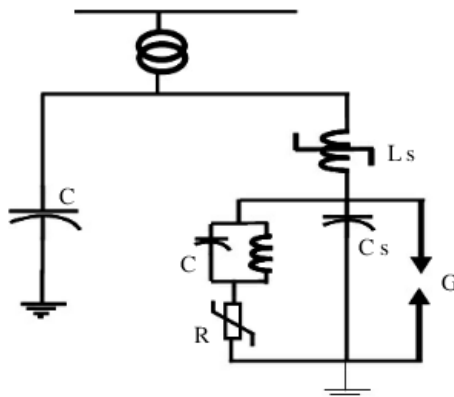


Figura 7c. Diagrama y listados de los componentes del compensador de reactor saturado.

La pendiente inherente del reactor saturado se corrige colocando un condensador en serie ( $C_s$ ) al cual se le colocan circuitos de amortiguamiento para evitar el riesgo de la resonancia subsincrónica. Este condensador cancela la reactancia del transformador de acoplamiento de forma tal que se obtenga una pendiente de hasta el 5% de la característica  $V$  vs.  $I$  del compensador.

El voltaje de referencia se define como el voltaje de saturación del reactor, pero puede variar dentro del rango de operación del cambiador de tomas del transformador de acoplamiento.

### Descripción de la técnica de compensación.

La técnica de compensación aplicada a los sistemas de potencia por medio del reactor saturado se debe a las corrientes que pasan a través de las bobinas exteriores las cuales dan lugar a un flujo magnético alterno que satura al núcleo, esto lleva a que los dominios magnéticos cambien de alineación  $180^\circ$  en cada alternancia.

La alineación, ocasiona que la inductancia de cada bobina este en su punto más alto. Esto lleva consigo la limitación de corriente suministrada a la carga.

La inductancia de las bobinas externas se disminuye variando la resistencia de control y por lo tanto pasa más corriente a la carga.

Esto tiene como resultado que el desplazamiento de fase decrezca, pues un mayor flujo de corriente resulta solo al disminuir la reactancia inductiva.

La bobina central posee normalmente un gran número de vueltas, de modo que solo una fracción de un amperio es suficiente para crear la saturación máxima del núcleo.

La manipulación de la bobina central, es por medio de un reóstato, esta bobina es alimentada por una fuente de corriente continua, en tanto las bobinas exteriores van conectadas en serie con la carga.

Un compensador de reactor saturado típico es descrito mediante la gráfica de la figura 8c, la reactancia efectiva correspondiente a la pendiente de saturación varía del 8 a 15% sobre el propio rango del SR, sin embargo, para una regulación de voltaje es necesario reducir esta pendiente de la reactancia efectiva de 3 a 5% y esto se logra proporcionando un buen diseño del reactor e instalando un capacitor en serie con el reactor.

Ocasionalmente, un capacitor con algún filtro asociado son instalados en serie con un transformador acoplado para equilibrar su reactancia efectiva y por consiguiente proporcionar un voltaje de regulación en el bus de alta tensión.

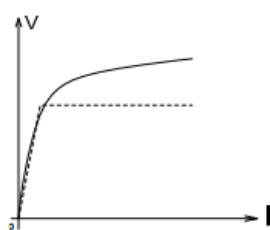


Figura 8c. Variación de V con I

La característica de salida V-I de un compensador de reactor saturado, se muestra en la figura 9c, la cual está determinada por los componentes que lo conforman, de tal manera que para variar el voltaje de referencia o el codo de la curva V-I se hace mediante el ajuste del “tap” del transformador acoplado.

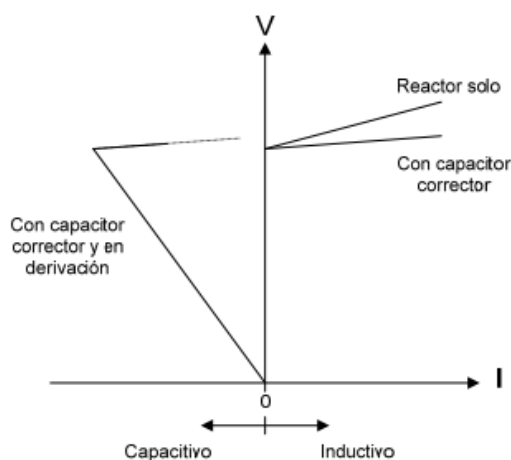


Figura 9c. Curva característica de un compensador SR

Debido a las características de operación del compensador SR, lo hace ser idóneo para aplicaciones en donde se requiere reducir sobre-voltaje temporal y también para estabilización de voltaje.

### 3.2.2 Reactor controlado por tiristores (Thyristor Controlled Reactor -TCR).

Consiste en un reactor paralelo cuya inductancia posee un valor fijo. Dicho elemento se encuentra en serie con un puente de tiristores que actúan a modo de interruptor bidireccional, figura 10c. El ángulo de disparo (que controla la activación de la conducción de los tiristores) permite modificar la impedancia del dispositivo, lo que permite controlar la corriente de compensación.

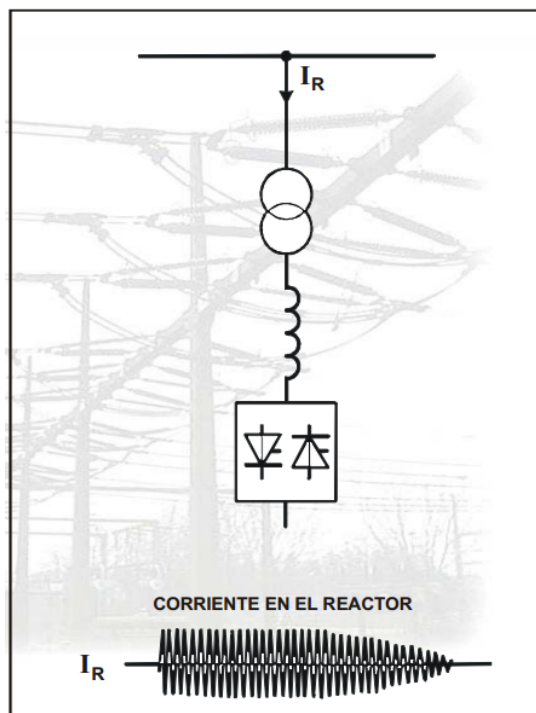


Figura 10c. Esquema básico del TCR

En la figura 11c, se muestra el ángulo de disparo de los dos pulsos del TCR, en donde el valor efectivo de la inductancia puede cambiar con la variación del ángulo de disparo en los tiristores. Al igual se muestra la variación de la componente fundamental de la corriente en función del ángulo de disparo. Considerando que el voltaje en los terminales del TCR es constante, la variación de la corriente se puede interpretar como una variación de la reactancia y por lo tanto como una variación de la inductancia efectiva del reactor.

Debido a la carga no lineal que representa el TCR para el sistema, se generan armónicos de corrientes que se requieren filtrar.

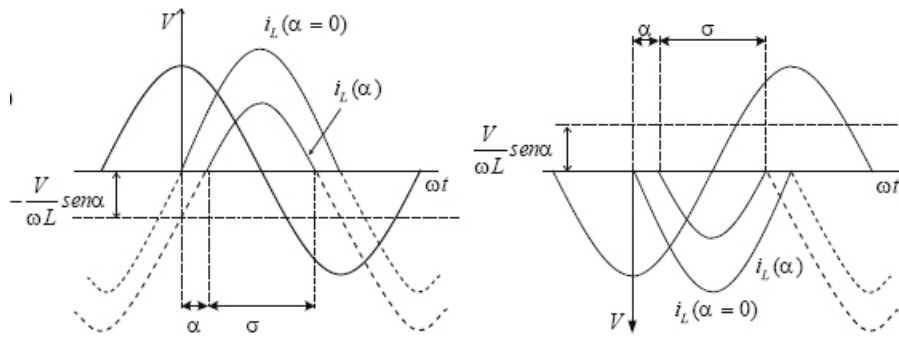


Figura 11c. Control del ángulo de disparo.

En la figura 12c, se muestra el efecto que resulta al incrementar el ángulo de disparo  $\alpha$  (alfa), que equivale a disminuir  $\sigma$  (sigma) lo cual es reducir la componente fundamental  $I_1$ . Esto equivale a incrementar la inductancia efectiva del reactor.

De acuerdo a lo anterior, y debido a que la única componente de interés es la fundamental  $i_L$ , el TCR, se convierte en una susceptancia controlable. La susceptancia efectiva es función del ángulo de disparo  $\alpha$ .

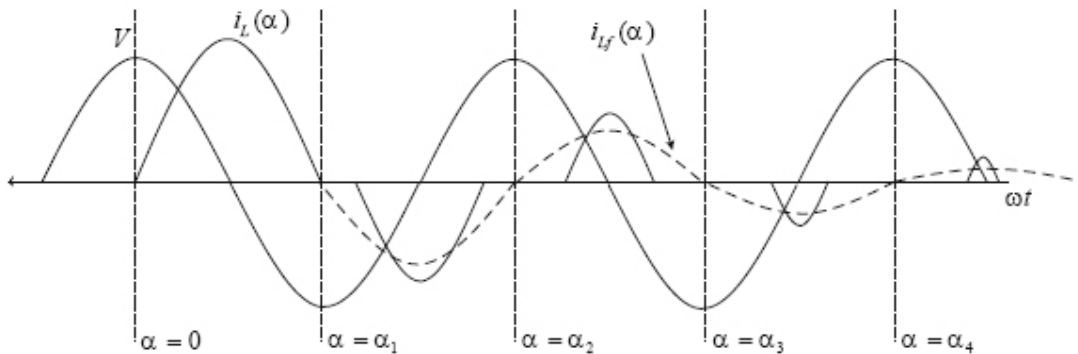


Figura 12c. Formas de onda de operación.

Los grandes tiristores pueden bloquear voltajes de 4000 a 9000 volts y conducir corrientes de 3000 a 6000 amperes.

### Descripción de la técnica de compensación.

La manera de compensar se basa en la activación de los tiristores los cuales al presentar una variación en el sistema, debido a los armónicos presentes en la señal de corriente. De lo que se va encargar los tiristores es de activar los reactores para que de esta manera suministren la potencia que requiera el sistema, solo en base al ángulo de fase establecido por la activación de cada tiristor.

Además consiste en un reactor fijo y con tiristores bidireccionales que pueden controlar la corriente del reactor desde cero, cuando el interruptor está abierto o hasta el máximo cuando el interruptor está cerrado, en donde  $\sigma$  (sigma) es el ángulo de retardo del interruptor con tiristor y  $\alpha$  (alfa) es el ángulo de conducción del interruptor con tiristor, cuando está permanentemente cerrado el interruptor no tiene efecto la corriente del inductor.

### 3. 2. 3 Condensador energizado por tiristores (Thyristor Switched Capacitor –TSC).

TSC. (Capacitor suicheado por tiristores) Es un conjunto de capacitores suicheados por tiristores.

Este sistema consiste en un condensador o banco de condensadores en serie con un tiristor bidireccional y en serie con una pequeña bobina. La figura 13c, muestra el diagrama de TSC.

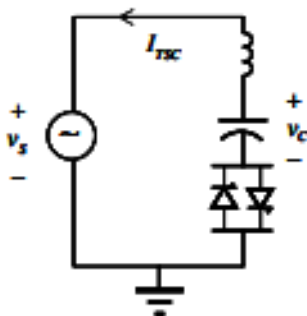


Figura 13c. Diagrama del condensador energizado por tiristores TSC.

La función de la bobina  $L$  es limitar la magnitud de crecimiento de corriente a través del tiristor y prevenir problemas de resonancia con la red.

El TSC se basa en el mismo principio que el TCR, utilizando esta vez un condensador; mediante el control del ángulo de disparo de los tiristores es posible modificar la susceptancia capacitiva del dispositivo, variando de esta forma la corriente inyectada en la línea. La limitación fundamental del TSC radica en la necesidad de utilizar en serie una inductancia para limitar las sobre-corrientes que surgen una vez que el dispositivo se enciende. Al igual que el TCR, su uso en forma individual es restringido, sin embargo ambos elementos constituyen la base de un SVC.

Con la finalidad de lograr una conexión del capacitor libre de transitorios, se elige el instante de conexión cuando la tensión en los extremos del tiristor está en su valor mínimo, idealmente en cero.

La desconexión del capacitor es acompañada por la suspensión de los pulsos de disparo de los tiristores, lo cual se efectúa en el instante en que la corriente pasa por cero.

En esta situación el capacitor mantiene una carga remanente asociada con el pico positivo o negativo de la tensión y queda preparado a la espera de una nueva conexión.

#### Descripción de la técnica de compensación.

La manera en que este sistema influye, en lo que se debe a la compensación de reactivos, es que en el momento en que se registre un ángulo de disparo diferente al establecido, los tiristores lo detecte y en ese momento suichean en automático, para que entre en función el banco de capacitores.

### 3. 2. 4. Reactor energizado por tiristores (Thyristor Switched Reactor –TSR).

Si la conmutación del TCR está restringido a un ángulo de retraso fijo, usualmente  $\alpha=0$  y entonces se vuelve un reactor con interruptor tiristor (TSR).

El TSR provee una admitancia inductiva fija y por tanto, cuando está conectado al sistema ca, la corriente reactiva en él será proporcional al voltaje aplicado como indica la gráfica V-I en la figura 14c.

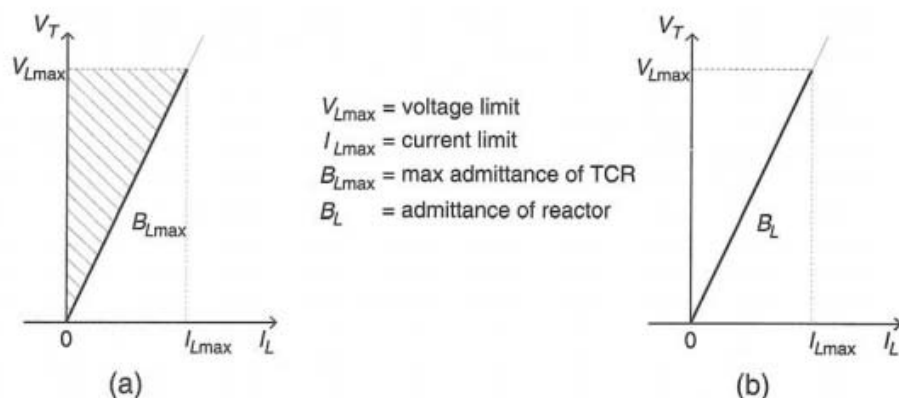


Figura 14c. Área de operación V-I del TCR (a) y del TSR (b)

Varios TSRs pueden proveer una admitancia reactiva controlable en forma de pasos. Si los TSRs están operados a  $\alpha=0$  corriente resultante en estado estable será sinusoidal.

#### Descripción de la técnica de compensación.

En base a un ángulo de disparo fijo, es como empieza a trabajar este tipo de SVC, a diferencia del TCR el cual va controlando la corriente del reactor desde cero.

Modificando adecuadamente el ángulo de disparo de los tiristores en función de la tensión u otra magnitud relacionada, es posible una rápida acción de regulación permitiendo la generación o absorción de potencia reactiva según corresponda.

### 3.2.5 TCR/TSC.

El capacitor con conmutación por tiristor, compensador tipo reactor controlado por tiristor (TSCTCR) fue desarrollado primariamente para compensaciones dinámicas de sistemas de transmisión de potencia con la intención de minimizar pérdidas por stand by y proveer incrementos en la flexibilidad de operación, figura 15c.

#### Descripción de la técnica de compensación.

La forma de compensación en el caso del TSC, es que continuamente absorbe potencia reactiva en forma escalonada ascendiente es por eso la combinación con el TCR, la cual tiene la función de limitar la función de crecimiento de corriente en el sistema, la función del TCR es el control continuo de la potencia reactiva suministrada por el sistema.



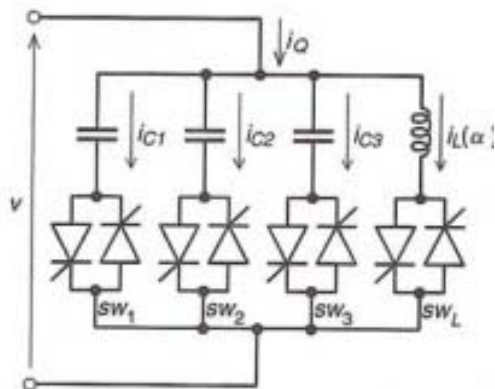


Figura 15c. Generador estático de VAR tipo TSC-TCR básico.

Se conectan frecuentemente en triángulo. Este tipo de conexión favorece el funcionamiento de los tiristores y, en el caso de los TCR, permite eliminar las corrientes de secuencia cero.

La reactancia efectiva es ajustada variando el ángulo de conducción de tiristores. Al igual que los otros tipos de SVC, lo cual modificando adecuadamente el ángulo de disparo es posible una rápida acción de regulación permitiendo la generación o absorción de potencia reactiva según sea el caso.

La compensación por medio de los tiristores para cualquiera de los diferentes arreglos de SVC, se basa en dos modos diferente.

### Compensación Discreta.

Está basada en un interruptor electrónico que abre o cierra el circuito un número entero de semi ciclos.

### Compensación Continua.

Es casi idéntica a la anterior, diferenciándose en que para este caso, los tiristores se utilizan como controladores es decir, el interruptor abre o cierra el circuito en un instante cualquiera.

La interrupción por medio de tiristores, actúan en un intervalo entre medio ciclo y un ciclo de la onda fundamental (8.33 ms – 16.66 ms), mientras que los interruptores mecánicos demoran del orden de dos ciclos (33.32 ms) en el cierre y ocho ciclos (133.33 ms) para la apertura.

### 3.3 Elementos constructivos.

#### Sistema de control digital

Es un dispositivo importante del compensador estático de vars, usado para el cálculo en tiempo real de energía reactiva de redes de energía, controlando el tamaño del ángulo de activación, de este modo, controla la cantidad de compensación de energía reactiva, en la figura 16c, se muestra un diagrama de un sistema SVC, en donde se puede apreciar la posición del sistema de control dentro del SVC.

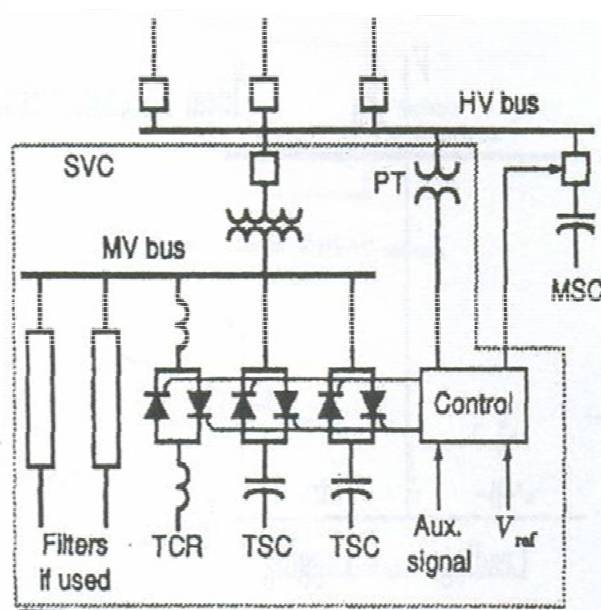


Figura 16c. Sistema de control adjunto al SVC.

#### Convertor con tiristor.

Recibe una señal del sistema de control, cambia el tamaño del ángulo de activación del tiristor, y produce la corriente de compensación de energía reactiva correspondiente.

En la figura 17c, se muestra el circuito convertidor más utilizado para grandes y medias potencias, el cual lleva tres tiristores y tres diodos. Funcionan prácticamente igual que si llevaran solamente diodos, lo único reseñable es que llevan un circuito de control de disparo de los tiristores adicional. Los circuitos de control van montados en placas de circuito impreso, y en la actualidad se emplean con pequeños microprocesadores para poder añadirles más, además del control de disparo de los tiristores. Algunas de estas funciones pueden ser: detección de averías, de selección, de registro, etc.

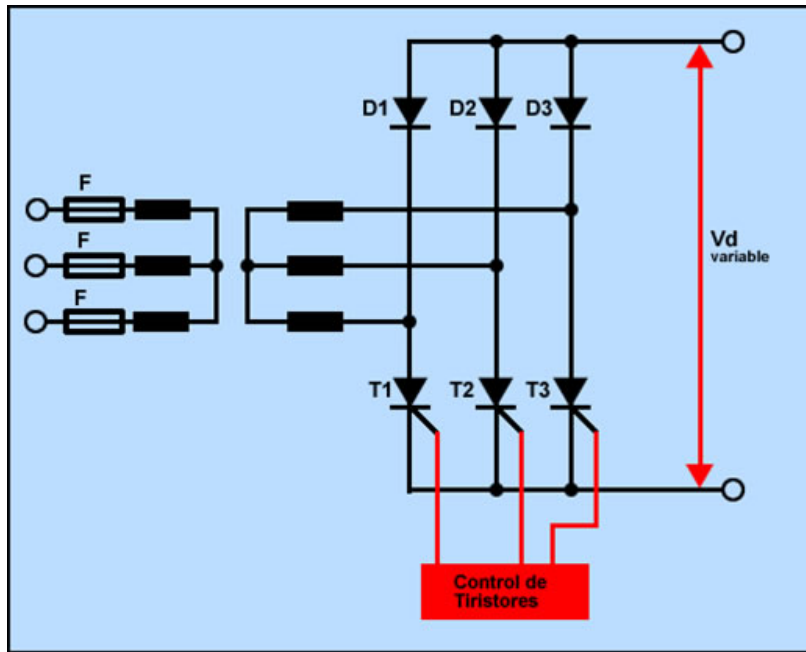


Figura 17c. Conversor con tiristor.

### Reactor de compensación.

Cuando la corriente pasa por el tiristor fluye por el reactor de compensación, esto genera la energía reactiva requerida por el sistema, que es usada para equilibrar la energía reactiva del sistema y mantener la estabilidad del voltaje de conducción y el factor de energía, figura 18c.



Figura 18c. Reactor de compensación.

### Dispositivo de filtración de armónicos de alto orden

Se componen generalmente por reactores, capacitores y resistores.

Las funciones que realiza es la de eliminar los armónicos de alto orden que están en el sistema, brinda energía reactiva capacitiva al sistema, mejora el factor de energía.

La multiplicación de dispositivos electrónicos de potencia ha creado la necesidad de realizar frecuentemente el análisis de armónicos. Entre las posibles soluciones para eliminar los armónicos, la solución más utilizada son los filtros pasivos, asociación de condensadores e inductancias sintonizados en las frecuencias a eliminar. Otra solución es la correspondiente a los compensadores activos, dispositivos electrónicos que aportan un gran nivel de funcionalidades.

Las corrientes armónicas que circulan en las redes generan una gran cantidad de perturbaciones con consecuencias perjudiciales: envejecimiento prematuro y destrucción de equipos, sobredimensionamiento de las instalaciones, disparos de las protecciones en forma inesperada. Todas estas consecuencias tienen un impacto económico importante: costo de equipos, pérdidas adicionales de energía, y pérdida de productividad.

Las soluciones en la eliminación de armónicos pasan por tecnologías pasivas, activas y la combinación de ambas en el llamado filtro híbrido. Figura 19c.

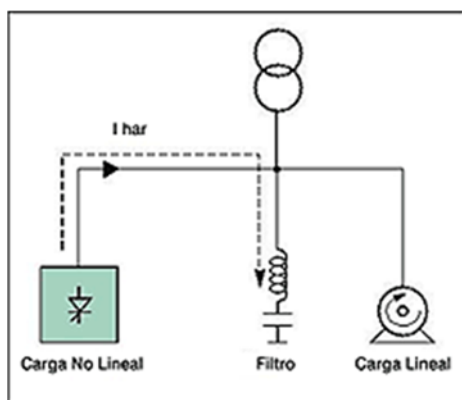


Figura 19c. Dispositivo de filtración pasivo de armónicos.

Las aplicaciones típicas para los filtros pasivos son en las instalaciones de potencia media o de potencia alta, pocos cientos de kVA. Lo que incluye variadores de velocidad, hornos de inducción, hornos de arco y rectificadores, y también aquellas que requieren corrección del factor de potencia.

### Compensador activo

El compensador activo es un equipo de electrónica de potencia, con control digital. Los sensores de corriente se usan para la medición de la corriente de carga de la línea. El circuito de control digital calcula el contenido de la corriente armónica ( $I_{har}$ ) de estas corrientes de carga y genera las señales del orden adecuado en la unidad de potencia. La unidad de potencia genera la corriente ( $I_{act}$ ) en oposición a las corrientes armónicas de la carga. Figura 20c.

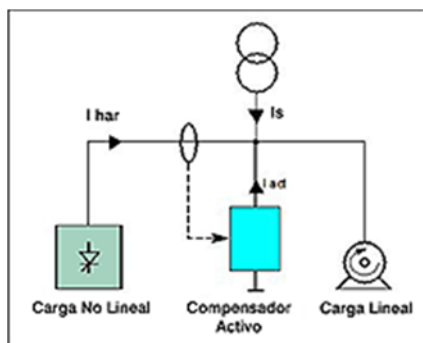


Figura 20c. Compensadores activos.

Las aplicaciones típicas de los compensadores activos están en instalaciones de potencia baja y potencia media, desde pocas decenas de kVA a pocos cientos de kVA. Incluyendo equipos de computación, UPS, variadores de velocidad e iluminación fluorescente, entre otras.

### Filtros Híbridos.

Para extender el rango de aplicación de los compensadores activos, y mejorar las funcionalidades de los filtros pasivos, las nuevas técnicas permiten combinar ambas tecnologías dentro del mismo equipo. Figura 21c.

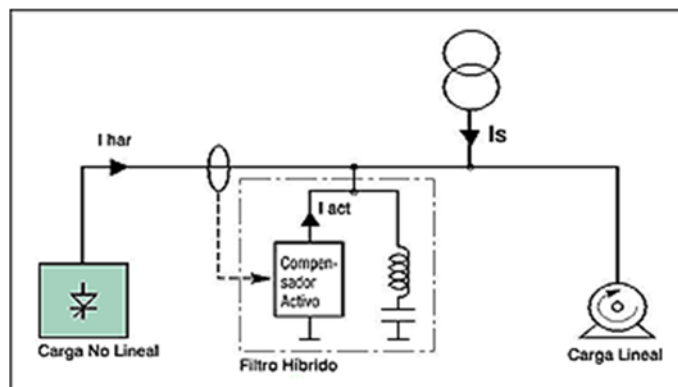


Figura 21c. Filtro híbrido.

El filtro pasivo se sintoniza en la frecuencia armónica predominante, y entrega la energía reactiva requerida. El compensador activo se dedica al resto de los armónicos.

Las aplicaciones típicas de los filtros híbridos son las mismas aplicaciones de los filtros pasivos, es decir, para instalaciones de potencia media y potencia alta, pocos cientos de kVA. Aplicaciones que demandan corrección del factor de potencia, además de la funcionalidad de eliminar el resto armónicos de orden diferente.

Con la reducción de la sección activa y la alimentación natural de la energía reactiva, la tecnología híbrida ofrece una solución óptima y económica para la mayoría de las instalaciones de alta potencia.

## **Capítulo 4. Ejemplos de aplicación.**

### **4.1 Subestaciones de compensación en México.**

La instalación de CEV en México se inicio en los primeros años de la década de los 80's. Las principales empresas encargadas en su instalación fueron ABB y SIEMENS, entre otras. A continuación se mencionaran algunas subestaciones compensadoras, desde las primeras hasta las actuales y futuros proyectos, en toda la República Mexicana.

#### **Subestación Santa Ana.**

En operación desde el año 1982, con una potencia en MVAR de 50 inductivos y con una tensión en 230 kV, se localizada al noroeste en el estado de Sonora. La empresa encargada en su instalación fue FUJI

La grandes rasgos la manera cómo es que está compuesta la subestación, es la siguiente, cuenta con CEV del tipo reactor controlado por tiristores (TCR), el cual contiene tiristores bidireccionales en conexión delta, los cuales están encargados de generar seis pulsos, la subestación igual cuenta con un conjunto de banco de capacitores que actúan como filtro.

#### **Subestación Temascal.**

Trabaja con una potencia de MVAR de 300 inductivos y 300 capacitivos a una tensión de 400 kV. La subestación de Temascal labora desde octubre del año 1982. Se localiza al oriente en el estado de Oaxaca en el municipio de San Miguel Soyaltepec. La empresa encargada en su instalación fue ABB

La subestación de temascal contiene CEV del tipo condensador energizado por tiristores (TSC) y reactores controlados por tiristores (TCR), los cuales son los encargados de generar o absorber potencia reactiva y de esta manera compensar los volts-ampers reactivos.

#### **Subestación de Acatlán.**

Con una potencia en MVAR de 200 inductivos, a una tensión de 400 kV, se inició en marzo de 1983, al Occidente en el estado de Jalisco municipio de Acatlán de Juárez, la instalación se llevo a cabo por la empresa ABB.

Contiene un CEV del tipo TCR, en donde la misión de este componente es la de una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por las bobinas.

#### **Subestación Cananea.**

Trabaja con una potencia de 80 MVAR capacitivos a una tensión de 230 kV desde mayo de 1984. Se localiza al Noroeste en el Estado de Sonora municipio de Cananea. La empresa encargada en su instalación fue FUJI

Contiene un CEV del tipo TSC, el cual es conjunto de capacitores suicheados por tiristores, el cual consiste en un condensador o banco de condensadores en serie con un tiristor bidireccional y en serie con una pequeña bobina.

### **Subestación Culiacán III**

Cuenta con una potencia de MVAR de 100 inductivos y 100 capacitivos a una tensión de 230 kV. Se localiza al Noroeste en el Estado de Sinaloa en el municipio de Culiacán, desde abril de 1992. La empresa encargada de su instalación fue ABB.

Los diferentes subsistemas que forman el CEV son: la unidad de sincronía, el TSC (capacitor conmutado por tiristores), el TCR (reactor controlado por tiristores), los filtros de 5a y 7a armónica, el banco de transformadores, la unidad de control, la unidad de distribución y la unidad de medición.

El CEV tiene un rango de operación continua de  $\pm 100$  MVAR y está conectado en derivación a la red de 230 kV por medio de un banco de transformadores monofásicos con una potencia trifásica de 200MVA y un voltaje nominal de 230 / 13.8 kV.

### **Subestación Xul-Há.**

Tiene una potencia de MVAR de 10 inductivos y 40 capacitivos a una tensión de 115 kV. Se localiza en la zona peninsular del estado de Quintana Roo en el municipio de Othon P. Blanco. La empresa encargada de la instalación de CEV del tipo TSC correspondió a ABB

La subestación de Xul-Há cuenta con dos líneas de conducción de energía que provienen de la subestación de Ticul, una de 230 KV y la otra de 115 KV. La infraestructura sólo puede generar 12 MW.

### **Subestación Nizuc.**

Con una potencia de MVAR de 30 inductivos y 100 capacitivos, con una tensión de 115 kV, es como trabaja esta subestación desde Agosto de 1998, localizada en la zona peninsular en el Estado de Quintana Roo y municipio de Benito Juárez. Las obras se llevaron a cabo por la empresa ABB. El tipo CEV con el cual operan es del tipo TSC.

### **Subestación Escárcega.**

Cuenta con una potencia de MVAR de 50 inductivos y 150 capacitivos a una tensión de 230 kV, localizada en la zona peninsular en el Estado de Campeche, en el municipio de Escárcega. La empresa ABB fue la encargada de la instalación del CEV del tipo TSC, en Diciembre 1998.

### **Subestación Güemez.**

Con una potencia de MVAR de 90 inductivos y 300 capacitivos a una tensión 400 kV son los datos principales de este CEV del tipo TSC, que se encuentra al Noroeste en el Estado de Tamaulipas, municipio de Cd. Victoria. La construcción se llevó a cabo por la empresa ABB, En Junio de 1999

### **Subestación Texcoco.**

Localizada en el Estado de México en el municipio de Texcoco, la Subestación Texcoco está en operación desde agosto de 1999, en la actualidad cuenta con un compensador estático de vars, de 300 MVAR capacitivos y 90 MVAR inductivos, del tipo TSC, con una tensión de 400 kV. La empresa encargada de su realización fue ABB.

### **Subestación Topilejo.**

Ubicada en el Distrito Federal, en la zona de la delegación Tlalpan, trabaja con una un compensador estático de vars, de 300 MVAR capacitivos y 90 MVAR inductivos, del tipo TSC con una tensión de 400 kV. Se encuentra en operación desde 1999 y la empresa que intervino fue ABB.

### **Subestación la Pila.**

Cuenta con una potencia en MVAR de 70 inductivos y 200 capacitivos, del tipo TSC a una tensión 230 kV, se encuentra en el área occidente en el Estado de San Luis Potosí, municipio Villa de Reyes. La empresa encargada fue Siemens, en noviembre de 1999.

### **Subestación Cerro Gordo.**

La potencia que tiene es de MVAR de 90 inductivos y 300 capacitivos a una tensión de 230 kV, se encuentra localizada en la zona central, en el Estado de México, municipio de Santa Clara. La empresa encargada de la instalación del CEV del tipo TSC, fue Siemens, en agosto del 2000.

### **Subestación Durango JOM.**

Trabaja con una potencia de MVAR de 50 inductivos y 150 capacitivos, el CEV es del tipo TSC. Está a una tensión de 230 kV, se encuentra en la zona Norte en el Estado de Durango, la empresa encargada fue ABB, en Mayo del 2003.

### **Subestación Camargo.**

Localizada en el Estado de Chihuahua municipio de Cd. Camargo, en la carretera estatal No. 18, Ciudad Camargo-Ojinaga km 1+720. Trabaja con una capacidad de MVAR de -50 inductivo +200 capacitivos, a una tensión de 230 kV, con un CEV del tipo TSC. La empresa encargada de la instalación del CEV fue ABB en el Mayo del 2003.



### **Subestación Camargo II.**

Localizada en el Estado de Chihuahua se caracteriza por un banco de reactores en 230 kV, de 30 MVAR, formado por tres unidades monofásicas de 10 MVAR. El CEV es del tipo TCR.

### **Subestación Cerro de Oro.**

Tiene una potencia en MVAR de 300 inductivos y 300 capacitivos a una tensión de 400 kV, se encuentra en la Zona Oriente, en el Estado de Oaxaca, municipio de S. Miguel Soyaltepec. La empresa encargada del CEV del tipo TCR, fue ABB en Junio del 2005.

### **Subestación Moctezuma (Villa de Ahumada).**

Cuenta con una potencia de MVAR de 90 inductivos y 300 capacitivos, el CEV es del tipo TSC se encuentra a una tensión de 230 kV, se encuentra en la Zona Norte en el Estado de Chihuahua, municipio de Moctezuma, la empresa encargada de su realización fue ABB, en Junio del 2005.

### **Subestación Pie de la Cuesta.**

Ubicada en la Zona Central, en el Estado de Guerrero; municipio de Coyuca de Benitez. Cuenta con una potencia en MVAR de 50 inductivo y 150 capacitivos a una tensión de 230 kV, la empresa encargada de las obras de la instalación del CEV del tipo TSC fue ABB, en Junio del 2005.

### **Subestación Cañada.**

Cuenta con una potencia en MVAR de 90 inductivos y 300 capacitivos a una tensión de 400 kV. Su ubicación se encuentra en la Zona Occidente en el Estado de Aguascalientes en el municipio de San Francisco, la empresa encargada de la instalación del CEV del tipo TSC fue ABB, en febrero del 2006.

### **Subestación de Nopala.**

Ubicada en la zona central de la delegación de Naucalpan, esta subestación se encuentra trabajando con tecnología moderna la cual involucra a un compensador estático de vars del tipo TSC, desde el año 2006, con las siguientes característica de MVAR de 90 inductivos y 300 capacitivos a una tensión de 400kV. Se basa en una compensación dinámica, con lo cual se cuenta con un total de 390 MVAR de potencia reactiva. La empresa encargada fue Siemens.

### **Subestación La Paz.**

El Proyecto de compensación se inicio noviembre del 2007, se encuentra entre las subestaciones de Texcoco y Santa Cruz, son de las zonas donde existe más demanda, 1,688 MW.

Consiste en la instalación de un CEV del tipo TCR que se ubicará en la subestación La Paz, con capacidad de 300 MVAR capacitivos y 300 MVAR inductivos. Para control y soporte de voltaje en la red troncal.

Este proyecto permitirá incrementar la capacidad del suministro de energía hacia la Zona Metropolitana del Valle de México, evitando probables cortes de energía en distintas zonas ante posibles disturbios o fallas y se incrementará la confiabilidad operativa. La empresa encargada fue ABB.

### **Subestación Donato Guerra.**

Ubicada en el Estado de México entro en operación febrero 2009, con las con las siguientes características MVAR de 450 inductivos y 450 capacitivos a una tensión de 400 kV, la empresa encargada de la instalación del CEV del tipo TCR fue ABB.

### **Subestación Tecnológico.**

Oaxaca, Oaxaca. Marzo del 2010. En el cumplimiento a lo establecido en el Plan Estatal de Desarrollo Sustentable, en el Istmo de Tehuantepec se concluyó la construcción de la subestación Eléctrica tecnológico con una capacidad de 20 MVA y la construcción de la línea de 115 kV para entroncar dicha subestación, y así beneficiar a las y los habitantes de esta región con la mejora en la continuidad del suministro de este importante servicio. El CEV es del tipo TCR-TSC.

### **Subestación El Palmar.**

Ubicado entre Cabo San Lucas y San José del Cabo al noroeste del Corredor Turístico. La Comisión Federal de Electricidad, registro en el año 2010 una demanda máxima de 150 MW. Es por esa razón que se realizó el proyecto llave en mano de un compensador estático de vars del tipo TSC, de 50 inductivos y 150 capacitivos en 230KV.

Se ubica en el nivel de 115 kV permitiendo incrementar la capacidad de transmisión del doble circuito de 230 kV que une las zonas de la Paz y los Cabos.

Se tiene programada una capacidad de reactivos de 150 MVAR capacitivos.

### **Subestación de Ixtepec.**

Septiembre 2010 ABB, proporciona un compensador estático vars (SVC) del tipo TCR-TSC, en el sur de México. Su instalación es en la subestación de la Ventosa, cerca de la ciudad de Ixtepec en el estado de Oaxaca.

La tecnología permitirá un mejor control de voltaje de la red y hará mejor la fiabilidad en el ámbito de la red de transmisión de 400 kV. También ayudará a estabilizar las oscilaciones de potencia activa causadas principalmente por un parque eólico adyacente con capacidad de 1.900 MW.

### Subestación de Juile.

Juile es una subestación de transmisión actualmente en operación a la cual se le adicione tres alimentadores de 400 kV que enlazarán esta instalación con las subestaciones Cerro de Oro y la Ventosa; un banco de reactores de potencia integrado por tres unidades monofásicas de 25 MVAR cada uno con tensiones nominales de 400 kV, conectados hacia la subestación Cerro de Oro. Puesta en operación en Septiembre 2010. Cuenta CEV del tipo TCR y TSC.

### Subestación Ticul II.

Se puso en marcha Octubre 2010 cuenta con 3 Reactores, 1 Fase 25.5 KV y una potencia 548 KVAR. Cuenta con CEV del tipo TCR.

### Subestaciones CEV futuras.

Se encuentra la de Huatulco Potencia que tendrá un Reactor de 18 MVAR a una tensión 230 kV contemplada para Diciembre del 2013. CEV contemplados es del tipo TCR.

Otro futuro proyecto es en Hermosillo contara con un Reactor de 28 MVAR a una tensión de 230 kV programada para Abril del 2014. CEV contemplado del tipo TCR.

### Infraestructura de compensación para el valle de México.

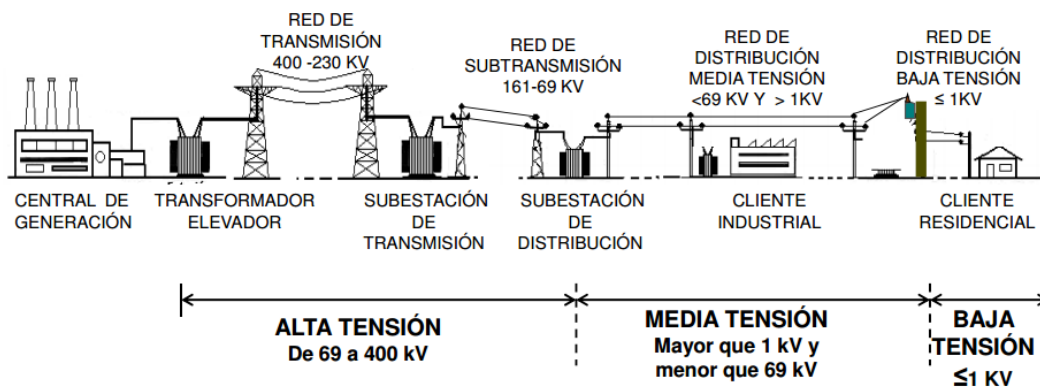


Figura 1d. Infraestructura de Tensión.

En la red troncal de 400 kV se tienen instalados Compensadores Estáticos de Var (CEV) que apoyan al soporte de voltaje local en la Zona Metropolitana del Valle de México, durante la condición normal de operación y durante la eventual salida de algún elemento en el nivel de tensión de 400 o 230 kV.

La infraestructura de transmisión instalada está integrada en primer lugar por un doble circuito de tensión de 400 kilovolts (kV), el cual se extiende geográficamente en la Zona Metropolitana del Valle de México formando un anillo, que representa la red troncal; en este nivel se tienen 16 enlaces externos líneas de transmisión, que provienen de fuentes de generación lejanas con distancias mayores a 200 kilómetros (km), además de cinco enlaces externos en el nivel de tensión de 230 kV.

La energía proveniente de los enlaces externos es recibida en subestaciones de potencia, las que a través de la transformación alimentan a la red de subtransmisión en 230 kV; internamente se tienen múltiples circuitos en 230 kV que en su mayoría forman anillos e interconectan subestaciones reductoras con bancos de 230/85 kV y 230/23 kV hacia el nivel de distribución.

La red en el nivel de voltaje de 85 kV está dedicada para suministro a clientes con demandas de tipo industrial y comercial, sin embargo, en ciertos sectores se tiene red en este nivel de tensión que suministra energía a bancos de distribución 85/23 kV, y permite apoyar la subtransmisión y distribución.

Actualmente el suministro en la red de distribución se realiza por medio de circuitos radiales en el nivel de tensión de 23 kV, alimentados precisamente por las subestaciones con relación de transformación 230/23 y 85/23 kV.

Adicionalmente las subestaciones de distribución tienen compensación capacitiva fija en el nivel de tensión de 23 kV y 85 kV, con un total de 2,634 MVAR instalados; sin embargo su capacidad disponible se ve reducida en la práctica, debido a que no se han rehabilitado parte de estos capacitores.

### **Generación.**

Internamente en la Zona Metropolitana del Valle de México las principales fuentes de generación son: la central Valle de México con una capacidad efectiva instalada de 999.3 MW y la central Tula con una capacidad efectiva instalada de 2,034.6 MW. La figura 2d, muestra los principales CEV de la Zona Metropolitana del Valle de México.

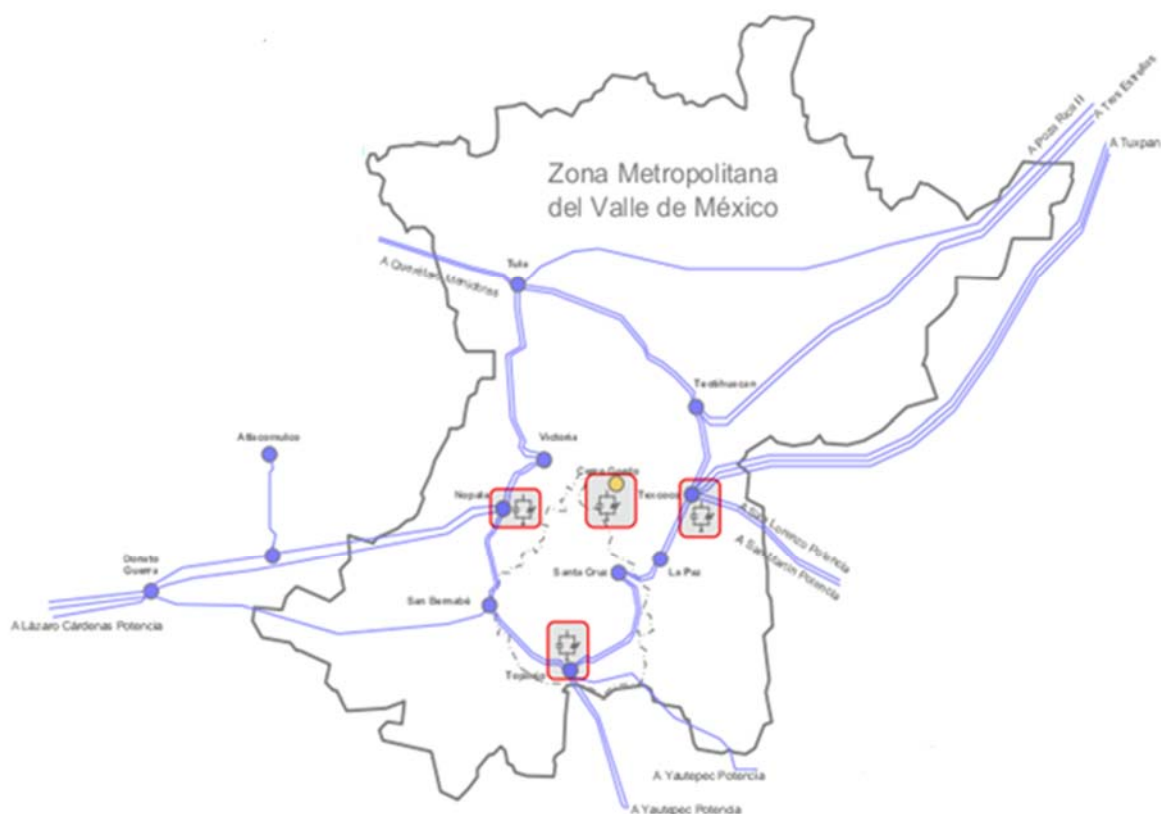


Figura 2d. Principales CEV de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Las subestaciones Texcoco, Topilejo y Nopala cuentan con CEVs con capacidad de 300 MVAR capacitivos y 90 MVAR inductiva, y la subestación de Cerro gordo con un CEV con capacidad de 300 MVAR capacitivos y 75 MVAR inductivos.

## **4.2 Aplicación mundial de compensadores modernos.**

En esta apartado se hará breve mención sobre algunas subestaciones compensadora de reactivos de otros países, con el fin de demostrar que esta tecnología no solo constituye parte de solo un país, si no que abarca a muchos más países, solamente tomando algunas subestaciones compensadoras.

### **Beijing.**

ABB, ha instalado dos condensadores del tipo TSC en serie con valores nominales de 372 MVAR a una tensión de 500 kV, en el centro de cada línea de un corredor de 300 km con circuitos gemelos, que une Datong y Fangshan, en la capital de Beijing. Los equipos entraron en funcionamiento en junio de 2001, apenas nueve meses después de la firma del contrato.

### **Chile**

Chile en cuestión de Compensadores estático de vars(SVC) cuenta con un tecnología de punta para el sistema interconectado en la central de la subestación Diego de Almagro.

Siemens Chile recibió la adjudicación por parte de Transelec, para el diseño, construcción y puesta en servicio de un SVCdel tipo TCR de 100 MVAR, Siemens Alemania, diseño cada uno para una capacidad de 50 MVAR capacitivos y inductivo y juntos logran un nivel de compensación de 100 MVAR. Con conexión a una red de 220 kV en la subestación Diego de Almagro para mejorar el voltaje en el extremo norte de la red, ante fallas de corta duración, y permitirá adicionalmente incrementar en un 24% los niveles de transferencia de potencia desde a la subestación Maitencillo al norte del país, en el sistema interconectado en 220 kV.

Este proyecto posibilitará mejorar la calidad del suministro de energía en la zona norte del país.

### **Brasil.**

En la subestación de Río Branco en Brasil cuenta con un compensador estático de VARS de 50 MVAR. En cambio la subestación Jesús da Lapa II, trabaja a una tensión de 500 kV y tiene un compensador estático de vars de 500 MVAR, 250 MVAR capacitivos y 250 MVAR inductivos, de los tipos de SVC que cuenta son: 2 TCR y un TSC además de transformadores a 83.3 MVA, con sus respectivos filtros.

### **Alemania.**

En la localidad de E.OnNetzGmbH Alemania. Se encuentra una de las diferentes subestaciones que trabajan con SVC, las características con que cuenta son las siguientes: la tensión con que trabaja es de 380 kV a 50 Hz, el transformador es para una tensión de 200 MVA, la operación de rango es de 200 MVAR capacitivos y 100 MVAR inductivos, el SVC es del tipo TCR y TSC.

### **USA**

En el poblado de Entergy USA, es donde se encuentra la subestación que cuenta con SVC de la empresa SIEMNS, donde la alimentación de tensión es de 230 kV a 60HZ, cuenta con 4 transformadores de 100 MVA, el rango de operación del SVC es de 300 MVAR capacitivos del tipo TSC.

En la localidad de Denver se cuenta con una subestación con esta tecnología de compensación la cual trabaja a una tensión de 525 kV a 60 Hz, los transformadores con que cuenta son a 100 MVA,

### **Colombia.**

De las subestaciones compensadoras que hay en Colombia una de las más importantes es la que se encuentra en el poblado de Chinu la cual genera una potencia de 250 MVAR capacitivos y una potencia de 150 MVAR inductivos, a una tensión 500 kV. La empresa encargada del CEV del tipo TSC fue SIEMENS.

### **Nicaragua.**

En la subestación Sandino cuenta con un reactor del tipo TCR, que genera una potencia de 20 MVAR, la cual trabaja a una tensión de 230 kV, dentro las características más esenciales con las que cuenta esta subestación.

Otra de las subestaciones localizadas en Nicaragua está la de Ticuantepec, de igual forma cuenta con un reactor con una potencia de 20 MVAR con una tensión de 230 kV.

### **Guatemala.**

La subestación Panaluya cuenta con un reactor del tipo TCR, que genera una potencia de 20 MVAR a una tensión de 13.8 kV.

Estos son algunos ejemplos, los cuáles sirvieron como reseña de aplicación mundial y mostrar que esta tecnología no es exclusiva de un solo país, sino al contrario es de aplicación mundial.

## **Conclusión.**

Los resultados obtenidos al principio fue el de conocer las base sobre el tema, tales como conceptos ligados a la compensación de la potencia reactiva, desde conceptos básicos a conceptos más complejos, al igual el comprender el análisis analítico para la corrección de un bajo factor de potencia.

Ya posteriormente se complementó con la investigación de equipos que sirven para compensar la potencia reactiva, en donde se logró conocer cómo es que se componen y la función que desempeñan para diferentes casos de compensación reactiva.

Se logró conocer más a fondo sobre un dispositivo importante para la compensación de potencia reactiva tal es el caso del compensador estático de VARS (SVC), en donde se investigó, sobre el principio de operación de los tiristores basados en la electrónica de potencia, al igual conocer las diferentes variantes que se tiene sobre los SVC.

Por último se consiguió saber sobre subestaciones que usan este tipo de tecnología para compensación de potencia reactiva y donde se encuentran localizadas en la república mexicana, además de conocer algunas otras a nivel mundial, así como los rangos de potencia reactiva y capacitiva que manejan las diferentes subestaciones compensadoras.

En general este trabajo de tesis me ayudo, de la forma en que me adentre más a fondo en un tema de mi interés del cual sabia poco y por consiguiente me llevo a saber cómo es que se comportan los componentes inductivos en los sistemas de potencia, y las formas como se puede compensar las pérdidas generadas por una magnetización no compensada, saber cuáles son los componentes que generan o absorben potencia reactiva, al igual cuales son la nuevas técnicas modernas para corregir un bajo factor de potencia, lo cual me lleva a enfatizar más en la electrónica de potencia, en donde se aborda el tema de los FACTS y de ahí a hacer un análisis de modo de operación de las distintas formas de disparo de los tiristores de los SVC.

Dejando para generaciones futuras en este trabajo los conceptos relacionados a lo que es la corrección de un bajo factor de potencia, las nuevas técnicas en cuanto a componentes y dispositivos electrónicos para la compensación.

Como recomendación para una investigación que valdría la pena realizar es el estudio sobre los compensadores síncronos o maquinas síncrona dado a que tiene diferentes aplicaciones tal solo el de generar o consumir potencia reactiva, sino también el de trabajar como motor, todo esto dependiendo la forma de operación en la que se encuentre.

Además cabe destacar que las tecnologías en cuanto al ámbito eléctrico van evolucionando rápidamente, un ejemplo de esto son las redes inteligentes, el cual es un tema importante a tratar, ya que involucra a la informática para su operación. El cual sugeriría para un análisis más profundo que en cierta forma va ligado con todo lo que tiene que ver con la infraestructura eléctrica.



## **Bibliografía.**

Chapman, Stephen j.

. Maquinas eléctricas. 2ª edición. Editorial McGraw Hill. México: 1998

Kosow, Irvin

. Maquinas eléctricas y transformadores. 2ª edición. Limusa editores. México: 1996

Boylestad, Robert

. Introducción al análisis de circuitos. 10ª edición editorial Pearson. México: 2004

González López, francisco Javier

. Fundamentos teóricos sobre armónicas. 2ª edición. Formación siglo21. México: 2000

## **Páginas web consultadas.**

[http://www.dispositivosfacts.com.mx/doctos/maestria/Tesis\\_Marie.pdf](http://www.dispositivosfacts.com.mx/doctos/maestria/Tesis_Marie.pdf)

[https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/ic/mvllv/low\\_voltage/Baterias\\_condensadores/Documents/Catalogo\\_PFC\\_Baterias\\_Condesadores\\_BT\\_LV%20Oct09.pdf](https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/ic/mvllv/low_voltage/Baterias_condensadores/Documents/Catalogo_PFC_Baterias_Condesadores_BT_LV%20Oct09.pdf)

[http://www.tuveras.com/electrotecnia/Potencias\\_trifasica/potencias\\_trifasica.htm](http://www.tuveras.com/electrotecnia/Potencias_trifasica/potencias_trifasica.htm)

[http://www.gers.com.co/pdf/facts\\_gers.pdf](http://www.gers.com.co/pdf/facts_gers.pdf)

[http://www.gdl.cinvestav.mx/abner/uploads/tesis\\_jess.pdf](http://www.gdl.cinvestav.mx/abner/uploads/tesis_jess.pdf)

<http://es.scribd.com/doc/82500483/272/tipos-de-svc>

<http://elec.itmorelia.edu.mx/15%20seccion%20d.pdf>