

93



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

Zejan

FACULTAD DE INGENIERIA

CONTROL DE LA POTENCIA REACTIVA
EN SISTEMAS ELECTRICOS DE ALTA TENSION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

P R E S E N T A:
S U L P I C I O / G U Z M A N D I A Z



DIRECTOR DE TESIS

ING. AUGUSTO OCTAVIO HINTZE VALDEZ

CD. UNIVERSITARIA

1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Dedico este trabajo:

- A mis padres, y en especial a mi madre que con amor, empeño y dedicación lucha por la superación familiar.
- A mi esposa, por su comprensión y paciencia
- Al Sr. Francisco Rojas, de quien recibí apoyo en etapas decisivas de mi vida
- A mis tíos Ofelia y Elpidio
- A mis maestros, que siempre aportaron para mi formación más de lo establecido
- A mis familiares, amigos y compañeros de trabajo de quienes recibí muestras de apoyo y entusiasmo para llegar con éxito a esta etapa de mi vida.

SULPICIO GUZMAN DIAZ.

INDICE

1.	INTRODUCCION.	3
1.1.	Antecedentes	
1.2.	Compensación de Potencia Reactiva Potencia Reactiva Caída de Voltaje Pérdidas y Utilización de la Capacidad Térmica del Equipo. Control de Tensión y Balance de la Potencia Reactiva.	
1.3.	Compensación de Potencia Reactiva en Líneas de Transmisión. Razones Para la Compensación Reactiva. Control de Tensión en Estado Estable. Estabilidad Síncrona. División de la Carga. Sobretensiones.	
2.	CONFIGURACIONES BASICAS DE SISTEMAS COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA	24
2.1	Generalidades.	
2.2	Descripción y uso Recomendado de las Configuraciones de Compensadores de Potencia Reactiva.	
3.	EL COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA CEV.	32
3.1	Generalidades.	
3.2	Capacitores Conmutados con Tiristores.	
3.3	Reactor Controlado con Tiristores.	
3.4	Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Conmutado con Tiristores.	
4.	OPERACION DEL TIRISTOR.	42
4.1	La Electrónica en los Sistemas Eléctricos de Potencia.	
4.2	Principio de Operación del Rectificador Controlado de Silicio.	
4.3	Característica de Compuerta.	
4.4	Métodos de disparo del Tiristor.	
4.5	Métodos y circuitos de Bloqueo.	
4.6	Tiempos de Conmutación del Tiristor.	

4.7	Conexiones de Tiristores.	
4.8	Protecciones.	
4.9	Influencia de la Velocidad de Crecimiento de la Corriente (di/dt).	
4.10	Configuración de Tiristores.	
5.	GENERACION Y CONTROL DE ARMONICAS.	62
5.1	Generación de armónicas por los Compensadores de Potencia Reactiva.	
5.2	Control de Armónicas en los Compensadores Estáticos de VAR's.	
5.3	Problemas de Resonancia por la Compensación de Potencia Reactiva.	
6.	CONTROL DE COMPENSADORES ESTATICOS DE VAR'S.	78
6.1	Principio de Operación del CEV.	
6.2	Control.	
6.3	Representación Matemática.	
7.	EL CONDENSADOR SINCRONO.	88
7.1	Generalidades.	
7.2	Características de Diseño del Condensador.	
7.3	Características Eléctricas Básicas.	
7.4	Operación del Condensador.	
7.5	Métodos de Arranque.	
7.6	Consideraciones de Diseño de las Estaciones.	
8.	CONCLUSIONES.	121
8.1	Aplicaciones de la Compensación de VAR's en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).	
8.2	Instalaciones Principales de CEV's en el SEN.	
8.3	La Industria Eléctrica Nacional y la Fabricación de Equipo para la Compensación de VAR's.	
	BIBLIOGRAFIA.	128

1. INTRODUCCION.

1.1 ANTECEDENTES.

En el desarrollo y progreso de la humanidad el hombre ha llegado a depender en gran parte, para el desempeño de su vida cotidiana, de la electricidad; tanto así que su consumo ha llegado a ser, al igual que el acero, un parámetro para determinar el adelanto tecnológico en que se encuentra el país o sector social al que se encuentra relacionada.

Debido a esto la cantidad de fuentes generadoras de energía eléctrica se ha incrementado; los sistemas de transmisión han crecido en la misma medida; los de distribución se han hecho, al igual, cada vez más complejos; y al parajo de ellos, los problemas para manejar grandes cantidades de energía han aparecido en diferentes formas, a los cuales, por fortuna, se les ha encontrado la solución más adecuada.

Si hacemos un poco de historia, recordaremos que uno de los principales problemas ha sido la regulación de voltaje en las líneas de transmisión; en los primeros sistemas de potencia, que eran de corriente directa, se solucionó aumentando la tensión entre los bornes del generador; solución que, además, permitía una transmisión de mayor potencia de manera más económica, pues disminuyó las pérdidas, pero esto se limitaba a usos industriales por demás restringidos. La invención del transformador (por Gaulard y Gibbs en 1883) permitió un manejo más eficiente y

menos restringido de energía a potenciales elevados en sistemas de corriente alterna y muy pronto (adoptando lo desarrollado por Tesla en relación a corrientes polifásicas) se introdujeron los sistemas trifásicos de corriente alterna, que redujeron considerablemente las dimensiones de los generadores.

Con el tiempo, ante la demanda siempre en aumento de la energía eléctrica y la gran cantidad de usos que se le ha dado, se ha visto la necesidad de usar fuentes diversas de energía que, muchas de ellas por su naturaleza, están alejadas de los principales centros de consumo, como las centrales hidroeléctricas y geotérmicas; otras, como las grandes termoeeléctricas, son más flexibles en cuanto a su localización, pero aún así necesitan estar cerca de lugares donde se pueda disponer de agua suficiente para el buen desarrollo de su ciclo térmico; por esta razón las centrales nucleoeeléctricas están más restringidas, ya que su capacidad instalada generalmente es mucho mayor. Debido a esto la longitud de las líneas de transmisión es, por lo regular, bastante grande y su tensión se ha incrementado en gran medida (en algunos lugares se manejan tensiones de hasta 1000 KV; en México el voltaje de más alto valor en las líneas de transmisión es de 400 KV).

Con todo lo anterior, debido a las características eléctricas inherentes de las líneas de transmisión, se ha presentado un nuevo problema: el consumo y generación de potencia reactiva en los sistemas de transmisión de energía eléctrica. Este último problema es el que nos ocupa y veremos ampliamente.

Para su solución podríamos hacer que en las líneas (sobre todo medias y largas) la carga conectada equivalga a su potencia característica (SIL, por sus siglas en inglés), con lo cual se tendría un balance perfecto entre la potencia reactiva generada y consumida en el sistema; en

sistemas eléctricos de potencia esto es imposible por la naturaleza de la carga, que en magnitud y ángulo es totalmente variable y aleatoria; este criterio se puede aplicar únicamente en sistemas de comunicación, en donde se logra una máxima reducción de ondas reflejadas en la transmisión.

En nuestro caso se ha recurrido a variar la impedancia característica de las líneas conectando o desconectando a ellas elementos generadores o consumidores de potencia reactiva, esto es, capacitores o inductancias, de acuerdo a las condiciones instantáneas de operación del sistema.

Aclaremos que en los sistemas eléctricos de potencia las líneas de transmisión no son los únicos elementos causantes de este tipo de problemas, otros elementos que los ocasionan son los transformadores, los generadores, los cables subterráneos y las cargas de tipo reactivo.

Regresando a la forma de solución mencionada, podemos decir que esto se logra de múltiples maneras y se lleva a cabo dependiendo de las necesidades de cada red o región de un sistema en especial, además depende de los niveles de tensión o capacidades de potencia que se manejen y, en último caso, de la precisión que se requiere en la compensación que, si es muy elevada, se logra con equipos compensadores que permiten una "sintonía" casi continua con la variación de la potencia reactiva.

1.2 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA.

Potencia Reactiva.

La potencia reactiva se genera en las líneas de transmisión por las características

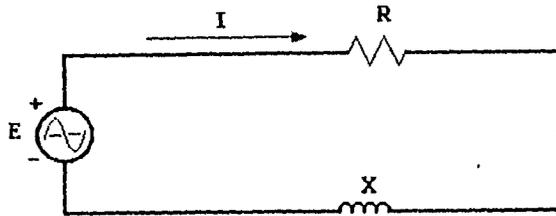


Figura 1.1

inductivas y capacitivas de éstas, en donde la inductiva es variable y depende de la carga conectada a ellas y la capacitiva es independiente de la carga.

Para comprender la influencia de la potencia reactiva, analicemos un circuito en el que exista un elemento reactivo, como se ve en la figura 1.1, donde

$$e = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin \omega t$$

de aquí, la potencia consumida será

$$p = e \cdot i = E \cdot I \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) + E \cdot I \sin \phi \sin 2\omega t$$

en la cual

$$E \cdot I \cos \phi (1 - \cos 2\omega t) = \text{potencia activa instantánea} = p_1$$

y

$$E \cdot I \sin \phi \sin 2\omega t = \text{potencia reactiva instantánea} = p_2$$

El valor medio de p_1 es la potencia real consumida en el circuito y el valor medio de p_2 es cero, con lo que vemos que es una energía que se encuentra oscilando en el sistema.

A la amplitud de p_2 se le denomina potencia reactiva y la representaremos como Q , a la amplitud de p_1 o potencia real la representaremos como P y al producto de los valores rms de la tensión y corriente, que es la suma de las potencias real y reactiva, la denominaremos como potencia aparente y la representaremos como S . La relación que guardan entre si se representa en el diagrama vectorial siguiente:

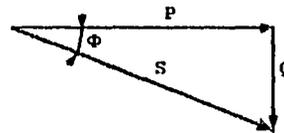


Figura 1.2

o ayudándonos de la relación entre tensiones y corrientes como se muestra en la figura 1.3; como nos referimos a una carga con elemento reactivo inductivo, indicamos la corriente, a través de él, atrasada.

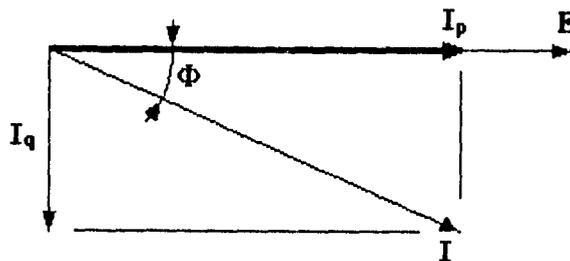


Figura 1.3

En el caso de una carga con elemento capacitivo se obtendría una corriente adelantada al voltaje. La interpretación de esto es que la carga inductiva (la más común en los sistemas eléctricos) absorbe potencia reactiva, esto es, Q es positiva, y la carga capacitiva genera potencia reactiva y, por lo tanto, en ella Q es negativa.

De esto que analizamos ya podemos visualizar que en el circuito existe una corriente circulando mayor en magnitud a la necesaria para consumir exclusivamente potencia real.

Caída de Voltaje.

En el punto anterior vimos como aparecen corrientes no deseadas en un circuito al existir en el elementos reactivos, enseguida veremos como estas mismas corrientes influyen en la caída de voltaje a través de una línea de transmisión.

Supongamos un circuito, como el mostrado en la figura 1.4, en el cual fluye una corriente I transmitiendo una potencia

$$S_1 = P_1 + Q_1$$

y se obtiene una potencia

$$S_2 = P_2 + Q_2,$$

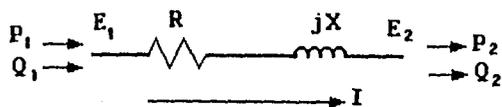


Figura 1.4.

el cual puede estar representado por el diagrama fasorial de la figura 1.5, donde RI es la caída

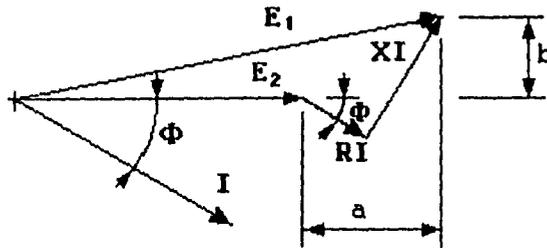


Figura 1.5

de voltaje a través de la resistencia y XI es la caída a través de la reactancia inductiva. Si consideramos que

$$b < [0.1 (E_2 + a)] ,$$

el error para calcular E_1 al suponer que

$$a \approx E_1 - E_2$$

será menor de 0.5%, y por lo tanto podemos calcular la caída de voltaje como

$$a = RI \cos\phi + XI \operatorname{sen}\phi$$

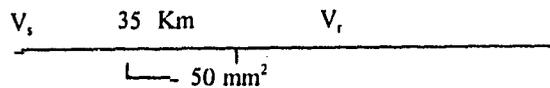
$$= (RP_2 + XQ_2) / E_2$$

$$b = (XP_2 + RQ_2) / E_2$$

en donde vemos que aparece un término afectado por la reactancia inductiva que, generalmente, llega a ser muy importante por los valores que toma en líneas de transmisión medias y largas. Para tener una idea más clara de este concepto analicemos el caso que nos presenta el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1. Una línea de transmisión con las características indicadas y una tensión en el extremo receptor de 19 KV, ¿ qué tensión necesita en el extremo de la fuente para alimentar una

carga de 2 MW a un factor de potencia de 0.8 compensando la caída por reactivos?



$$r = 17.5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{Km}$$

$$x = 0.4 \Omega/\text{Km}$$

$$V_n = 20 \text{ Kv}$$

Solución:

$$V_s = V_r + a$$

$$a = (RP_2 + XQ_2) / E_2$$

donde $R = (17.5 \times 35) / 50 = \underline{12.25 \Omega}$

$$X = 0.4 \times 35 = \underline{14 \Omega}$$

$$P_2 = \underline{2 \text{ Mw}}$$

$$E_2 = \underline{19 \text{ Kv}}$$

$$Q_2 = 2 \text{ tg } \phi ; \phi = \text{arc cos } 0.8 = \underline{36.87^\circ}$$

entonces $Q_2 = 2 \times 0.75 = \underline{1.5 \text{ MVA}}$

sustituyendo, tenemos que

$$a = (12.25 \times 2000 + 14 \times 1500) / 19 = \underline{2394.7 \text{ V}}$$

por lo tanto, la tensión necesaria en el extremo de la fuente es

$$V_s = 19000 + 2394.7 = \underline{21394.7 \text{ V}}$$

$$V_1 = \underline{21.4 \text{ Kv}}$$

y la caída que produce la parte reactiva de la línea es

$$\begin{aligned} XQ_2 / E_2 &= 14 \times 1500 / 19 \\ &= 1109 \text{ V} \end{aligned}$$

$$XQ_2 / E_2 = \underline{1.1 \text{ Kv}}$$

Pérdidas y Utilización de la Capacidad Térmica del Equipo.

Algo que se toma en cuenta en el uso de un equipo y que es una razón muy poderosa en las decisiones, en cuanto a la selección del mismo lo han sido las pérdidas. Para nosotros, en el tema que tratamos, es muy importante considerarlas en vista de los resultados del punto anterior.

Como sabemos que en una línea las pérdidas resistivas son proporcionales al valor de la corriente elevado al cuadrado y los parámetros resistivos de ninguna manera podemos modificarlos al operar a una temperatura dada, la forma indicada de disminuir estas pérdidas es minimizando la corriente por otros medios.

Sabemos que

$$I = S / E$$

$$I^2 = (P^2 + Q^2) / E^2$$

si consideramos una línea con un compensador acoplado con las siguientes características, transmitiendo una potencia

$$S_2 = P_2 + Q_2$$

y suponemos Q_c capacitiva, tenemos que las pérdidas ΔP son:

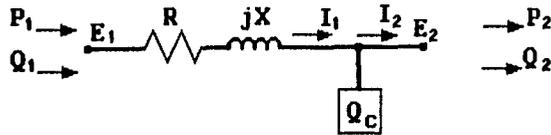


Figura 1.6

$$\Delta P = R \cdot I^2 = R \frac{P_2^2 + (Q_2 - Q_c)^2}{E_2^2}$$

de donde vemos que se minimizan si hacemos que

$$Q_c = Q_2$$

de tal modo que la potencia requerida por la carga sea generada por el compensador y con ello se reduzca la corriente en la línea. Para visualizar esto veamos el siguiente ejemplo basado en la línea del ejemplo 1.

Ejemplo 2. a). Calcule las pérdidas del circuito del ejemplo 1 si f.p.=0.7 y se tiene el $V_r=19$ Kv.

b). Considere un compensador para que f.p.=1, ¿ qué reducción en pérdidas se logran en las mismas condiciones de carga y para el mismo valor de V_r ?

Solución:

a). $I = S / V = (2000/0.7)/19 = \underline{150.38 \text{ A}}$

$$\Delta P_1 = RI^2 = 12.25 (150.38)^2 = 277.008 \text{ W}$$

$$\Delta P_1 = \underline{0.28 \text{ MW}}$$

b). Para que el factor de potencia sea igual a uno, el compensador tiene que tomar un valor en KVAR igual a la carga, esto es

$$Q_c = \sqrt{\left(\frac{2000}{0.7}\right)^2 - (2000)^2}$$

$$Q_c = 2040 \text{ KW}$$

con esto logramos que

$$I = P / V = 2000 / 21.4 = \underline{93.46 \text{ A}}$$

y por tanto

$$\Delta P_2 = 12.25 (93.46)^2 = 106.996 \text{ W}$$

$$= \underline{0.107 \text{ MW}}$$

la reducción en pérdidas sin compensar y compensadas será

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 0.277 - 0.107$$

$$= \underline{0.17 \text{ MW}}$$

la caída de voltaje será

$$a = R \times I = 12.25 \times 93.46 = 1144.9 \text{ V}$$

$$a = \underline{1.145 \text{ KV}}$$

y la tensión en el extremo receptor

$$V_r = V_s - a = 21.4 - 1.145$$

$$V_r = \underline{20.255 \text{ KV}}$$

De los resultados anteriores podemos ver que las pérdidas se reducen considerablemente al igual que la variación de voltaje.

Como la capacidad de transmisión es función de la temperatura de los conductores y ésta depende de la temperatura ambiente y se incrementa con las pérdidas, al tener un mínimo de pérdidas por efecto Joule la capacidad de transmisión mejorará notablemente.

- Control de Tensión y Balance de la Potencia Reactiva.

Como ya se mencionó antes, la potencia reactiva influye en el voltaje, por tanto, una manera de controlar éste es variando la potencia reactiva en el sistema, de tal modo que tanto la caída resistiva como la reactiva se compensen.

La caída de voltaje para un cambio de reactivos se puede expresar como

$$\frac{\Delta E}{E_2} = \frac{\Delta Q}{S_k}$$

en donde S_k es la capacidad de corto circuito en el punto considerado.

Existen métodos más obvios para el control de voltaje, tales como controladores automáticos de voltaje en el generador o cambiadores de taps en los transformadores, pero estos de ninguna manera reducen las pérdidas.

Lo ideal para minimizar pérdidas es evitar la transmisión de potencia reactiva desde puntos lejanos, entonces, la recomendación adecuada para un balance de potencia reactiva efectivo es que la compensación se debe realizar en cada región del sistema eléctrico, en cada sistema de transmisión y en cada red de distribución.

1.3 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

Esta parte del capítulo revisa las razones para usar compensación de potencia reactiva en los sistemas de transmisión y las justifica de una manera más completa.

En los primeros sistemas de potencia de corriente alterna no se utilizó ningún dispositivo de compensación reactiva especial porque los generadores estaban situados cerca de las cargas, pero a medida que las redes se hicieron más dispersas se adoptaron motores síncronos, pequeños condensadores síncronos y capacitores estáticos en paralelo para corregir el factor de potencia, y en los sistemas de transmisión se instalaron condensadores síncronos cada vez más grandes. Junto con el desarrollo de capacitores más eficientes y económicos ha existido un crecimiento en el uso de capacitores paralelo como un medio de obtener potencia reactiva. La potencia activa debe, por supuesto, ser transmitida desde los generadores hasta las cargas. La potencia reactiva no necesita, y de principio no debe ser transferida sobre distancias largas porque esto implica:

- Incremento en la caída de voltaje, que complica el control del voltaje.**
- Incremento en las pérdidas, debido a corrientes más altas, que se traducen en costos extras de transferencia.**
- Utilización innecesaria de las capacidades térmicas del equipo, particularmente los transformadores y cables.**

Las siguientes discusiones y descripciones se refieren en particular a transmisiones de muy alto voltaje.

- Razones para la Compensación Reactiva.

Ya se mencionaron equipos que consumen o generan potencia reactiva, dentro de estos los transformadores siempre consumen reactivos. Las líneas de transmisión pueden generar o consumir potencia reactiva. Suponiendo constantes los voltajes de operación en los extremos de la línea la potencia reactiva generada, debido a la capacitancia de la línea, es casi independiente de la carga transmitida; mientras que la potencia reactiva consumida, debido a la inductancia de la línea, varía con la carga transferida.

Como la carga transmitida puede variar mucho de hora a hora, la variación del balance de la potencia reactiva de una línea puede ser considerable, como se ve en la figura 1.7.

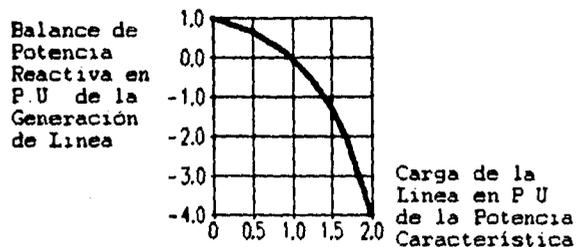


Figura 1.7 Balance de Potencia Reactiva en una Línea de Transmisión

Para una cierta carga transferida, la potencia reactiva consumida es igual a la potencia reactiva generada. Esta carga transmitida en MW se llama **potencia característica** - o SIL por

VOLTAJE DE OPERACION (KV)	GENERACION DE LINEA (KVAR/KM)	POTENCIA CARACTERISTICA (MW)
345	500	400
750	2800	2200
1150	7200	5500

Tabla 1.1 Valores típicos de Generación reactiva a 60 Hz y potencia característica para líneas aéreas.

sus siglas en inglés de la expresión surge impedance loading- también denominada **carga natural de la línea**. Si hay una interrupción forzada o programada de una línea conectada en paralelo con otras muy cargadas, se crea un gran incremento de demanda de potencia reactiva, la generación de potencia reactiva de línea se reduce y el consumo de potencia reactiva en las demás líneas se incrementa enormemente.

Los cables subterráneos en áreas urbanas grandes (como la Cd. de México) y las líneas aéreas largas de alto voltaje son fuentes importantes de potencia reactiva. La tabla 1.1 muestra cifras típicas de generación en líneas y su potencia característica.

Aparte de las consideraciones evidentes en lo que respecta a la transferencia de potencia reactiva mencionadas en la introducción, en particular se deben discutir los siguientes tópicos:

- Control de tensión en estado estable.

La figura 1.8 muestra el circuito equivalente de una línea transfiriendo potencia activa P y entregando en el extremo receptor una potencia reactiva Q a la carga. Para líneas aéreas de muy alto voltaje la resistencia es pequeña comparada con la reactancia X .

Para simplificar despreciemos la resistencia y supongamos que V_1 , el voltaje de envío es fijo e igual a 1.0 p.u. Para valores razonables de P y Q el voltaje V_2 en el extremo receptor se expresa como

$$V_2 = \sqrt{\frac{1}{2} - (Q - Q_2) \cdot X} + \sqrt{\frac{1}{4} - (Q - Q_2) \cdot X - P^2 X^2}$$

en donde todas las cantidades están en p.u. Esta ecuación es más bien informativa y muestra que para cada valor de X, V_2 se determina primeramente por la diferencia de potencias reactivas ($Q - Q_2$) y de manera secundaria por P. A menos de que sea compensada, las variaciones de P y de Q pueden crear variaciones de voltaje inaceptables para la operación del sistema de potencia. La ecuación anterior también muestra dos métodos posibles de compensación para control de voltaje:

- a).- Compensación paralelo, que es una absorción o inyección en paralelo de potencia reactiva, influyendo en ($Q - Q_2$).
- b).- Compensación Serie por medio de capacitores serie reduciendo así la reactancia X.

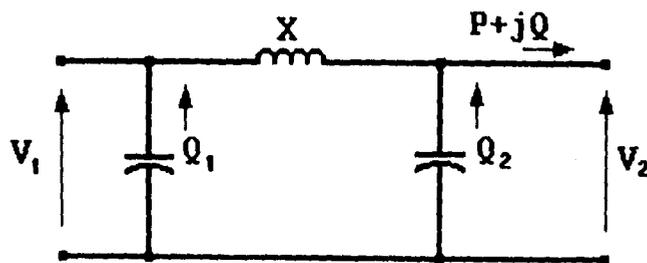


Figura 1.8 Circuito Equivalente Aproximado de una Línea de muy Alto Voltaje

De estos dos métodos para control de voltaje la compensación paralelo es usualmente la más empleada.

- Estabilidad Síncrona.

Desde un punto de vista analítico es muy útil subdividir la estabilidad síncrona en estabilidad en estado estable y estabilidad transitoria, no hay, sin embargo, definiciones precisas universalmente aceptadas de éstos dos términos. Nosotros nos referiremos a estabilidad de estado estable a disturbios pequeños y estabilidad transitoria a disturbios grandes. Además, el término "límite de estabilidad" en estado estable o transitorio lo usamos en el sentido de potencia máxima antes del supuesto disturbio y que puede ser continúa y establemente transmitida después del disturbio. El límite crítico de estabilidad transitoria es generalmente menor que el límite de estabilidad en estado estable. Desde un punto de vista económico estabilidad transitoria - y en particular la primera oscilación de estabilidad transitoria - es el tipo de estabilidad más importante porque puede influir en la selección de los elementos del sistema de potencia: niveles de voltajes de transmisión, número de líneas paralelas, seccionalización de líneas, etc., por consiguiente, el último tipo de estabilidad mencionado se analizará primero.

Consideremos un enlace de un sistema de transmisión de líneas en paralelo que puede estar representado por el circuito equivalente de la figura 1.9 en forma aproximada. Bajo condiciones de estado estable o transitorias, la diferencia angular entre los voltajes de transmisión queda expresada como

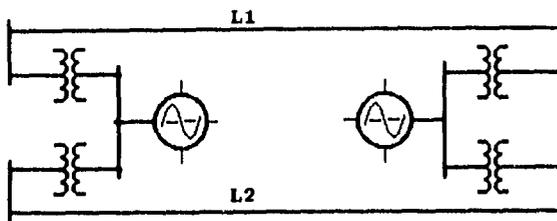


Figura 1.9

$$\Theta = \arcsin \frac{PX}{V_1 V_2}$$

En condiciones de estado estable Θ generalmente es menor de 30° en líneas. Ahora, sin intentar meternos en una discusión sobre la estabilidad transitoria - que queda fuera de este trabajo - se hace la siguiente proposición: existe una fuerte relación entre la estabilidad transitoria y este ángulo Θ entre los dos voltajes. En los casos críticos de estabilidad transitoria de líneas de transmisión largas es importante que la contribución Θ a la diferencia angular total entre los generadores y la transmisión no se haga demasiado grande. Como se puede ver en la ecuación anterior, tanto la compensación paralelo como la compensación serie se pueden usar para reducir Θ elevando, por lo tanto, los límites de estabilidad transitoria. La compensación paralelo, en particular la inyección de reactivos durante la oscilación de potencia crítica después de un disturbio, mantendrá altos los voltajes y, como consecuencia, reducirá Θ . La compensación serie, al reducir X , significa que tendremos un valor menor de Θ antes de la falla y un incremento menor de Θ durante la oscilación de potencia crítica.

Si consideramos la primera oscilación en estabilidad transitoria de transmisiones de larga

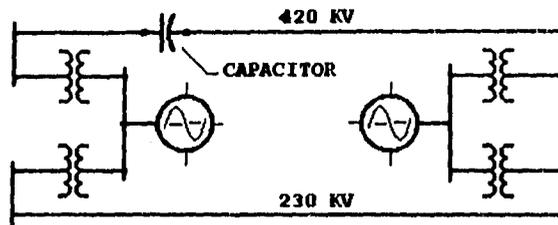
distancia, en casos particulares de transmisiones radiales desde una planta generadora remota a un sistema grande, y suponemos que se ha hecho una utilización completa de las medidas para disminuir los costos, la compensación serie se considera generalmente como el método más efectivo y económico para elevar los límites de estabilidad. Las medidas para disminuir el costo son: operación apropiada del sistema, desconexión rápida de fallas, recierre rápido, interruptores con mecanismo de operación por polo con conexión y desconexión monopolar y el uso de generadores con sistemas de excitación de respuesta rápida y, en el caso de generadores con turbina de vapor, valvuleo rápido.

Por lo que respecta a las subsecuentes oscilaciones de estabilidad transitoria y también de estabilidad en estado estable, el punto principal a considerar es, generalmente, el amortiguamiento. Además de la utilización completa de un control automático apropiado de la excitación del generador, incluyendo control suplementario de excitación por medio de los llamados estabilizadores de potencia - el medio más económico disponible - se ha mostrado también interés, durante años recientes, en el uso de compensación en paralelo controlable para mejorar el amortiguamiento; algunas personas lo denominan "soporte de voltaje dinámico" y lo realizan con compensadores síncronos y, mejor aún, con compensadores estáticos.

- División de la carga.

Se puede lograr una deseada división de carga entre circuitos conectados en paralelo mediante el uso de compensación serie. Controlando la división de cargas se pueden minimizar las pérdidas en la línea activa. En algunos casos, similares al mostrado en la figura 1.10, la reducción de las pérdidas totales por transmisión pueden pagar, parcial o completamente, la

instalación de un capacitor serie en pocos años, aunque no sea esta la razón principal de su instalación. Los transformadores defasadores también se pueden usar para controlar la división de carga.



Ilustr. 10 Figura 1.10 División de carga usando un capacitor serie

- Sobrevoltajes.

Los sobrevoltajes temporales en líneas de muy alta tensión trabajando con un extremo abierto, después de haber energizado la línea o debido a un rechazo de carga, se pueden reducir en forma efectiva mediante compensación paralelo con reactores. Esta no es la única ni la principal razón para su uso, la compensación paralelo con reactores es también benéfica por la

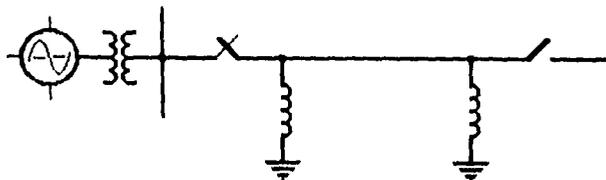


Figura 1.11 Reactores paralelo en la línea permiten la reducción de sobrevoltajes.

reducción de sobrevoltajes por switcheo, especialmente cuando los reactores están conectados directamente a la línea como se muestra en la figura 1.11.

2. CONFIGURACIONES BASICAS DE SISTEMAS COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA.

2.1. GENERALIDADES.

Antes de particularizar podemos dar una descripción general de los sistemas de compensación usados para obtener cada una de las configuraciones.

Algunos sistemas implican elementos mecánicos en movimiento, como interruptores y generadores, otros son completamente estáticos, como los tiristores usados como conmutadores o interruptores de los elementos reactivos conectados a las líneas de transmisión. También podemos tener sistemas que, por la forma en que están conectados los elementos reactivos, pueden ser fijos y/o conmutados y controlados. De éstos el último es un caso muy especial y es el sistema con el cual se ha tenido un mejor resultado en su uso, pues se logra una compensación más fina y que por el uso en ellos de tiristores lo denominaremos como "Compensador Estático de VAR's" o CEV. Con respecto a los sistemas que tienen sus elementos fijos es bueno mencionar al reactor saturable y al de condensador serie. En cualesquiera de los casos anteriores, si los niveles de voltaje son muy elevados, se puede hacer necesario el uso de un transformador de acoplamiento que, para fines de cálculo y selección de valores de los elementos compensadores, también participará en cuánto a consumo de potencia reactiva. En los compensadores estáticos, por el uso de tiristores, el voltaje máximo que se puede manejar en ellos es de

34.5 K.V. De los compensadores que tienen sus elementos acoplados a las líneas en forma permanente ya se mencionó al reactor saturable, que tiene una característica de armónicas superior a cualquier compensador estático.

Con todo lo anterior a continuación presentamos una lista de las principales configuraciones:

- 1.- Condensador Síncrono.
- 2.- Reactores Conmutados en Paralelo.
- 3.- Capacitores Conmutados en Paralelo.
- 4.- Capacitor Serie.
- 5.- Compensador Estático, que puede ser
 - a).- Capacitores Conmutados con Tiristores.
 - b).- Reactor Controlado con Tiristores.
 - c).- Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Fijo.
 - d).- Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Fijo Segmentado.
 - e).- Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Fijo Conmutado.
 - f).- Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Fijo "12 Pulsos".
 - g).- Transformador de Alta Impedancia Controlado por Tiristor.
 - h).- Capacitor Conmutado Mecánicamente, Reactor Controlado con Tiristores.
 - i).- Reactor Saturable.

2.2 DESCRIPCIÓN Y USO RECOMENDADO DE LAS CONFIGURACIONES DE COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA.

2.2.1. CONDENSADOR SÍNCRONO.

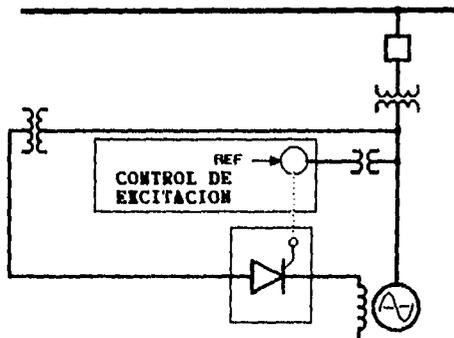


Figura 2.1

Consiste básicamente en un generador de corriente alterna con el que se puede controlar, en base a su curva de capacidad, la generación o absorción de potencia reactiva, sobre todo en casos donde el voltaje debe tener un mejor control que con capacitores o reactores conectados con interruptores. Se usa generalmente en el lado receptor de las líneas de transmisión, en grandes subestaciones o conjuntamente con estaciones inversoras en CD de alto voltaje; en la figura 2.1 se muestra su conexión.

2.2.2. REACTORES CONMUTADOS EN PARALELO.

Como su nombre lo indica, consiste principalmente de uno o más reactores conectados por medio de interruptores a una línea. Conviene su uso cuando se desea compensar potencia reactiva generada por líneas que operan generalmente en baja carga y cables subterráneos, también reducen sobrevoltajes en condiciones de circuito abierto. Su configuración se puede ver en la figura 2.2.

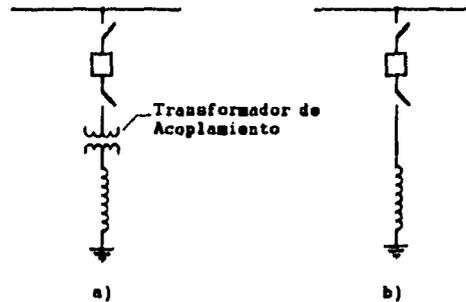


Figura 2.2 Reactores conmutados en paralelo.

2.2.3. CAPACITORES CONMUTADOS EN PARALELO.

Semejante al caso anterior, consiste en capacitores en paralelo conectados con interruptores a la línea y se considera como el medio más económico de generar reactivos. Se instalan generalmente en las subestaciones de subtransmisión o distribución y en plantas industriales para corregir el factor de potencia.

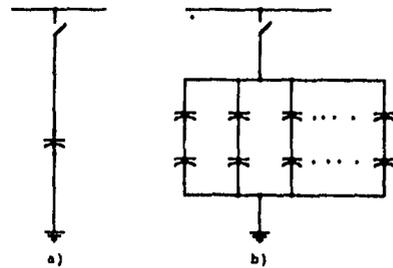


Figura 2.3 Capacitores conmutados en paralelo.

Para su configuración, que por demás es sencilla como la anterior, ver la figura 2.3.

2.2.4. CAPACITOR SERIE.

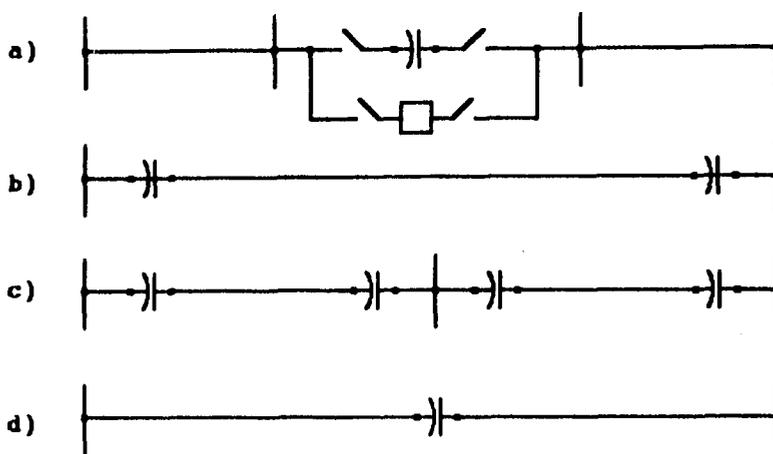


Figura 2.4 Capacitores serie

Muy sencillo, como los anteriores, consiste en un capacitor conectado en serie en una línea de transmisión, y puede estar localizado tanto en la parte central de ella como en la cercanía de cualquiera de sus extremos; se puede conectar por medio de interruptores como se ve en la figura 2.4. Este sistema se instala por una o ambas de las razones siguientes: incrementar la capacidad de transmisión de carga determinada por los límites de estabilidad en transitorios y/o dividir la carga entre circuitos paralelos de transmisión. Independientemente de las razones mencionadas, el capacitor serie tiene efectos benéficos sobre el control de voltaje y potencia reactiva y por tanto se puede considerar como un dispositivo autoregulado, pues de acuerdo al incremento de la carga es el incremento de la potencia reactiva generada. Una desventaja que desafortunadamente tiene es que su localización y dimensionamiento debe ser objeto de un

adecuado estudio, pues puede ocasionar resonancia subsíncrona y dañar seriamente a los generadores.

2.2.5. COMPENSADOR ESTÁTICO.

Considerado como uno de los medios más económicos y eficaces por el hecho de estar constituidos por elementos semiconductores en sus secciones de conmutación y control; se puede decir que son de los más complejos en su configuración, complejidad que aumenta en función del grado de control que se quiera tener sobre la potencia reactiva. Su configuración y constitución básica se puede ver, de acuerdo a los diferentes tipos, en las figuras 2.5 y 2.6. Todos sus elementos se encuentran combinados de tal forma que en conjunto proporcionan una

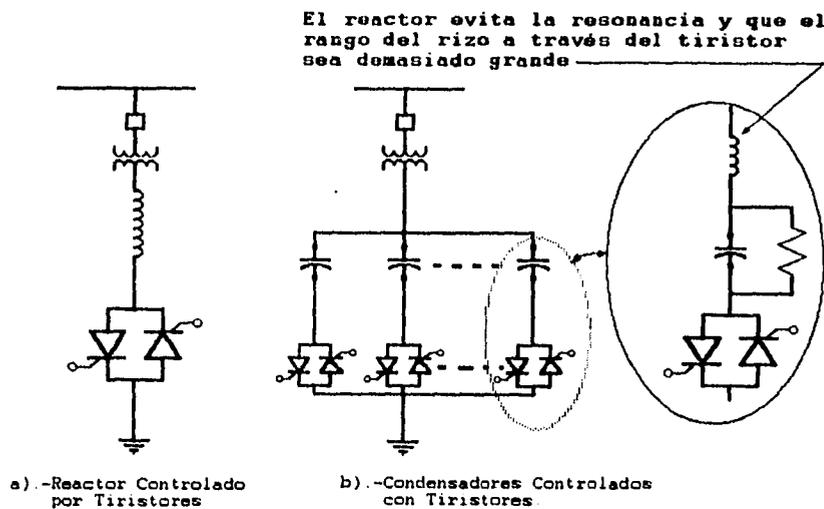


Figura 2.5 Compensadores estáticos.

compensación rápida y continuamente controlable. En algunas configuraciones la salida de reactivos continuamente controlada es el resultado de un control activo retroalimentado, en otras dicho control es completamente pasivo, como en el reactor saturable; algunas configuraciones menos sofisticadas emplean para su control solo los tiristores actuando como conmutadores, u otros más sencillos emplean interruptores convencionales.

2.2.6. DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN MIXTOS.

Debido al crecimiento constante de la generación en los sistemas de potencia las líneas de transmisión deberían crecer al mismo ritmo, pero por políticas económicas o requerimientos ecológicos (que en nuestros días estos últimos han adquirido gran importancia) se justifica, en algunos casos, agregar equipo de compensación de reactivos que difiere del instalado inicialmente, pero permite optimizar la transmisión de potencia a través de una línea. Esta diver-

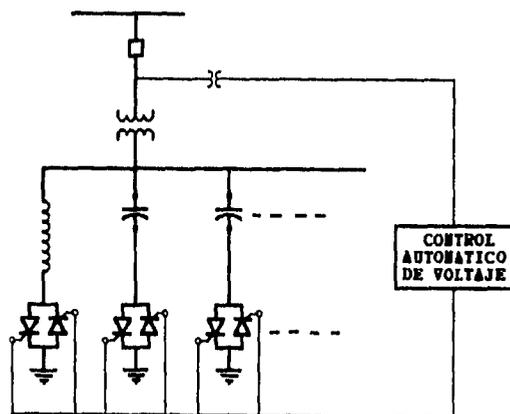


Figura 2.6 Compensador estático mixto.

sificación lo determinan también las nuevas cargas conectadas al sistema.

De hecho, el tener un sistema de potencia operando en un grado de optimización elevado y cumpliendo con los requerimientos de calidad y continuidad de servicio implica el uso o implementación de la compensación de potencia reactiva necesaria, de acuerdo a las características particulares de cada una de sus secciones.

3. COMPENSADORES ESTATICOS DE POTENCIA REACTIVA (CEV'S)

3.1. GENERALIDADES.

En el capítulo anterior vimos que son múltiples las configuraciones para este tipo de compensador, de las cuales consideraremos únicamente algunas por ser más representativas, pero con esto de ninguna manera restamos importancia a las demás. El compensador controlado por tiristores, en general, complementa y algunas veces reemplaza al condensador síncrono pues tiene las grandes ventajas de una respuesta rápida, relación beneficio/costo mayor, un gran rendimiento y alta confiabilidad.

El tipo de compensador a usar se selecciona de acuerdo a los siguientes parámetros:

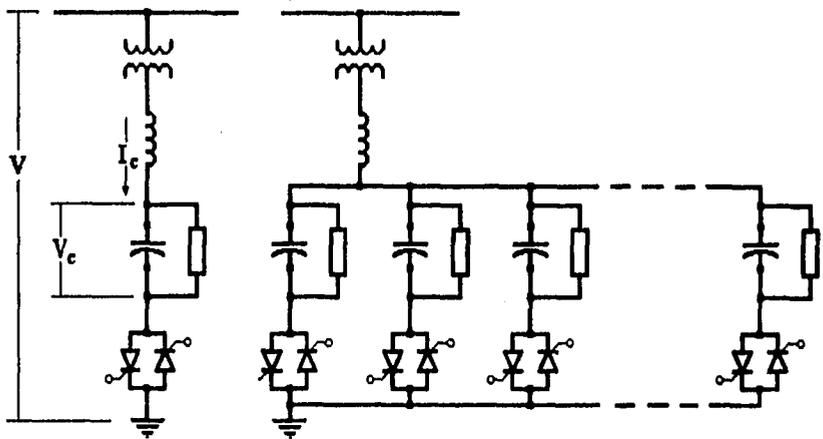
- Gama de control dinámico .
- Parte inductiva máxima.
- Parte capacitiva máxima.
- Máximo contenido admisible de armónicas.
- Tamaño máximo de los escalones en la potencia de compensación.
- Evaluación de las pérdidas.

Dentro de la gama de control dinámico tenemos que considerar la probable inestabilidad del sistema al caer en transitorios que necesiten de respuestas rápidas; para evitar esto en la sección de control se hace necesario tener hasta tres variables de control.

Al considerar las partes inductiva y capacitiva máximas requeridas en el compensador estático se tiene que tomar en cuenta la transmisión máxima y mínima de potencia a la que se tendrá operando la línea.

Algo importante que no debe pasar inadvertido en la selección y diseño de un compensador es la cantidad y magnitud de armónicas generadas que afectan, en algunos casos sensiblemente, la calidad de la energía a transmitir. Este tema lo trataremos ampliamente en el capítulo 5.

El tamaño máximo de escalones en la potencia de compensación, se debe considerar,



a).-Módulo Básico

b).-Compensador con Varios Pasos de Compensación

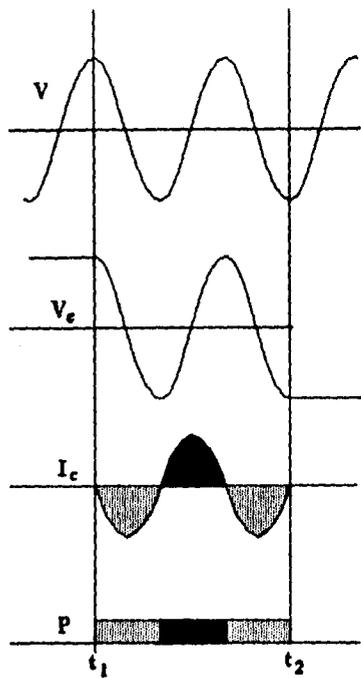
Figura 3.1 Capacitores conmutados con tiristores

sobretudo, en los sistemas de condensadores conmutados, pues la compensación aquí se va realizando de manera escalonada, considerando valores discretos.

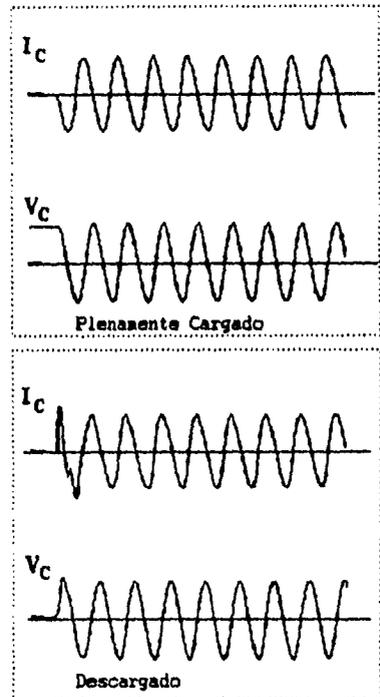
Para la elección del sistema de compensación más adecuado no solo se considera lo antes mencionado, la mayor parte de las veces se define por su costo, el cual no solo incluye el precio del equipo instalado (inversión inicial), sino también el costo de operación que se desglosa en mantenimiento y pérdidas que, al capitalizarse considerando los precios actuales de energía y generación, pueden exceder por un margen significativo los costos de capital y, de esta manera ser un parámetro importante para elegir entre las diferentes alternativas.

3.2. CAPACITORES CONMUTADOS CON TIRISTORES.

En principio los condensadores se han usado para compensar reactivos en sistemas de distribución y en plantas industriales, donde generalmente son fijos o están conectados a interruptores, pero donde se aplican aprovechando al máximo su uso es en estaciones transformadoras que alimentan sistemas de distribución y, en este caso, para conectarlos de acuerdo a la variabilidad de carga se hace uso de tiristores, como se puede ver en la figura 3.1 a), donde se indica una reactancia en serie que limita la corriente a través de los tiristores en caso de que estos se disparen en una posición de fase desfavorable por una perturbación y para evitar problemas de resonancia con armónicas. En caso de requerirse compensación reactiva capacitiva únicamente y ésta se pueda realizar en forma escalonada, el compensador se puede implementar como en la figura 3.1 b). En este último caso se puede conectar un escalón de condensadores



c).- Funcionamiento



d).- Conexión del condensador

Figura 3.1

con un mínimo de transitorios si se da un impulso de encendido al interruptor de tiristores en el momento en que la tensión de la red y del condensador son iguales, en este instante la tensión a través de los tiristores es cero. La desconexión se puede efectuar con un retardo máximo de medio período bloqueando los impulsos de disparo a los tiristores que, de esta manera, permanecen en estado no conductor y el escalón de condensadores empieza a descargarse a través de la resistencia conectada en paralelo con él. El efecto de conectar y desconectar el condensador

en las condiciones adecuadas mencionadas lo vemos en la figura 3.1 c). Es conveniente mencionar como desventaja de este tipo de compensador su incapacidad para limitar sobrevoltajes en transitorios grandes que solo se reducen por su propia desconexión.

3.3. REACTOR CONTROLADO POR TIRISTORES.

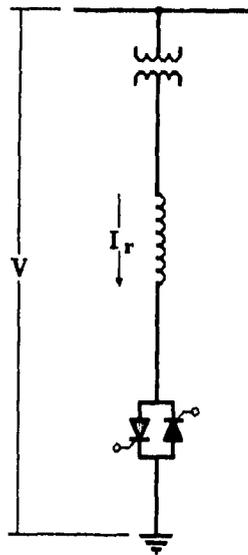


Fig. 3.2 Reactor Controlado por Tiristores

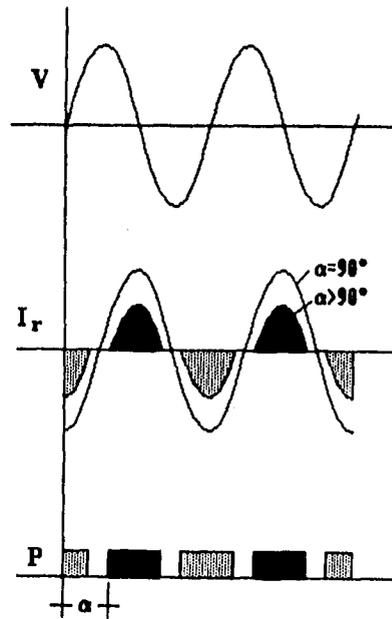


Fig. 3.3 Funcionamiento del RCT de acuerdo al ángulo de disparo

Como ya se indicó en la sección 2.2.2., el uso para el cual se recomienda es la restricción de sobrevoltajes y compensación de reactivos capacitivos; su conexión se hace como se ve en la figura 3.2, que es muy sencilla y puede estar acoplada al sistema por medio de los tiristores usándolos como sistema de conmutación y además de ser controlado por los mismos variando el ángulo de fase de conexión y desconexión. Cuando se usa el ángulo de fase como control se obtiene un cambio continuo en el consumo de potencia reactiva a expensas de la generación de

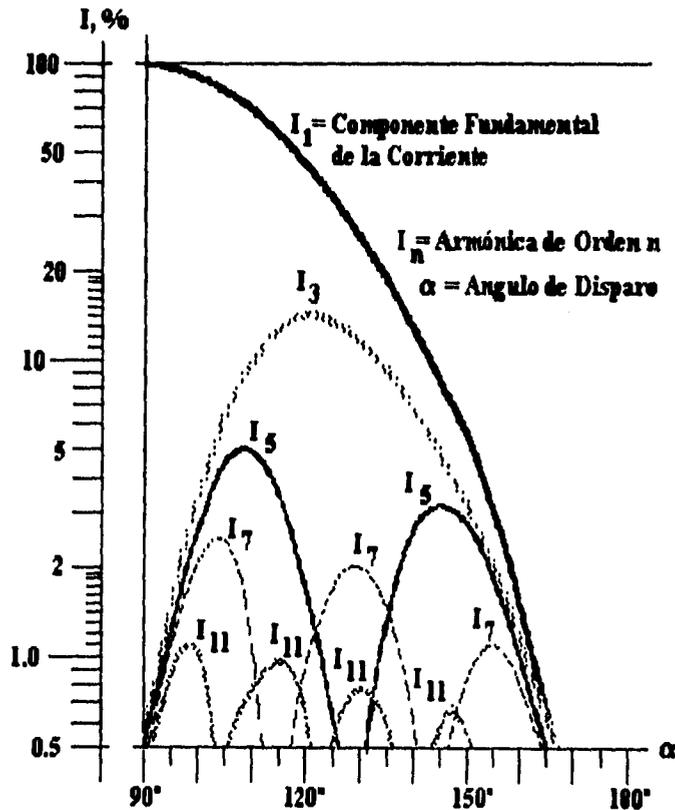


Figura 3.4 Valor de las armónicas componentes de la corriente resultante en el compensador de reactor controlado por tiristores en función del ángulo de disparo.

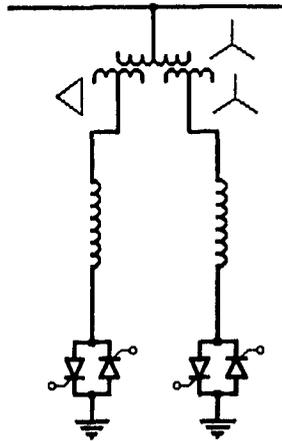


Figura 3.5 Conexión de 12 impulsos.

armónicas, sin embargo, hay que poner de relieve que el cambio de la corriente de la reactancia no puede tener lugar más que en instantes discretos de tiempo, lo que significa que el ajuste no puede hacerse más frecuente que dos veces por período, como se ve en la figura 3.3.

El hecho de controlar el período de conducción de los tiristores implica la generación de armónicas de 3°, 5°, 7°, 9°, 11° y 13° orden con amplitud de 13.8%, 5%, 2.5%, 1.6%, 1.0% y 0.7% respectivamente de la corriente fundamental de la reactancia a conducción plena, como se ve en la figura 3.4, sin embargo, con control equilibrado las componentes de sucesión nula (3°, 9°, ...etc.) solo circularán entre las reactancias en el caso de conexión delta de reactores o en el devanado delta del transformador estrella/delta. En la corriente de la línea solo se presentará una pequeña parte de estas armónicas debido a desbalances ocasionados por las asimetrías.

A pesar de todo esto puede resultar necesario reducir las armónicas aún más adoptando soluciones según el caso. Un método para hacerlo es usando la conexión de 12 impulsos. En la figura 3.5 se presenta este tipo de conexión.

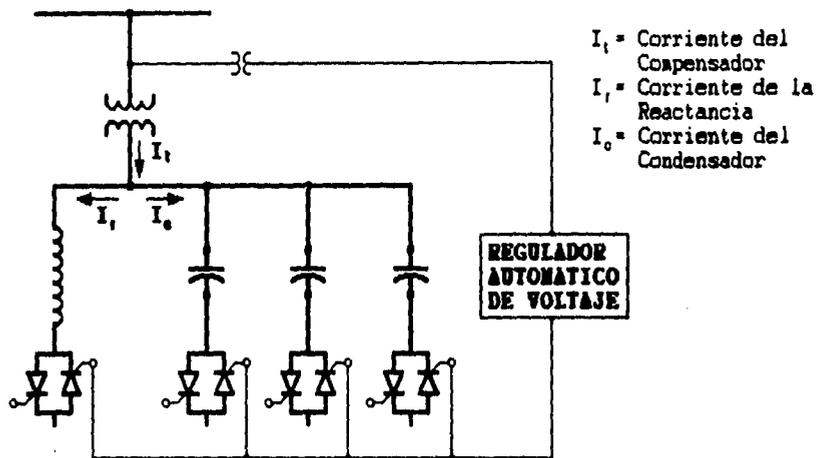


Figura 3.6 Compensador estático de tipo RCT/CCT.

3.4. REACTOR CONTROLADO POR TIRISTORES/CAPACITOR CONMUTADO CON TIRISTORES.

Como la mejor y más completa de las soluciones se ha adoptado este tipo de compensador, pues tiene la capacidad de actuar en la gama de control de potencia reactiva de los dos tipos antes mencionados ya que es su combinación, como se muestra la figura 3.6, y además logra un control casi continuo que se obtiene de la siguiente forma:

Supongamos que al inicio se tiene la línea en circuito abierto y se le acopla carga poco a poco, en este momento se conecta el reactor para compensar los VAR'S (Volts-Amperes Reactivos) capacitivos de la línea y, de acuerdo al aumento de carga, se varía el ángulo de encendido de los tiristores hasta que, al tener la línea su carga natural, los tiristores se mantienen

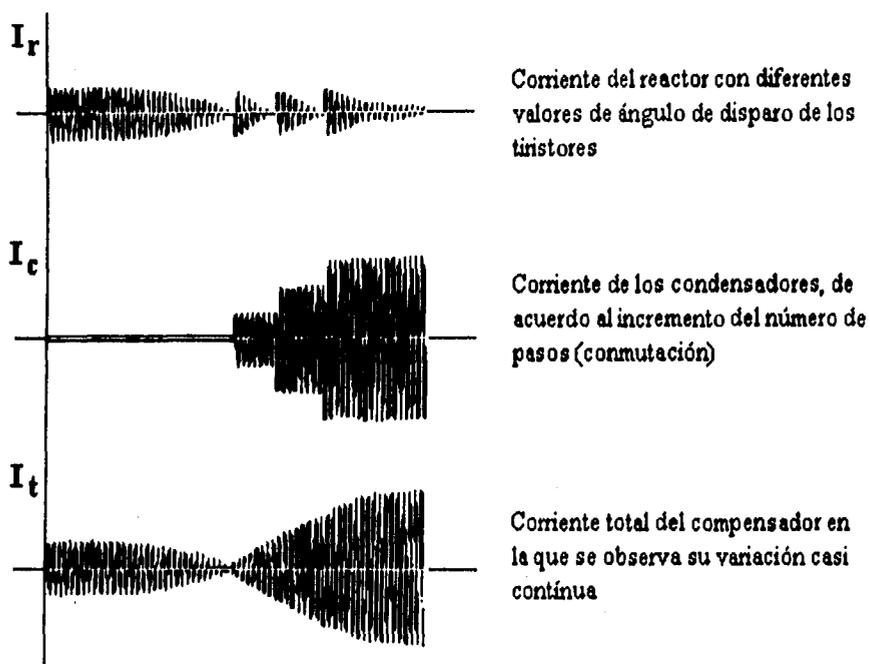


Figura 3.7 Oscilograma de corrientes del CEV.

sin conducir. Para compensar la reactancia inductiva de la línea cuando la carga acoplada a ella es superior a la natural se acopla entonces un reactor y un capacitor y se aumenta la compensación capacitiva controlando el encendido de los tiristores del reactor hasta que sea necesario aumentar o agregar otro capacitor que se acopla nuevamente con el reactor y así, hasta el último capacitor que se tenga disponible en el compensador. Al reducir la carga simplemente se procede a la inversa. A la reactancia que se acopla junto con los capacitores le llamamos reactancia de igualación. En la figura 3.7 podemos ver el resultado de un cambio continuo de la corriente de compensación lograda con este procedimiento coordinado entre el control de la

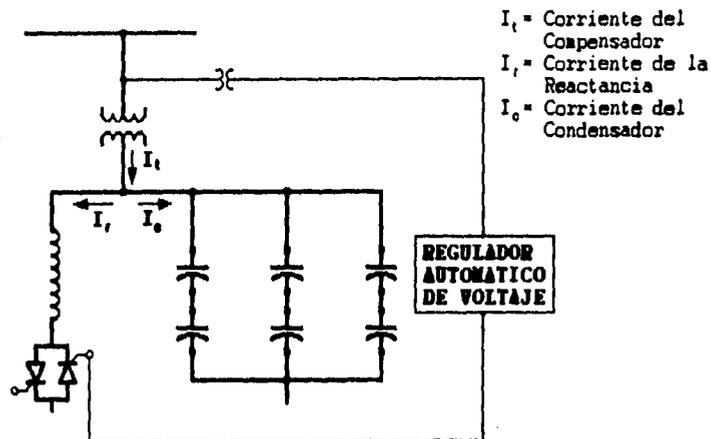


Figura 3.8 Compensador estático tipo RCT/Capacitor fijo

reactancia y los escalones de condensadores.

El tamaño de la reactancia en este tipo de compensadores representa una pequeña parte de la potencia controlable total y por lo tanto las armónicas generadas normalmente son de una magnitud mínima en comparación con la corriente fundamental total, con lo que para fines prácticos podemos considerarlas despreciables. Aún así siempre es necesario reducirlas y esto se logra dividiendo la reactancia en dos o haciendo uso de la conexión de 12 impulsos ya mencionado. Un resultado semejante se consigue con una reactancia controlada con tiristores conectada en paralelo con un condensador fijo, como se ve en la figura 3.8. Esta última solución presenta inconvenientes tales como grandes pérdidas al compensar valores pequeños de potencia reactiva y generación de armónicas de magnitud considerable.

4. OPERACION DEL TIRISTOR

4.1. LA ELECTRÓNICA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

En años recientes la electrónica ha experimentado un gran desarrollo en el campo del manejo de energía (electrónica de potencia) debido a la confluencia de factores como:

- Un avanzado desarrollo en métodos de microelectrónica, lo cual ha permitido la implementación de circuitos integrados lineales y procesadores de señales digitales, que se usan como controladores en sistemas electrónicos de potencia.
- Adelantos importantes en la tecnología de fabricación, que han hecho posible obtener mejoras significativas en los rangos de tensión y corriente de operación de los dispositivos semiconductores de potencia y, algo muy importante, incrementar sus velocidades de conmutación.
- Crecimiento de la demanda de dispositivos electrónicos de potencia tales como: controladores de motores de velocidad variable, alimentación de equipo automatizado a través de servocontroladores, alimentación de equipos de computación y/o sistemas de comunicación que requieren de energía regulada y, muy a menudo, ininterrumpible, etc.
- Incremento en el costo de la energía que ha hecho obligatorio, en todos los sistemas, su uso eficiente y donde los dispositivos electrónicos de potencia ofrecen

una mayor eficiencia en el manejo de energía a un más bajo costo.

En sistemas electrónicos lineales los semiconductores se usan en su región lineal (o activa) de operación, en donde actúan como un resistor ajustable y en la que tienen una eficiencia baja, la cual se tolera por los bajos niveles de energía manejados. En aplicaciones de electrónica de potencia la energía a controlarse se maneja en rangos desde unos cuantos watts hasta varios cientos de megawatts. Aquí, a diferencia de los sistemas electrónicos lineales, los dispositivos semiconductores operan como switches, estando totalmente encendidos o apagados (conduciendo o sin conducir) con lo que se obtiene una eficiencia sustancialmente alta en el manejo de la energía.

Se puede decir, en términos generales, que la tarea de la electrónica de potencia es controlar el flujo de energía configurando el voltaje de suministro por medio de dispositivos semiconductores de potencia; entre éstos el más común es el rectificador controlado de silicio (SCR por sus siglas en inglés) o mejor conocido como tiristor, del cual nos ocuparemos en este capítulo.

4.2. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL RECTIFICADOR CONTROLADO DE SILICIO.

El rectificador controlado de silicio es un dispositivo semiconductor formado por cuatro capas, dos de ellas tipo N y dos tipo P, colocadas alternadamente. Posee tres terminales externas

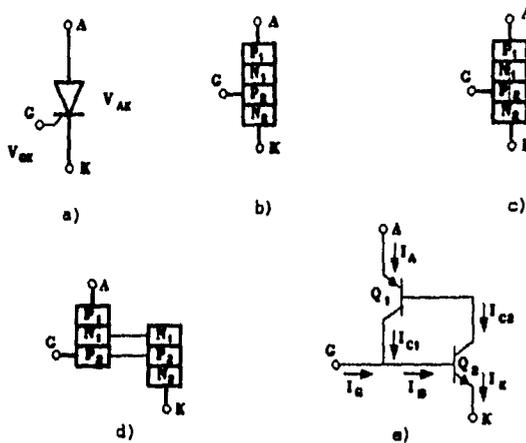


Figura 4.1 a.-Representación, b.-Estructura, c.-, d.- y e.-Modelos a partir de dos transistores. denominadas "anodo", "catodo" y "compuerta". En la figura 4.1. a) se muestra el símbolo del dispositivo y en la figura 4.1. b) la estructura física del mismo. Este dispositivo se parece al diodo rectificador en que requiere una polaridad adecuada para conducir, es decir, que V_{AK} sea positivo. Además de esta condición se requiere aplicar una señal a la compuerta del dispositivo a fin de que éste entre en conducción, si no se aplica la señal de compuerta el SCR permanecerá apagado aún cuando V_{AK} sea positivo. Por otro lado, si V_{AK} es negativo el dispositivo estará apagado aunque se le proporcione una señal a la compuerta.

Para comprender la operación del dispositivo es necesario recurrir al diagrama de la estructura física. Podemos dividir las dos capas centrales del SCR (N_1 y P_2) tal como se muestra en la figura 4.1.c); a continuación separamos la estructura en dos partes, cada una de ellas formada a la vez por tres partes o capas (Fig. 4.1 d), cada parte corresponde entonces, a la estructura de un transistor, de modo que podemos plantear el modelo equivalente de la figura 4.1.e).

Para los transistores del modelo se tiene que la corriente de base de uno es la corriente de colector del otro.

Supóngase ahora que ambos transistores están debidamente polarizados (V_{AK} positivo) pero apagados, si se inyecta una corriente en la compuerta ésta fluye hacia la base de Q_2 , generando en éste una corriente de colector que a su vez es la corriente de base de Q_1 ; aparece entonces una corriente de colector en Q_1 que se suma a la inyectada por la compuerta. El proceso continúa de este modo hasta que los transistores están completamente saturados y cuando esto ocurre el funcionamiento del SCR se hace independiente de la señal en la compuerta, es decir, ésta sirve únicamente para encenderlo.

En términos de corriente se tiene lo siguiente;

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} + I_{CO}$$

donde I_{CO} es la corriente de fuga en la unión común $N_1 - P_2$.

$$I_A = \alpha_1 I_{E1} + \alpha_2 I_{E2} + I_{CO}$$

pero como puede apreciarse del circuito:

$$I_{E1} = I_A \quad \text{e} \quad I_{E2} = I_K = I_A + I_G$$

por lo tanto

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 (I_A + I_G) + I_{CO}$$

de donde se obtiene

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Si $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$ entonces I_A será pequeña porque I_{CO} también lo es; esta condición corresponde a la condición de bloqueo.

Si $(\alpha_1 + \alpha_2)$ se aproximan a la unidad I_A crecerá y estará limitada únicamente por la

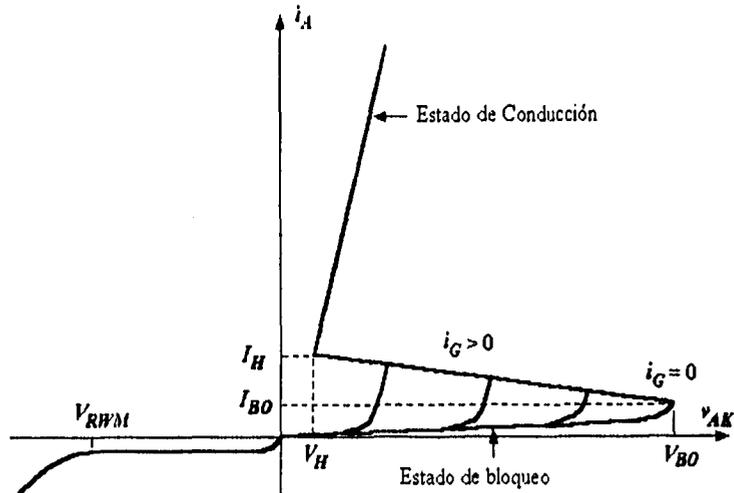


Figura 4.2 Característica Voltaje-Corriente del SCR.

impedancia de carga del SCR; esta condición corresponde al encendido del SCR.

En la figura 4.2 se muestra la característica Voltaje/Corriente del SCR.

Debe notarse que existen varias formas de hacer que $(\alpha_1 + \alpha_2)$ se aproxime a la unidad, estas son:

VOLTAJE. Si V_{AK} excede determinado voltaje ($V_{AK} \geq V_{BO}$) existirá un efecto de avalancha que encenderá al SCR; este efecto limita el voltaje en directa que el SCR es capaz de bloquear.

RAZON DE CAMBIO DE VOLTAJE $d(V_{AK})/dt$ ES MUY GRANDE. La región vacía de la unión $N_1 - P_2$ presenta las características de un capacitor. Si el voltaje ánodo-cátodo varía muy abruptamente entonces fluirá una corriente en la unión y encenderá el SCR.

TEMPERATURA. A altas temperaturas I_{CO} aumenta, esto ocasiona un aumento en las

corrientes de colector tal que $(\alpha_1 + \alpha_2)$ se aproxima a la unidad.

MEDIANTE UN HAZ LUMINOSO. Aplicando un haz luminoso en la unión entre la compuerta y el cátodo puede provocarse la conducción del tiristor, debido a que esta luz puede suministrar la energía suficiente para romper el enlace o enlaces en esta zona, produciendo los portadores minoritarios suficientes para que el tiristor conduzca. Los tiristores que utilizan este tipo de excitación para el disparo son conocidos como "LASCR" (Light Activated Silicon Controlled Rectifiers).

INYECCION DE CORRIENTE DE COMPUERTA. Este es el método normal de encendido; se ha descrito en los párrafos anteriores.

4.3 CARACTERÍSTICA DE COMPUERTA.

La característica de compuerta es la gráfica que determina los valores de V_G e I_G con una corriente de ánodo nula. Esta es, entonces, la característica del diodo de unión $P_2 - N_2$ de compuerta-cátodo correspondiente a un tiristor bloqueado.

Las características de compuerta son muy variadas. El fabricante indica la zona de activación posible en el plano $(V_G I_G)$ donde se localiza la característica de compuerta. Esta región se halla limitada por dos curvas C_1 y C_2 que son las características de corriente y voltaje a temperaturas extremas. Todo esto se esquematiza en la figura 4.3.

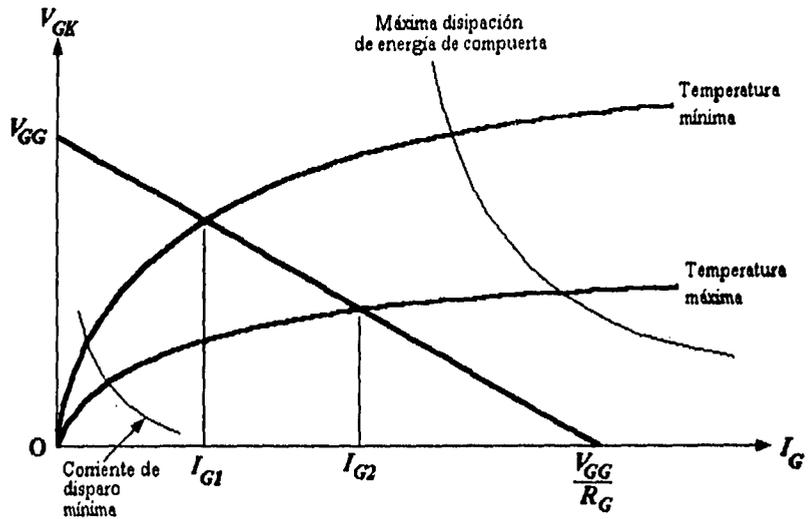


Figura 4.3 Característica de compuerta.

4.4 MÉTODOS DE DISPARO DEL TIRISTOR.

El concepto "Disparo del Tiristor" se refiere a la aplicación de una excitación tal a la compuerta que lleve el dispositivo al estado de conducción. Existen dos formas de excitar la compuerta, éstas son:

- Disparo por aplicación de un voltaje continuo. Se mantiene la excitación en la compuerta durante todo el lapso en el cual el tiristor debe estar encendido, como se muestra en la figura 4.4.a
- Disparo por aplicación de un pulso. La excitación en la compuerta se mantiene hasta que la corriente del tiristor es superior a la corriente de amarre, como se muestra en la figura 4.4.b).

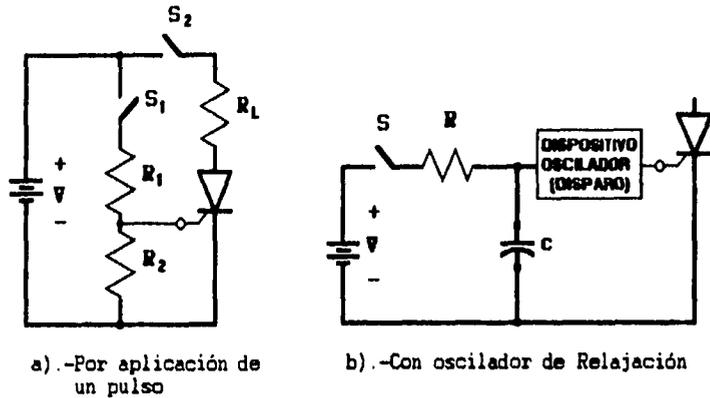


Figura 4.4 Métodos de disparo del tiristor.

Una vez encendido la única forma de lograr que un tiristor recobre su condición de bloqueo es disminuyendo la corriente a través de él a un valor inferior a la corriente de mantenimiento o amarre durante un tiempo superior al tiempo de apagado del dispositivo.

4.5 MÉTODOS Y CIRCUITOS DE BLOQUEO.

Hay distintos métodos para que un tiristor pase de la zona de conducción a la zona de bloqueo y se pueden agrupar, genericamente, en tres grupos:

- Conmutación Natural. Cuando se provoca que la corriente de paso sea inferior a la corriente de mantenimiento, bien sea interrumpiendo su paso con un interruptor, aumentando la impedancia de carga, derivando la corriente en paralelo con él mediante un interruptor o un transistor, etc...como se muestra en la figura 4.5.a).

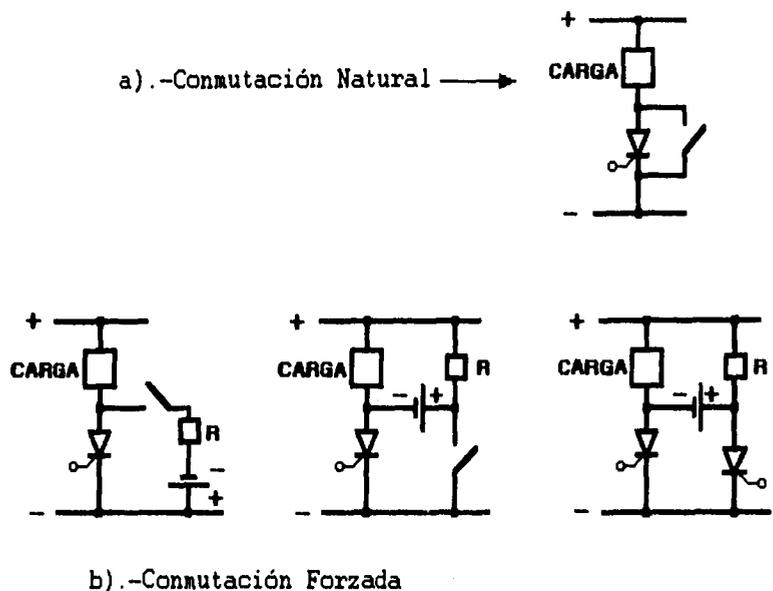


Figura 4.5 Métodos de bloqueo del tiristor.

- Comutación Forzada. Cuando se invierte la tensión entre ánodo y cátodo del tiristor mediante un circuito exterior, como se muestra en la figura 4.5 b).
- Comutación de Línea . Si el circuito está alimentado en alterna, al llegar el semiciclo negativo el tiristor deja de conducir.

4.6 TIEMPOS DE CONMUTACION DE UN TIRISTOR.

4.6.1 TIEMPOS DE ACTIVACION.

Cuando se aplica un pulso de control a un tiristor que tiene una diferencia de potencial

positiva V_{AK} , ésta no decrece inmediatamente. Supongamos que el pulso se aplica cuando $t=0$ y la diferencia de potencial V_{AK} tiene un valor inicial V_0 . Cuando la diferencia de potencial V_{AK} equivalga al 90% de V_0 será el tiempo t_1 y el instante en que la diferencia de potencial V_{AK} se hace igual al 10% de V_0 lo denominaremos el tiempo t_2 . Este es el método para definir la demora o retraso de activación t_1 ; t_2 será el tiempo total de activación y $t_2 - t_1$ el tiempo de descenso de la diferencia de potencial V_{AK} .

Generalmente los fabricantes proporcionan el valor del tiempo de activación t_2 , mismo

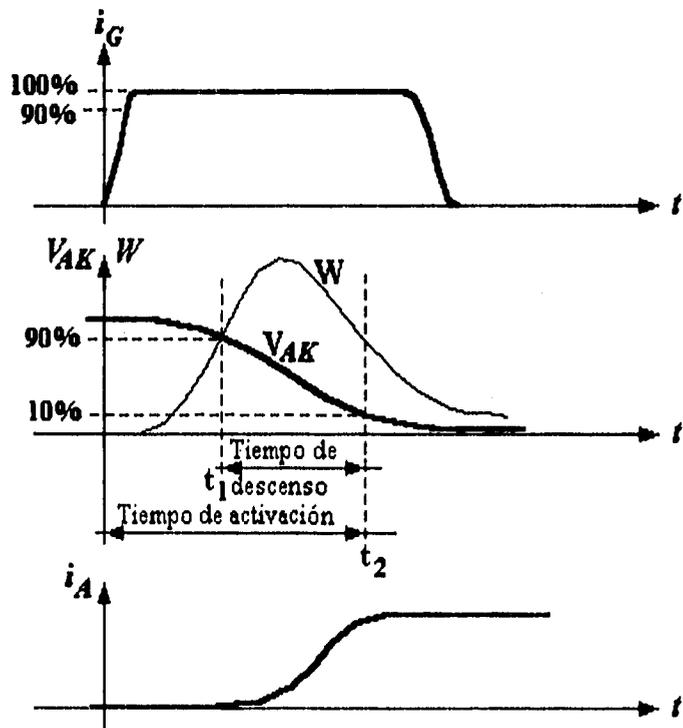


Figura 4.6a Tiempos de conmutación.

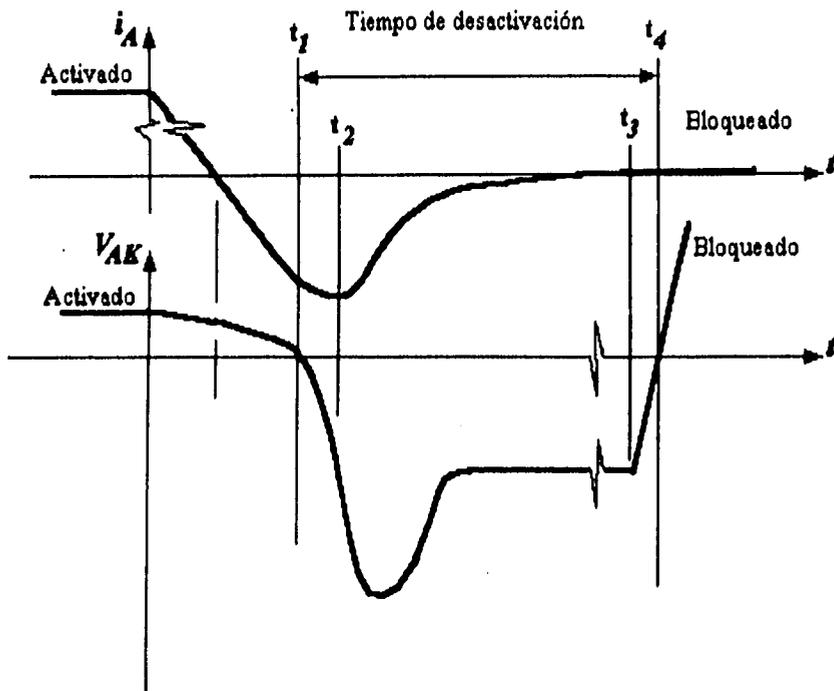


Figura 4.6.b Tiempo de desactivación del tiristor.

que es del orden de unos cuantos microsegundos y depende esencialmente del tiempo de ascenso de la corriente de compuerta y el valor máximo que ésta adquiere. Todo esto se muestra en la figura 4.6.a.

4.6.2 TIEMPOS DE DESACTIVACION.

En lo que respecta a la desactivación de un tiristor (por ejemplo de conmutación forzada), las gráficas de corriente de ánodo y la diferencia de potencial $V_{AK}(t)$ tiene la forma mostrada en la figura 4.6.b. La conmutación se inicia en el instante $t=0$ y la corriente y la diferencia de

potencial V_{AK} disminuye para anularse en el instante t_3 ; el circuito de conmutación impone una nueva disminución de la diferencia de potencial V_{AK} , que se hace negativa. Por tanto se puede comprobar un punto de corriente negativa y después una corriente inversa mientras V_{AK} se mantenga negativa.

En ausencia de cualquier actividad en el circuito de compuerta, el tiristor se mantendrá bloqueado si la diferencia de potencial V_{AK} se conserva en un valor negativo durante un lapso suficientemente largo. En la figura 4.6 V_{AK} vuelve a hacerse positiva en el instante t_4 .

Por definición se da el nombre de Tiempo de Desactivación del tiristor a $t_4 - t_3$. Estos tiempos varían de unos microsegundos para el tiristor de potencia baja hasta un centenar de microsegundos aproximadamente para los tiristores de gran potencia, por lo tanto, la frecuencia máxima de utilización de un tiristor es limitada.

4.7 CONEXIÓN DE TIRISTORES.

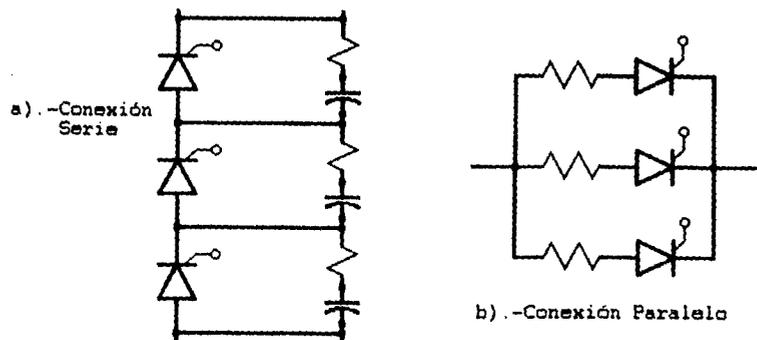


Figura 4.7 Conexiones de tiristores.

Para alcanzar valores altos promedio de corriente en la carga debe recurrirse a la conexión en paralelo de los tiristores, y en serie para alcanzar valores altos de tensión. Ocurre sin embargo que, tanto en la conexión en serie como en paralelo, aún cuando los elementos conectados sean todos originalmente idénticos, sus características presentan ciertas variaciones de unos con respecto a otros debido a las tolerancias constructivas .

4.7.1. CONEXIÓN EN SERIE.

Para trabajar con una tensión elevada conectamos un grupo de tiristores en serie, pero ocurre que al pasar los tiristores del estado de conducción al de no conducción o cuando cambia la polaridad de la tensión a rectificar, no todos ellos dejan de conducir corriente al mismo tiempo, sino que lo hacen con pequeñas diferencias de tiempo y, debido a este fenómeno el elemento que primero impide el paso de la corriente se encuentra con que por unos instantes se aplica en él toda la tensión inversa a rectificar, para la cual no está dimensionado. Para solucionar este problema se recurre a conectar en paralelo con cada elemento rectificador una red equilibradora, cuya misión es la de distribuir equivalentemente la tensión entre ellos; esta red esta formada generalmente por una resistencia y un condensador en paralelo, como se muestra en la figura 4.7.a.

4.7.2. CONEXIÓN EN PARALELO.

Cuando se pretende obtener una elevada intensidad de corriente se conectan los tiristores en paralelo. En esta conexión el problema que se presenta es que en el sentido directo de

conducción no todos los elementos conducen la misma corriente, y se debe también a las pequeñas diferencias que impone la tolerancia en los tiristores de un mismo tipo.

La solución para el problema que presenta la conexión en paralelo de elementos rectificadores es montar estos apareados como si formaran un sólo elemento. El problema se puede solucionar también conectando una resistencia en serie con cada SCR como se muestra en la figura 4.7.b).

También puede intentarse solucionar este problema dotando a los tiristores de elementos de refrigeración cuya acción sea superior a la que teóricamente necesita el elemento, con ello puede evitarse la destrucción de los tiristores aunque se encarezca la instalación.

4.8 PROTECCIONES.

Por su naturaleza los tiristores son inherentemente incapaces de sostener sobrecargas, por esto tendrán que ser dimensionados para las peores condiciones. Como los niveles deseables de seguridad varían de instalación a instalación es imposible dar una completa recomendación para la protección de tiristores, pero se puede tomar en cuenta lo siguiente para optimizar la instalación:

- El grado deseable de la seguridad del sistema.
- La posibilidad de falla.
- La amplitud del voltaje y corriente de falla.
- La economía sobre el diseño.

Mencionaremos las principales fallas y su solución.

4.8.1. SOBRETENSIONES.

Pueden ser causadas por descargas atmosféricas, desconexión brusca de cargas inductivas, por corte del circuito del primario del transformador de alimentación.

El dato más significativo del semiconductor para valorar su capacidad frente a sobretensiones será su tensión inversa de pico no repetitivo, que suele ser del orden de 1.5 a 2 veces la tensión inversa de pico repetitivo.

Los elementos protectores de los semiconductores actúan por disipación de la energía transitoria o bien por almacenamiento de ésta en un condensador y posterior disipación de ella a una velocidad mucho mayor. Algunos de los métodos para proteger de sobretensiones a los tiristores son: la conexión en paralelo con el circuito a proteger de elementos supresores de selenio, que presentan una brusca caída de tensión cuando se sobrepasa su tensión inversa;

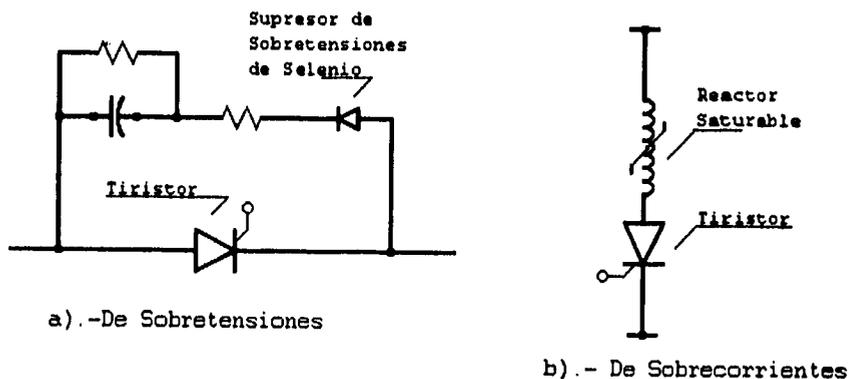


Figura 4.8 Protecciones para los tiristores.

conexión de resistencias no lineales; empleo de redes RC, ya sea en paralelo con cada tiristor o cada rama. En el último caso el condensador almacena energía debido a la sobretensión, descargándose en seguida sobre la resistencia. El circuito se muestra en la figura 4.8.a.

4.8.2. SOBREINTENSIDADES.

Las sobreintensidades actúan de una forma casi instantánea sobre los semiconductores de un sistema, debido a la baja constante de tiempo térmica del orden de un milisegundo, provocando un calentamiento local muy pronunciado.

La protección de sobrecorriente generalmente se basa en cualquiera de los siguientes conceptos o de sus combinaciones:

- Diseño sobredimensionado del tiristor.
- Impedancia de línea limitadora de corriente (ver fig. 4.8b).
- Fusibles de acción rápida.

4.9. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE LA CORRIENTE (DI/DT).

Al producirse la conmutación al estado de conducción, la zona de la pastilla de silicio en que se inicia la conducción es pequeña y crece con el tiempo, si en esta fase el circuito exterior impone un crecimiento rápido de la intensidad, la densidad de corriente puede llegar a ser considerable. Teniendo en cuenta que la tensión entre ánodo y cátodo no disminuye instan-

táneamente, habrá una presencia simultánea de corriente y tensión en una zona pequeña, lo que provoca la disipación de una potencia instantánea elevada y por tanto un calentamiento que puede superar el límite térmico en esta zona, por lo que el silicio se fundirá y el dispositivo quedará destruído por ser di/dt muy elevada; para poder trabajar con altas di/dt es conveniente tomar medidas preventivas.

El método común de protección del tiristor frente a di/dt es el de colocar en serie con éste una inductancia la cual, si es saturable, se comporta como un retardador de corriente hasta que se satura, en cuyo instante circula libremente. Como consecuencia la potencia disipada en la zona de puerta disminuye en ese intervalo. Esta forma de protección se ilustra en la figura 4.8.b).

4.10 CONFIGURACIÓN DE TIRISTORES.

4.10.1. MONTAJE DE AZADA.

La configuración de la figura 4.9 incluye dos tiristores Th_1 y Th_2 en paralelo. La configuración se denomina "DE AZADA" porque:

- El cátodo de Th_1 se enlaza al ánodo de Th_2 .
- El cátodo de Th_2 se enlaza al ánodo de Th_1 .

así se obtiene que la tensión V_{AK} de Th_1 es igual a la tensión $-V_{AK}$ de Th_2 . Como un tiristor solo se puede excitar cuando la diferencia de potencial ánodo-cátodo es positiva, entonces únicamente un tiristor conduce. El circuito de control envía pulsos de corriente a las compuertas de cada tiristor.

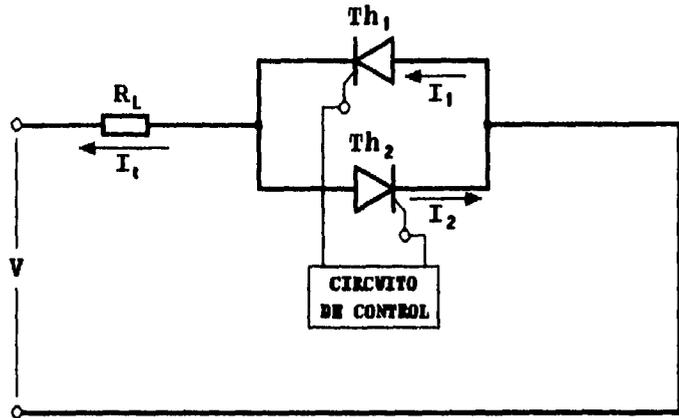


Figura 4.9

4.10.2. MONTAJE EN TRIAC.

Es posible simplificar la configuración anterior (figura 4.9) utilizando un TRIAC, que equivale a un tiristor bidireccional. El símbolo del TRIAC, además de su característica

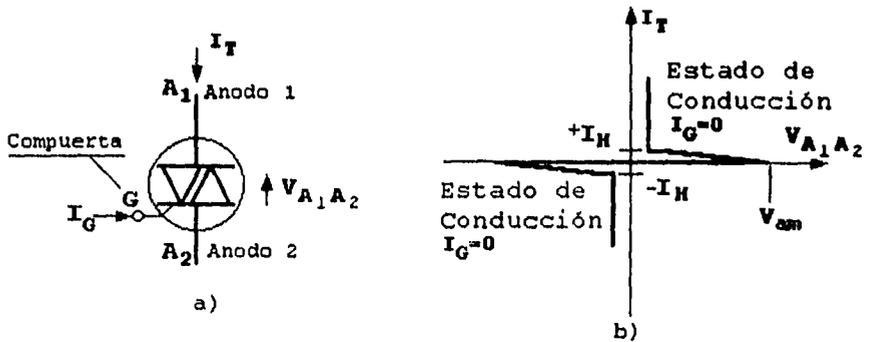


Figura 4.10

estacionaria se ilustra en la figura 4.10.

La excitación del TRIAC se realiza enviando un impulso de corriente I_G sobre su compuerta, como en el caso de un tiristor. Sin embargo, mientras el tiristor sólo se excita cuando V_{AK} es positiva con I_A circulando del ánodo hacia el cátodo, el TRIAC puede conducir en ambos sentidos y se puede excitar cualquiera que sea la polaridad de la diferencia de potencial V_{A2-A1} .

La excitación de un TRIAC se puede comprender con ayuda de la figura 4.11. Esta configuración lleva un diodo bidireccional denominado DIAC cuya característica de corriente y voltaje se muestra en la figura 4.12.

Cuando V es positivo el capacitor se carga a través de R_U y R por lo que V_C aumenta. Cuando V_C alcanza la diferencia de potencial de excitación del DIAC éste se excita y el capacitor C se descarga a través del DIAC, el impulso de corriente excita al TRIAC y $V_R \approx V$ (si la diferencia de potencial V_{A2A1} del TRIAC conductor es muy débil en relación con V). Cuando V

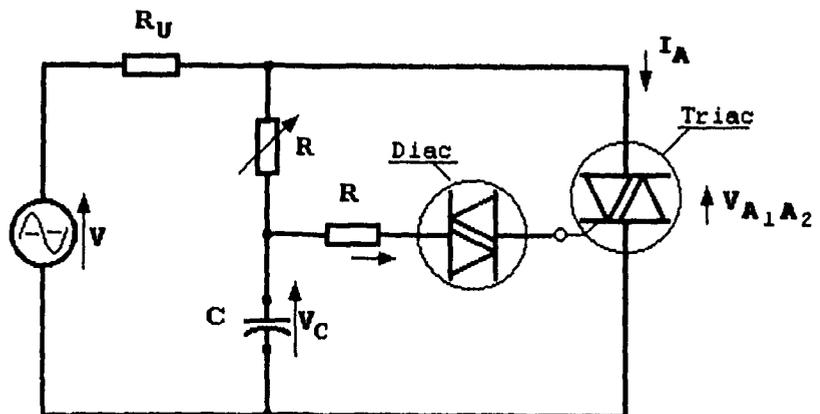


Figura 4.11

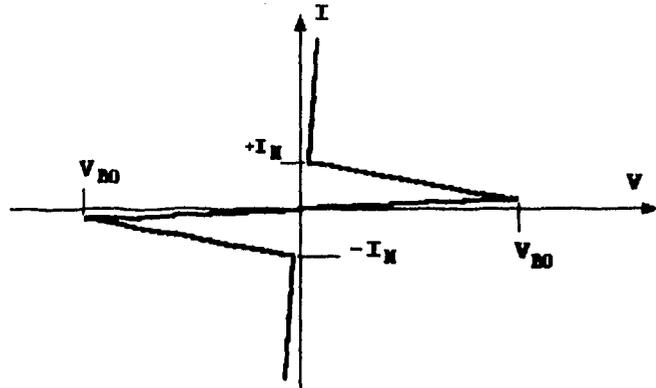


Figura 4.12

se anula y se hace negativo el TRIAC se desactiva por conmutación natural, a continuación el capacitor se carga y V_c se hace cada vez más negativo; cuando V_c en magnitud sobrepasa el voltaje de excitación del DIAC, éste y el TRIAC se excitan $V_R \approx V$ es negativo; se regresa al estado inicial y el capacitor C se descarga en el TRIAC, por consiguiente se obtiene una diferencia de potencial alternante en las terminales de la carga. Para ajustar el valor eficaz de V_R se puede modificar el tiempo de conducción del TRIAC durante cada alternancia cambiando la constante de tiempo $\tau = (R + R_v)C$ de carga del capacitor. Por ejemplo, una disminución de R implica una carga más rápida de C , una excitación más temprana y un valor eficaz más grande.

5. GENERACION Y CONTROL DE ARMONICAS.

5.1. GENERACIÓN DE ARMÓNICAS POR COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA.

Así como en un sistema eléctrico hay dispositivos que generan potencia reactiva también existen otros que producen corrientes distorsionadas con respecto a la forma de onda senoidal pura, con un alto contenido de armónicas; ejemplo de dispositivos que generan armónicas son los convertidores estáticos de energía, hornos de arco eléctrico y los compensadores de potencia reactiva. De éstos últimos los más interesantes son los capacitores conmutados por tiristor y los reactores controlados por tiristor, que analizaremos en seguida.

5.1.1. COMPORTAMIENTO DE LOS CAPACITORES CONMUTADOS POR TIRISTOR (CST).

El banco de capacitores en paralelo está dividido en pequeños pasos que se conmutan, es decir, se conectan o desconectan individualmente por tiristores bidireccionales; cada pequeño paso de este tipo de compensador está integrado por dos elementos importantes, el capacitor C y el conmutador TY como se muestra en la figura 5.1.a. y además se puede ver un elemento menor el cual es un reactor, cuyo propósito es limitar la corriente a través del tiristor y evitar la

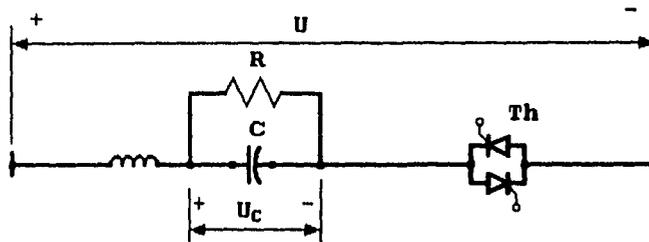


Figura 5.1.a

resonancia con la red.

En la figura 5.1.b se puede observar el funcionamiento de este compensador. Primero se determina conectar los capacitores en el instante cuando ocurre el paso natural por cero de la

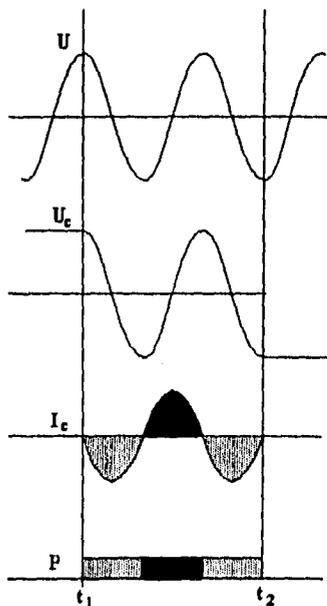


Figura 5.1.b

corriente haciendo coincidir la tensión de la red con la tensión del capacitor, siendo éstos puntos de preferencia en los valores pico. La desconexión de los capacitores implica la suspensión de los pulsos de encendido para los tiristores, los cuales se deberán apagar también en cuanto la corriente sea cero. En principio los capacitores deberán permanecer cargados al valor pico positivo o negativo del voltaje y estar preparados para una nueva conexión, pero como por razones de seguridad éstos están provistos de una resistencia de descarga R lentamente perderán su carga, por lo que para

mantenerla se les proporciona un pequeño pulso de encendido cuando el voltaje es igual al voltaje del capacitor cargado. Una característica importante que se observa por la forma de ejecutar la operación de este compensador es la No Generación de Armónicas.

5.1.2 COMPORTAMIENTO DEL REACTOR CONTROLADO POR TIRISTORES (RCT).

Ahora veamos el esquema básico de un compensador estático del tipo reactor controlado

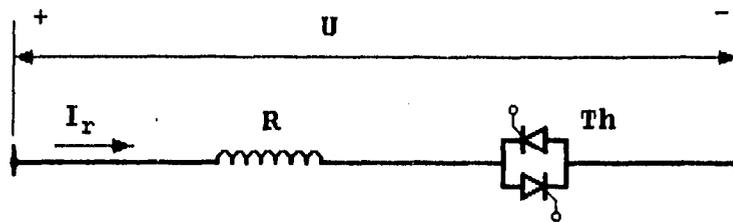


Figura 5.2

(ángulo de fase) por tiristor; cada una de las tres fases incluye un inductor L y un tiristor bidireccional TY, además, en la mayoría de los casos se incluye un capacitor fijo, como se muestra en la figura 5.3. El principio de operación se indicó en la figura 3.3, donde la corriente y, por supuesto, la componente fundamental de ésta se controla por el defasamiento del encendido del tiristor con respecto al paso natural por cero de la misma.

A diferencia del control por pasos del compensador con capacitores en paralelo, el reactor ejerce un control continuo sobre la corriente, siendo ésta una de las características de este tipo

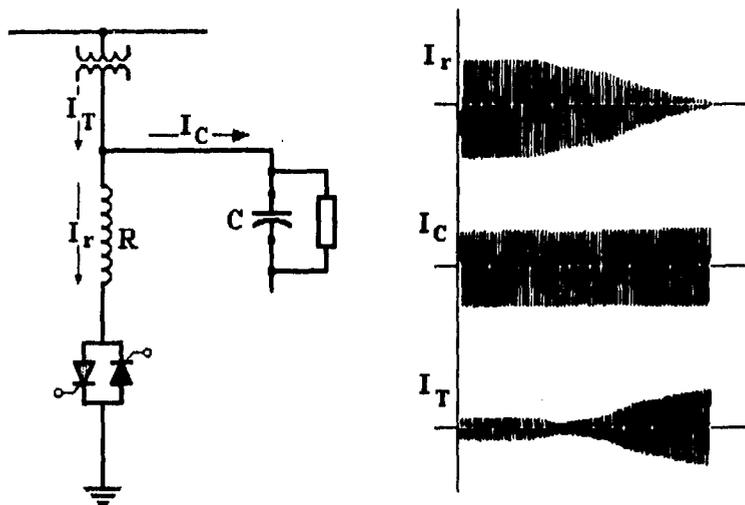


Figura 5.3

de compensador y, además, como algo importante, tiene otra característica: la generación de armónicas.

Tanto los capacitores en paralelo como los reactores controlados pueden combinarse para darnos arreglos de compensadores estáticos con los dos tipos de elementos, siendo la solución óptima la seleccionada después de haber realizado una evaluación de las pérdidas desde el punto de vista económico.

La corriente de un reactor controlado por tiristor (RCT) puede ser controlada desde cero hasta un valor máximo, de acuerdo al diseño del RCT, ejerciendo dicho control sobre el ángulo de fase α que muestra la figura 3.3 y donde se puede observar también la forma de onda que la corriente presenta.

Si $\alpha = 90^\circ$ el tiristor está conduciendo totalmente, por lo que el RCT se comporta como

n	$I_n \text{ máx}/I_o$ %	n	$I_n \text{ máx}/I_o$ %	n	$I_n \text{ máx}/I_o$ %
3	13.8	19	0.35	35	0.10
5	5.1	21	0.29	37	0.09
7	2.6	23	0.24	39	0.08
9	1.6	25	0.2	41	0.08
11	1.05	27	0.17	43	0.07
13	0.75	29	0.15	45	0.06
15	0.57	31	0.13	47	0.06
17	0.44	33	0.12	49	0.05

Tabla 5.1

un reactor paralelo normal. Así también cuando $\alpha = 180^\circ$ el tiristor bloqueará el paso de corriente, manteniéndola en cero. Para otros ángulos de control entre 90° y 180° el tiristor no permitirá el paso de corriente en solo una parte del ciclo y esto dará como resultado una corriente no senoidal como se ve en la figura 3.3.

De la misma figura 3.3 podemos ver que la forma de onda de la corriente es simétrica con respecto a los medios ciclos positivo y negativo, por lo que contendrá únicamente componentes armónicas de orden impar (3a, 5a, 7a, etc.) y cuya amplitud depende fuertemente del ángulo de control α . Esta dependencia se pudo observar en la figura 3.4, donde se muestra la magnitud relativa de la componente fundamental y de las armónicas como una función del ángulo de control. El valor máximo de cada armónica se lista en la tabla 5.1.

Se puede observar en la gráfica que estos valores máximos tabulados no ocurren

simultáneamente para todas las armónicas y, además, son válidos para cada fase en un RCT.

5.2 CONTROL DE ARMÓNICAS EN LOS COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTENCIA REACTIVA.

Para RTC'S trifásicos existen dos formas posibles de conexión, como se indica en la figura 5.4, ambas se comportan de la misma manera vistas desde las terminales de entrada.

Cuando se controlan simétricamente, la generación de armónicas en las tres fases será la misma. Todas las armónicas múltiplo de tres (3, 9, 15, etc.) serán de secuencia cero, por lo que para la conexión a) solo circularán dentro de la conexión delta; para la conexión b) las armónicas múltiplo de tres circularán por las tres fases del RCT y por el neutro del secundario pero en el

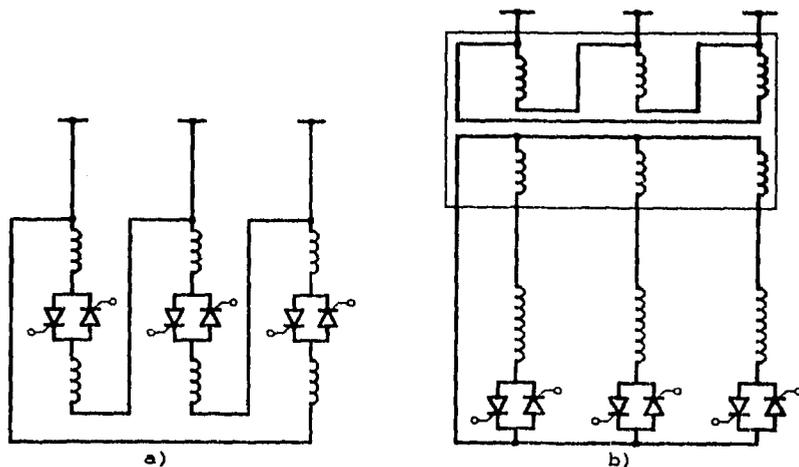


Figura 5.4

primario solo circularán en la conexión delta y no escapan hacia la línea, por lo tanto, teóricamente, no habrá generación de armónicas en un RCT controlado simétricamente.

Sin embargo, en la práctica siempre existirá un ligero desbalance entre fases, lo que producirá una generación de armónicas desbalanceadas resultando pequeñas componentes de secuencia positiva y negativa, las cuales escapan de la delta y se irán por la línea.

Normalmente esto se considera solo para la tercera armónica, que es la de mayor magnitud. Las siguientes son causas que puede producir generación de la tercera armónica:

- a).- Voltajes de línea desbalanceados.
- b).- Diferencia de reactancia entre las tres fases.
- c).- Diferencia del ángulo de control entre las tres fases.

Para las primeras dos la influencia es grande cuando $\alpha = 120^\circ$, donde la tercera armónica es mayor para cada fase. Sin embargo, para la última la influencia es pequeña para el mismo α debido a que un cambio de este ángulo no da un cambio en el ángulo de fase de la tercera armónica, puesto que la corriente es simétrica con respecto al voltaje cero. Además, un cambio en α en la vecindad de 120° no dará un cambio en la magnitud de la tercera armónica por el hecho de que $dI/d\alpha = 0$.

Por otro lado, la simetría entre el medio ciclo positivo y negativo es buena en casos prácticos porque para ambos medios ciclos se presenta el mismo voltaje de fase y la misma reactancia. También porque los ángulos de control normalmente se toman de circuitos PLL (Phase Locked Loop), que son bastante aproximados dentro de una misma fase.

Existen reactores controlados por tiristor con control de fase por fase, en los cuales la tercera armónica residual así como otras componentes son de valor considerable en la corriente

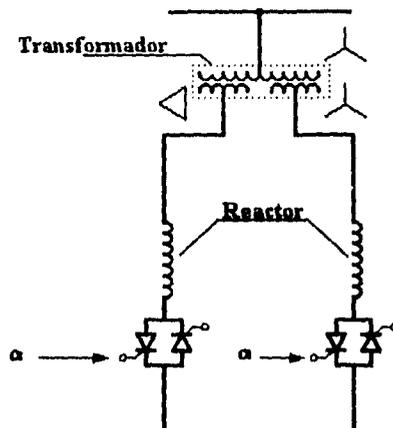


Figura 5.5

de línea. Por ejemplo, el máximo valor de la tercera armónica en la corriente de línea se presentará si una de las fases se controla con $\alpha = 120^\circ$ y otra con $\alpha = 180^\circ$ o $\alpha = 90^\circ$. En este caso la tercera armónica no circulará por la delta, sino que toda fluirá por la línea. Sin embargo debe notarse en este caso que, mientras la corriente máxima de la tercera armónica en la línea es igual a la corriente máxima de la tercera armónica en una fase del RCT, la corriente a plena carga de la línea (en $\alpha = 90^\circ$) es igual a $\sqrt{3}$ veces la corriente a plena carga de una fase de RCT. Esto significa que la componente de tercera armónica en la corriente de línea es $13.8/\sqrt{3} = 8\%$ de la corriente a plena carga.

Una forma de reducir la generación de armónicas en grandes reactores controlados por tiristor (RCT) y un control trifásico simétrico es haciendo la conocida conexión de 12 pulsos, cuyo diagrama esquemático se muestra en la figura 5.5.

Se puede observar que la conexión se hace a través de un transformador que tiene dos secundarios, uno en estrella y el otro en delta, dividiendo así el RCT en dos unidades de 6 pulsos

idénticas. Cada RCT de 6 pulsos con control simétrico tendrá en cualquier ciclo 6 pulsos de control equidistantes defasados 60° y un defasamiento de 30° entre secundarios, por lo que todo el grupo de 12 pulsos tendrá 12 pulsos de control equidistantes defasados 30° , siempre y cuando se dé a cada RCT el mismo ángulo de control.

Por ejemplo, las contribuciones de la quinta y séptima armónica generadas por cada RCT sobre el lado primario serán de igual magnitud pero defasadas 180° , por lo que la suma total será cero. Por otro lado, las contribuciones de la onceava y treceava corriente armónica generada por estos mismos serán de igual magnitud pero defasadas 360° , o más bien estarán en fase, lo que quiere decir que la suma total será el doble de la generada por un solo RCT; para las armónicas 17 y 19, el defasamiento entre las contribuciones de los dos RCT, será de 540° o bien 180° , etc. Lo anterior quiere decir que bajo condiciones de simetría perfecta las únicas armónicas que aparecerán son: 11, 13, 23, 25, y así sucesivamente.

Para compensadores estáticos grandes el reactor controlado por tiristor (RCT) puede dividirse en dos o más unidades iguales, considerando para esto las siguientes técnicas:

- 1) Control de 12 pulsos.
- 2) Control de secuencia (reactor conmutado con tiristor/reactor controlado por tiristor).

El beneficio del control de 12 pulsos ya se ha discutido anteriormente, la quinta y séptima armónica se pueden más o menos eliminar.

Con el control de secuencia un reactor se usa como reactor conmutado, es decir, conduce totalmente o no conduce, y el control continuo de la potencia reactiva se lleva a cabo con el otro reactor, el cual es controlado por el ángulo de fase. Debido a que el reactor conmutado no genera

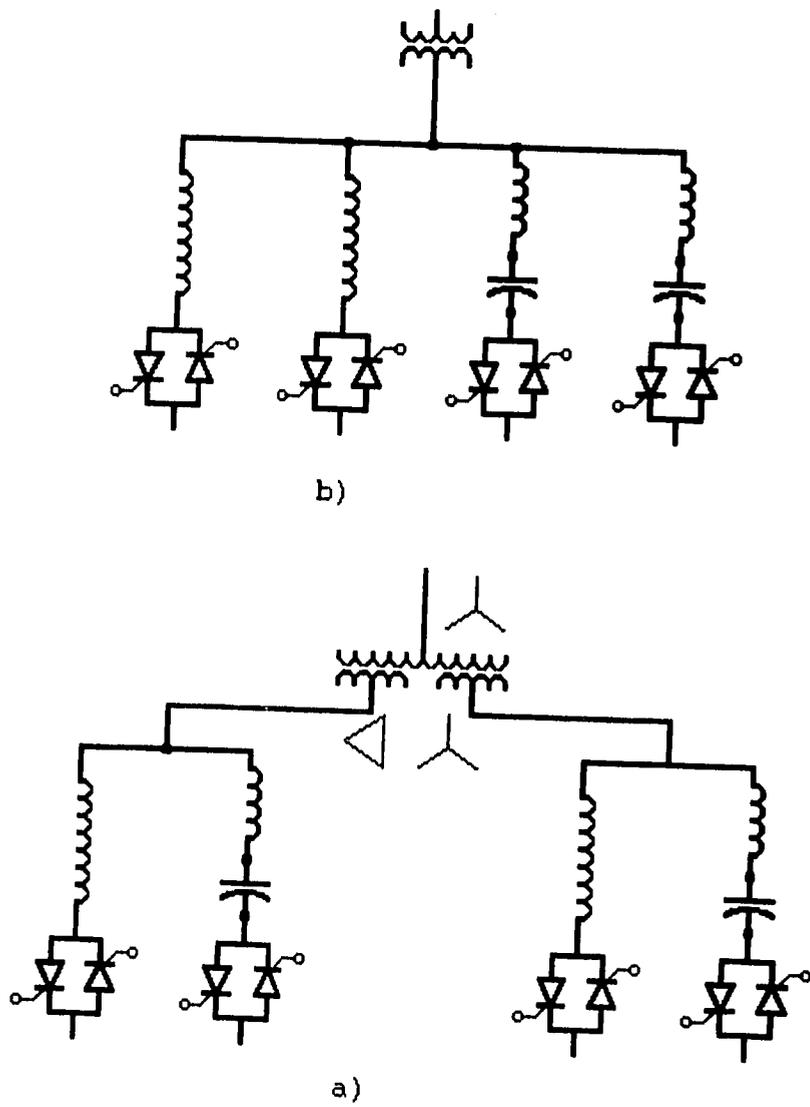


Figura 5.6

ningún tipo de armónica la única que habrá será la producida por el reactor controlado, el cual toma el 50% de la potencia total. Este control de secuencia se puede conseguir conectando ambos reactores al mismo secundario o a diferentes, cuando el secundario es delta-estrella.

Comparado con el control de 12 pulsos las armónicas quinta y séptima en el control de secuencia son mayores, pero la onceava, la treceava y la tercera armónica se reducirán al 50%.

Ya se ha visto que los capacitores y reactores se pueden combinar formando un compensador estático. Las figuras 5.6.a y 5.6.b muestran dos configuraciones posibles.

La configuración (a) solo puede usarse para control secuencial. La configuración (b) se puede usar tanto para control secuencial, como para control de 12 pulsos.

En la región retrasada los capacitores conmutados por tiristor se desconectan y el compensador actúa como un reactor controlado por tiristor ordinario. En la región adelantada, sin embargo, uno o ambos capacitores conmutados por tiristor, al conectarse tendrán influencia sobre el flujo de corrientes armónicas. Lo más importante es eliminar el riesgo de que entren en resonancia los capacitores y la inductancia del transformador debido a las armónicas generadas por el reactor controlado por tiristor, de otro modo, tal resonancia podría amplificar demasiado la corriente armónica en cuestión provocando la sobrecarga de los capacitores aumentando la distorsión del voltaje en el bus primario.

La mejor forma de evitar la resonancia es conectando reactores en serie con los capacitores conmutados por tiristor (CST's), escogiéndolos de tal forma que la frecuencia de sintonización esté ligeramente abajo de la armónica de orden más pequeño generada por el RCT; de esta forma ambos, el transformador y los RCT's, serán inductivos a las frecuencias armónicas peligrosas y por lo tanto no existirá la resonancia.

Debe hacerse notar que aún en la configuración de 12 pulsos (figura 5.6.b) la quinta y séptima armónica están presentes en el lado secundario, por lo que los CST's deben estar sintonizados abajo de la quinta armónica.

En los compensadores CST/RCT con control de fase por fase al menos uno de los CST's debe estar sintonizado para la tercera armónica, con el fin de evitar resonancia a esta frecuencia.

Normalmente los CST's se sintonizan ligeramente abajo de la quinta armónica ($4.5 \times$ frecuencia fundamental), lo que significa que el CST presentará una baja impedancia a la quinta armónica así como a la séptima, lo que quiere decir que servirán como filtros efectivos para la quinta y séptima armónica generadas por el RCT.

Un tipo de control frecuentemente ventajoso es el de 12 pulsos en la región retrasada cuando el CST se desconecta y se controla en secuencia en la región adelantada, usando el CST en el mismo secundario donde está el RCT, como filtro para la quinta y séptima armónica. Es posible entonces, cuando la compensación adelantada es pequeña, contar con un solo CST y un RCT en vez de dos de cada uno como requiere verdaderamente la operación de 12 pulsos. De esta forma las pérdidas pueden reducirse considerablemente en esta región.

5.3. PROBLEMAS DE RESONANCIA POR COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA.

Cuando se instalan capacitores para corregir factor de potencia, siempre existe el riesgo de resonancia entre los capacitores y las partes inductivas de las impedancias de la red. El

problema se puede explicar con el esquema de la figura 5.7.

El voltaje sin carga es la frecuencia fundamental pura y no se tomará en cuenta para cálculos de armónicas. La teoría básica nos dá la siguiente expresión:

$$I_n = I_0 \frac{-X_c}{-X_c + X_n}$$

Puesto que X_n se incrementa y X_c decrece con la frecuencia quiere decir que habrá cierta frecuencia en la que $X_n = X_c$. Esto significa que el denominador en la expresión anterior será

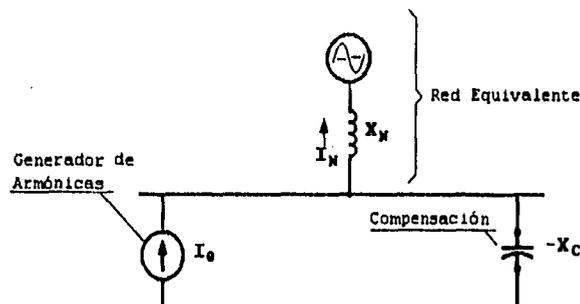


Figura 5.7

cero, dando como resultado una amplificación infinita de la corriente y provocando la resonancia. En realidad existe una resistencia de amortiguamiento que limita la corriente cuando entra en resonancia. El valor máximo de la amplificación de corriente en resonancia depende del tipo de sistema y del grado al que está cargado. En la figura 5.8 se puede observar la amplificación de corriente a diferentes frecuencias para un sistema como el que se analizó anteriormente.

La forma más común de eliminar el riesgo de entrar en resonancia es instalar pequeños reactores en serie con los capacitores, lo que influirá muy poco en la generación de reactivos a

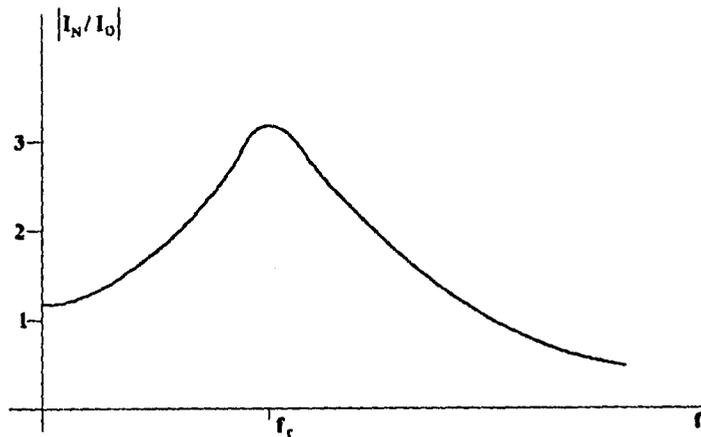


Figura 5.8

la frecuencia fundamental sin embargo, a altas frecuencias, X_n se incrementará y la impedancia del capacitor disminuirá hasta que en cierta frecuencia $X_n - X_c = 0$. A esta frecuencia se le llama frecuencia de sintonización y a frecuencias más altas la impedancia total se hará positiva (inductiva). Escogiendo a f_i abajo de la armónica más pequeña la impedancia de compensación así como la de la red serán inductivas y no se presentará la resonancia.

Abajo de f_i la impedancia de compensación es negativa, de tal forma que se crea un punto de resonancia, pero no se presentará al no haber generación de esta frecuencia. En la figura 5.9 se muestra el caso anterior.

Se debe hacer notar que cuando se instalen capacitores para compensar algo específico es necesario considerar las armónicas de otros elementos conectados al mismo sistema.

Como se puede ver en la figura 5.9 la quinta armónica resultante en la corriente de línea I_n será muy baja si f_i se selecciona para la quinta armónica. En este caso el banco de capacitores se llamará filtro para la quinta armónica.

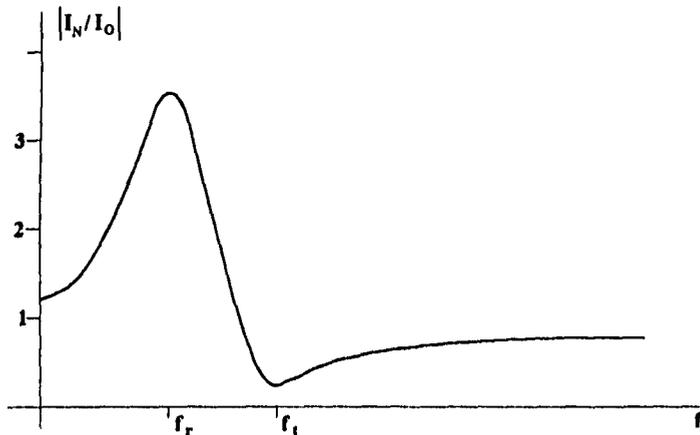


Figura 5.9

La eficiencia de un filtro depende de las dimensiones, de la exactitud en la frecuencia de sintonización y de la exactitud de la frecuencia en la red. Las diferencias entre la frecuencia de sintonización y la frecuencia armónica normal será normalmente del 5 - 6% del valor de sintonización cuando no es posible la sintonización en el sitio necesario, pudiéndose reducir del 2 - 3% si se colocan taps de sintonización en los reactores.

Si se requiere mayor eficiencia en el filtrado el banco de capacitores se puede dividir en pequeños bancos, sintonizándolos a diferentes armónicas. La figura 5.10 muestra un diagrama de amplificación de corriente con filtros para la quinta, séptima y onceava armónica.

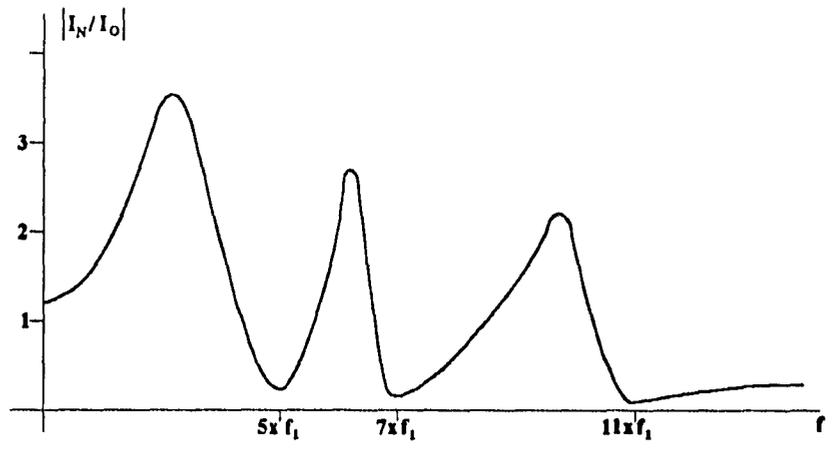


Figura 5.10 Amplificación de la corriente en una instalación con filtro para armónicas 5°, 7° y 11°.

6. CONTROL DE COMPENSADORES ESTATICOS DE VARS

El compensador estático de vars (CEV) es un sistema integrado de componentes eléctricos estáticos (capacitores, reactores, transformadores e interruptores) combinados de tal manera que proporcionan una rápida o continua compensación controlable de potencia reactiva en derivación.

En la figura 6.1 se muestra un esquema simplificado de un CEV típico cuya salida reactiva se varía por medio de los interruptores de tiristor en respuesta a una señal realimentada

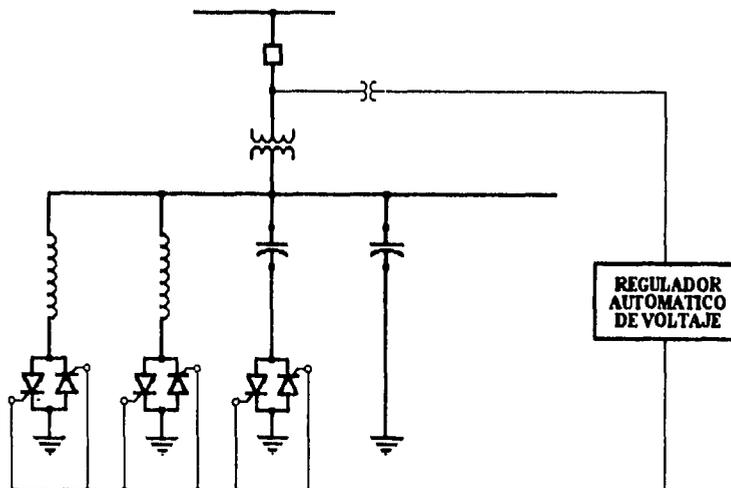


Figura 6.1

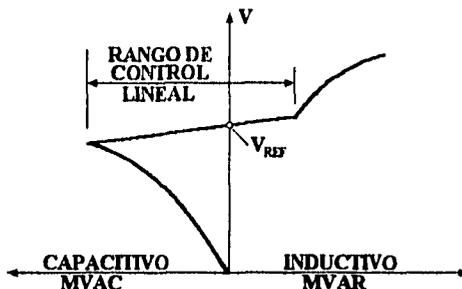


Figura 6.2

de control del regulador de voltaje. Bajo condiciones de régimen estable, la relación entre la salida del CEV y el voltaje del bus de la estación se conoce como la **característica de control de régimen estable del CEV**. En la figura 6.2 se muestra una característica de control típica para un CEV.

6.1 PRINCIPIO DE OPERACION DEL CEV.

En la figura 6.3 se muestra la configuración de un CEV tipo CST/RCT; como sabemos el tipo CST tiene un control escalonado de la potencia reactiva mientras que en el RCT el control es continuo (fino); al tenerse una combinación de estos dos tipos de CEV's se logra un control más preciso de la potencia reactiva, tanto inductiva como capacitiva por medio del RCT.

Considérese arbitrariamente que cada una de las tres ramas de la fig. 6.3 es de 50 Mvars y que el CEV esta operando como reactor (RCT). Si por exigencias del sistema se requieren Mvar's capacitivos la corriente en el reactor empieza a disminuir por acción del control del

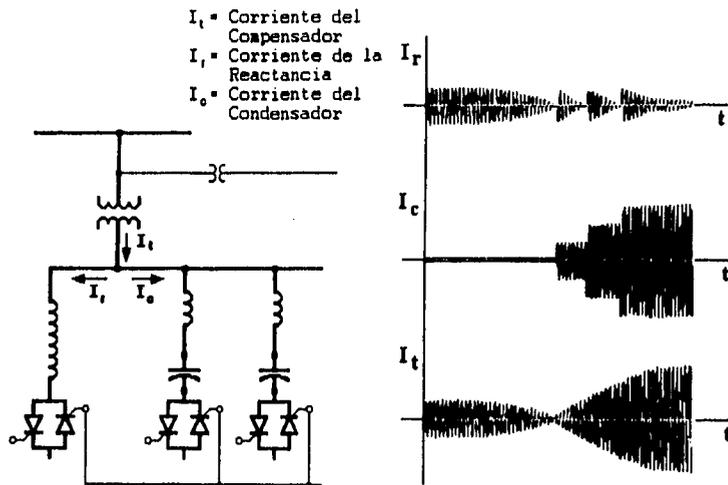


Figura 6.3

intervalo de conducción de los tiristores hasta llegar a cero, un instante después se conecta una rama capacitiva a plena capacidad, entrando simultáneamente a plena conducción el RCT (modo RST) de tal forma que los reactivos netos del sistema son cero. A medida que se requieren Mvar's capacitivos la corriente por el reactor se disminuye paulatinamente hasta que al llegar a cero se tienen 50 Mvar's capacitivos inyectados al sistema, si aún por exigencias del voltaje de operación se requieren más Mvar's capacitivos, la rama del CST y el RCT entran a plena conducción. Para inyectar más potencia reactiva al sistema nuevamente en la rama del RCT la corriente se modula de tal forma que los Mvar's netos capacitivos se vean incrementados. Cuando la corriente por el reactor llega a cero se tienen 100 Mvar's capacitivos netos inyectados al sistema.

6.2 CONTROL.

El Compensador Estático de VAR's, desde el punto de vista de control, es un elemento pasivo cuya susceptancia se modificará de acuerdo al voltaje de la barra controlada.

El problema básico del control es regular el voltaje de la barra mediante la conversión de la señal de error del voltaje en una señal de cambio en el valor de la susceptancia. La figura 6.4 representa en forma esquemática los elementos que integran el sistema de control del CEV en el cual el filtro acondiciona la señal de error del voltaje para evitar que las variaciones de alta frecuencia en el sistema activen la lógica de control, la constante de tiempo del filtro determina

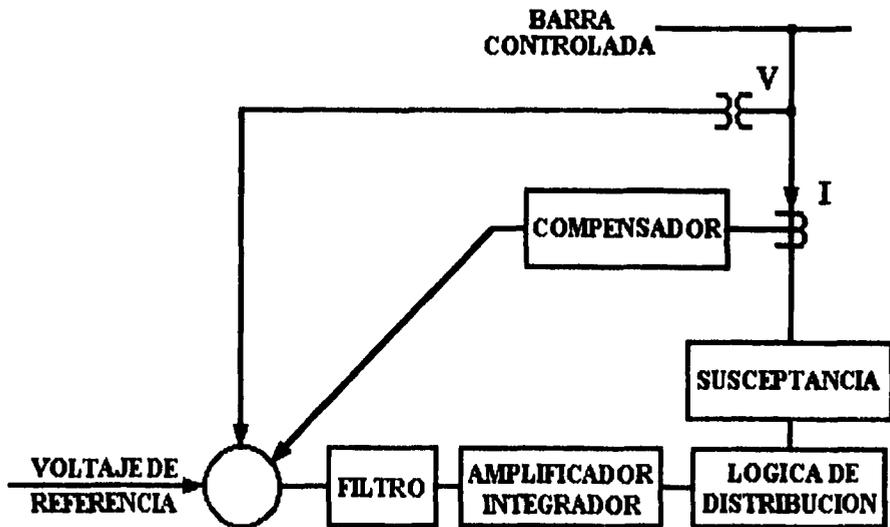


Figura 6.4

el rango de frecuencias que se filtran. En el amplificador integrador se realiza la conversión del error del voltaje en una señal de cambio de susceptancia y acumula (integra) su efecto en el tiempo, la salida de este bloque es la susceptancia que debe presentar el Compensador Estático de VAR's (CEV) al sistema de potencia.

La lógica de distribución se encarga de realizar la asignación de las susceptancias que se tendrán en cada fase de las ramas capacitivas e inductivas y el control de los ángulos de disparo de los tiristores, de acuerdo a las susceptancias de referencia que se obtienen del bloque amplificador-integrador. En la aplicación del CEV en sistemas longitudinales es importante polarizar la señal de referencia de voltaje con la corriente que inyecta el CEV al sistema de potencia, esto se realiza con el bloque compensador mostrado en la figura 6.4, cuyo efecto final

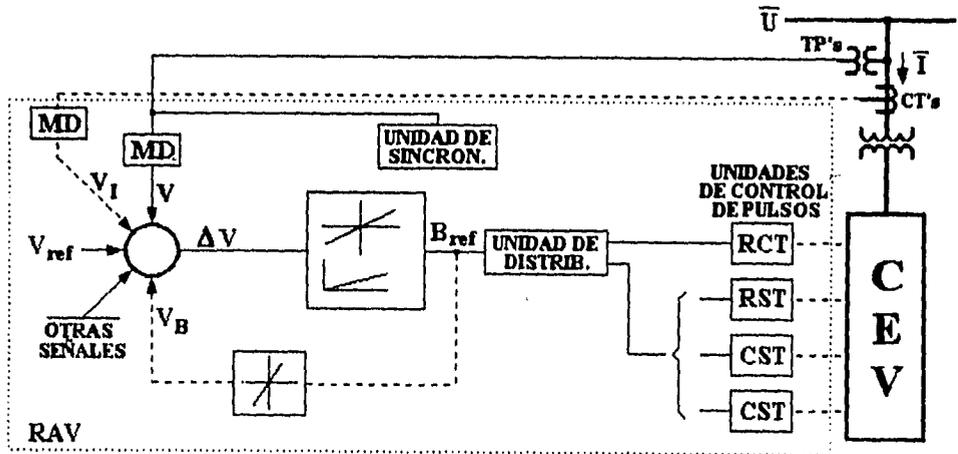


Figura 6.5

es modificar el voltaje a controlar.

En la figura 6.5 se muestra un diagrama detallado del control estático de vars. El voltaje $V_{\text{respuesta}}$ es la entrada principal al regulador automático de voltaje (RAV), esta señal se obtiene de la siguiente manera:

Se toma la señal de una fase del bus a través de los transformadores de potencial T.P. y se lleva a una unidad de medición (MD) donde los voltajes se convierten a un voltaje bajo de corriente directa (señal V), ya que el dispositivo de medición contiene básicamente una unidad acondicionadora de voltaje (adaptadora) de 6 pulsos y un filtro pasabajos con una constante de tiempo de 1.5 mseg. para reducir transitorios rápidos; esto se realiza en las tres fases, obteniéndose de esta manera el $V_{\text{respuesta}}$ para cada una de las tres fases.

El CEV tiene la ventaja de que pueda controlar cada una de las fases, es decir que prácticamente se puede tener un CEV para cada fase, independiente uno del otro. Tomando en consideración que en los sistemas eléctricos de potencia los voltajes en las tres fases en condiciones normales son balanceados, se puede obtener un control simultáneo de las tres fases, con lo que el costo del CEV disminuiría. Esto se realiza de la siguiente manera: se toman las señales de voltaje de bus de las tres fases V_a , V_b , V_c con ayuda de los TP, las señales se llevan a unos rectificadores donde se convierten a un voltaje de DC y las señales ya rectificadas se llevan a un sumador cuya suma es el $V_{\text{respuesta}}$. Los siguientes pasos son los mismos tanto para un control simultáneo de las tres fases como para el control de una sola fase.

La señal $V_{\text{respuesta}}$ junto con la señal $V_{\text{referencia}}$ se llevan a un detector de error, si el voltaje $V_{\text{respuesta}}$ es diferente al $V_{\text{referencia}}$ en la salida del detector de error la diferencia entre las dos señales (señal de error, la cual solo será cero cuando ambas señales sean iguales) se lleva al amplificador,

el amplificador efectúa la amplificación de la potencia de la señal de error actuante (frecuentemente se usa un amplificador con algún circuito de realimentación adecuado para modificar la señal de error actuante amplificándola y a la vez integrándola para lograr una señal de control óptimo), la salida del amplificador-integrador es una susceptancia de referencia B_{ref} para el Compensador Estático de VAR's.

En algunas aplicaciones es deseable tener una cierta inclinación en la característica de V-I, ésta puede obtenerse de varias maneras; por ejemplo, la pendiente puede obtenerse por la realimentación de la corriente del CEV por medio de los transformadores de corriente TC, esta señal se lleva a una unidad de medición donde la señal de corriente se convierte en un voltaje proporcional a la señal de entrada, esta señal se lleva al detector de error junto con las señales $V_{respuesta}$ y $V_{referencia}$.

La unidad de distribución tiene como entrada B_{ref} (susceptancia de referencia) y como salida las ordenes de apagado o encendido del CST y RST, además de la señal de control de los RCT, que en total nos dan $B_{respuesta}$ (susceptancia de respuesta).

La susceptancia total de los CST, RST y RCT se puede controlar desde una susceptancia atrasada hasta una susceptancia adelantada, dependiendo del valor de la susceptancia de referencia $B_{referencia}$ de la siguiente manera:

La señal $B_{referencia}$ se compara con la señal $B_{respuesta}$, la cual es proporcional a la susceptancia de los CST y RST dependiendo si están encendidos o apagados. Si $B_{respuesta}$ es menor que $B_{referencia}$ se da una orden de incremento a la lógica de selector de pasos; si $B_{respuesta}$ es mucho mayor de $B_{referencia}$ se da una orden de decremento a la lógica del selector de pasos. La diferencia entre $B_{respuesta}$ y $B_{referencia}$ después que se ha incrementado o disminuido queda fuera de la lógica

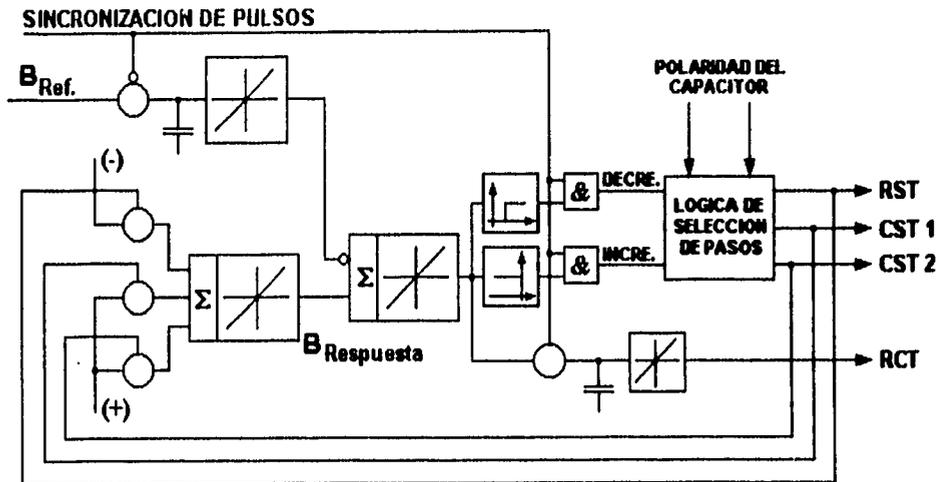


Figura 6.6

del selector de pasos y se proporciona por el RCT; dependiendo del signo de la diferencia entre $B_{respuesta}$ y $B_{referencia}$ es el signo de control del RCT. La orden de incremento o de disminución se transmite a la lógica del selector de pasos justamente antes del tiempo correspondiente al valor pico del voltaje de la onda senoidal, lo cual es posible en el instante de switcheo de los CST y RST. EL momento preciso se asegura mediante un pulso de la unidad de sincronización. La susceptancia $B_{referencia}$ se bloquea por un circuito de muestreo y retención (sample and hold) y el ángulo de control del RCT se muestrea y se aplica en el siguiente medio ciclo. El muestreo del ángulo de control se realiza una vez cada medio ciclo, lo cual deberá hacerse para las tres fases y por lo tanto habrá un total de seis muestreos por cada ciclo, con lo que se elimina la influencia de la sexta armónica en $B_{referencia}$ que se origina en la rectificación de seis pulsos del voltaje de respuesta.

La unidad de distribución se muestra en forma esquemática en la figura 6.6.

6.3 REPRESENTACION MATEMATICA.

Al CEV (Compensador Estático de VAR's) se le puede representar por medio de funciones matemáticas con el objeto de estudiar mejor su comportamiento desde el punto de vista de control.

Las unidades de medición se pueden reemplazar por sus funciones matemáticas equivalentes K_v, K_i ; al filtro pasabajas se le puede representar por la función de transferencia

$$\frac{1}{1+sT_1}$$

de igual forma al amplificador de integración se le sustituye por la representación matemática

$$\frac{1}{sT_2}$$

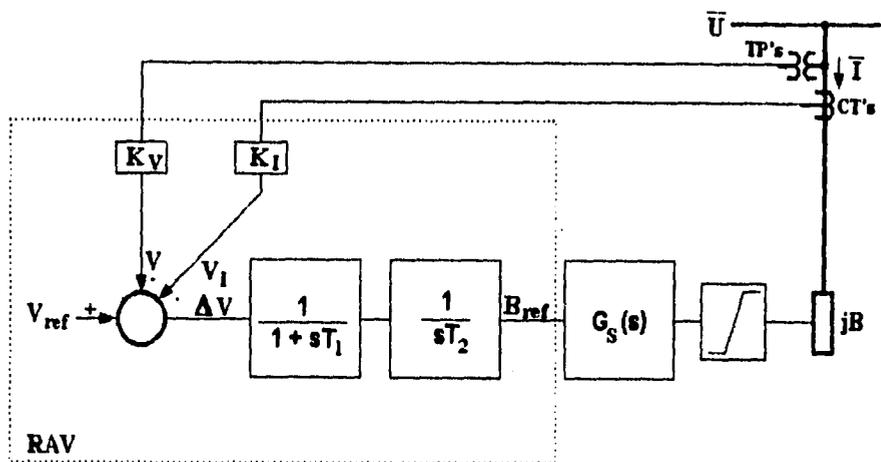


Figura 6.7

y a la unidad de distribución se le puede representar por la función de transferencia $G_c(s)$.

Para una amplificación moderada en el amplificador de integración (el cual da un tiempo de respuesta moderado) la relación entre $B_{\text{referencia}}$ y $B_{\text{respuesta}}$ puede considerarse como lineal y $G(s)$ puede reemplazarse por una constante K_i ; si la amplificación es alta se debe considerar el tiempo de retraso involucrado y por lo tanto $G(s)$ no puede sustituirse por una constante.

7. CONDENSADOR SINCRONO.

7.1 INTRODUCCIÓN.

Los condensadores síncronos han jugado un papel importante en el control de la potencia reactiva durante más de 50 años. Se han conectado tanto en niveles de voltaje de subtransmisión como de transmisión para mejorar la estabilidad y los voltajes dentro de los límites deseados durante condiciones de carga variable, así como cuando se presentan contingencias en el sistema. Por razones económicas las aplicaciones en el área de subtransmisión se han reemplazado por capacitores en paralelo conmutables. Los condensadores síncronos tienen una ventaja inherente sobre los capacitores para soporte de voltaje de emergencia al mantener o incrementar su salida a voltaje reducido. Esto continuamente ha impulsado su instalación en niveles de transmisión donde se requieren grandes capacidades. En los últimos años se han tenido incrementos importantes en el tamaño de los condensadores como se ve en la figura 7.1. Este crecimiento lo ha impulsado el continuo incremento de los niveles de voltaje de transmisión y el correspondiente incremento de la capacidad para transmitir bloques de potencia por circuito. Al mismo tiempo las compañías han encarado, en forma creciente, el diferimiento o cancelación de circuitos planeados; esto ha creado potencialmente situaciones de emergencia más críticas que requieren grandes cantidades de soporte reactivo de emergencia.

Otra aplicación primaria de los condensadores síncronos es en los sistemas de transmisión

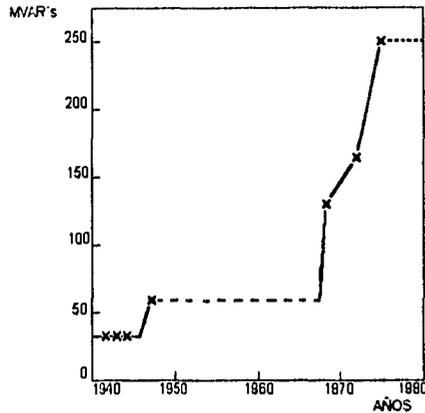


Figura 7.1 Crecimiento de los rangos de Condensadores Enfriados con Hidrógeno.

en alto voltaje en C.D. (HVDC), donde suministran una parte de los requerimientos de potencia reactiva del convertidor y proporcionan el refuerzo necesario por el sistema donde la capacidad de corto circuito del sistema receptor de C.A. es muy baja.

En lo siguientes puntos revisaremos las características básicas y el comportamiento de los condensadores síncronos.

7.2 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL CONDENSADOR.

Funcionalmente, el condensador síncrono es solo una máquina síncrona que se lleva a su velocidad nominal y se sincroniza al sistema de potencia; después que la unidad se sincroniza se controla el campo para generar o absorber potencia reactiva según sean las necesidades del

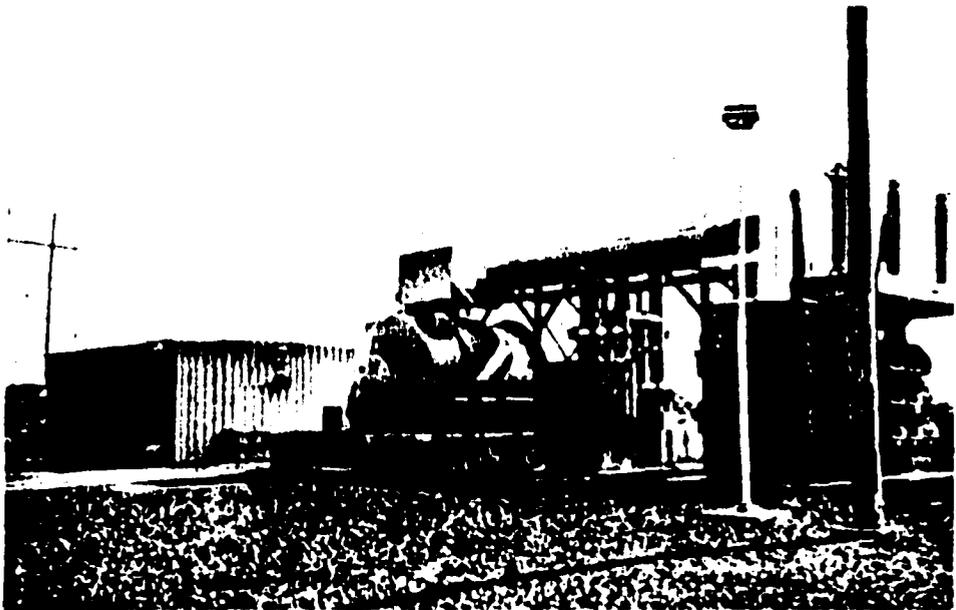


Figura 7.2 Condensador síncrono de 167 MVAR's, 900 rpm enfriado con hidrógeno.

sistema de potencia. El condensador síncrono cae dentro de la clase de condensadores activos en paralelo antes discutidos.

La mayoría de las instalaciones de condensadores síncronos son de diseño intemperie y operan en forma no atendida con controles automáticos para el arranque, paro y supervisión durante su operación. Históricamente han sido usados en forma amplia los condensadores enfriados por aire o hidrógeno;(en los E.U.A. casi todos los condensadores grandes son enfriados con hidrógeno. Aunque existe en servicio una unidad de 345 MVAR'S enfriada por agua).

En la figura 7.2 se ve un condensador enfriado por H_2 de 167 MVAR'S junto con sus principales componentes auxiliares. Además del control automático y el equipo de protección la caseta de control alberga el equipo para el control de excitación y el equipo para el control de

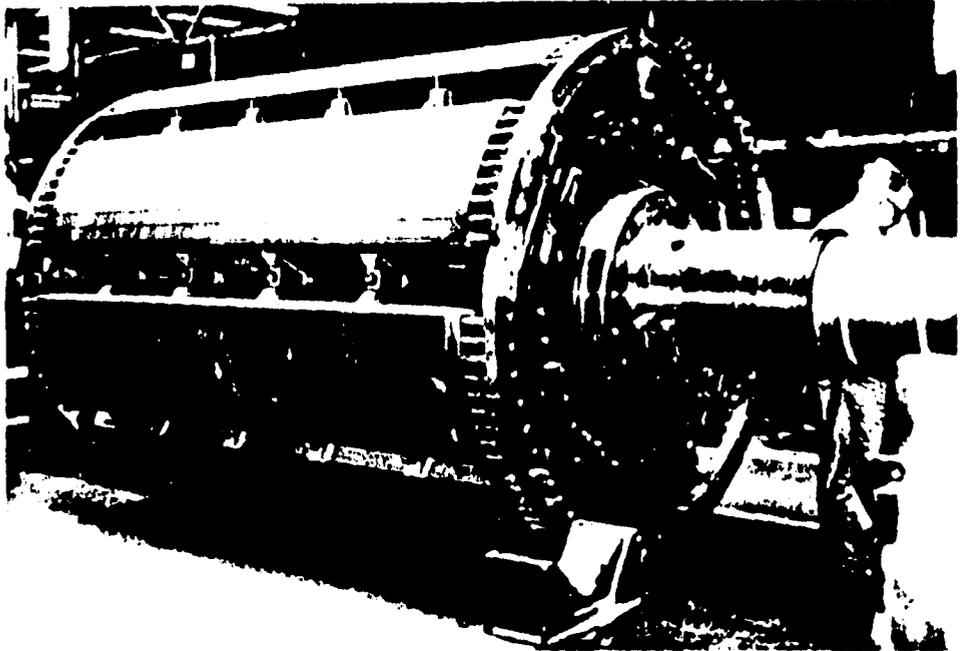


Figura 7.3 Rotor de un condensador sincrónico.

motores.

El condensador se encuentra dentro de un recipiente sellado, que lo hace inherentemente adecuado para instalaciones intemperic. Todos los cables que se requieren en el exterior de la carcasa pasan a través de bushings individuales. Los anillos deslizantes para excitación y para el motor de arranque, si se usa uno, se instalan en un compartimiento separado dentro de la carcasa principal con un sello especial (inflatable) que se usa cuando la unidad está fuera de servicio. Esto permite el cambio de escobillas sin necesidad de purgar el condensador entera.

El área de servicios del condensador - directamente abajo de él - contiene varias auxiliares que incluye el sistema de lubricación, la bomba de alta presión para reducir la fricción durante

el arranque (de levante), el equipo accesorio para el hidrógeno, el equipo de purga del dióxido de carbono y el equipo para conectar el neutro a tierra. La figura 7.3 muestra un rotor del tipo de polos salientes, construcción que se usa en forma generalizada. Las barras amortiguadoras además de proporcionar amortiguamiento a las oscilaciones del rotor proporcionan una trayectoria a las corrientes circulantes del rotor durante el arranque cuando se usa el arranque por voltaje reducido. Para ese tipo de arranque se requiere "amortiguamiento completo" con conexiones interpolares de los grupos de barras amortiguadoras.

Acompañando al incremento de capacidad en los condensadores se ha tenido una gran número de avances fundamentales en el diseño, que incluyen velocidades de operación y presiones de hidrógeno más altas. Los condensadores grandes del tipo mostrado en la figura 7.2 operan típicamente a 900 RPM y 30 lbs/in² de presión de hidrógeno.

En la figura 7.4 se tienen los elementos esenciales de las instalaciones de un condensador síncrono. Aquí se incluyen las conexiones al sistema y a los sistemas auxiliares que discutiremos después. Un elemento básico es el equipo de control de excitación que, en gran medida, determina el comportamiento del condensador en el sistema de potencia. Esto se hace simplemente con un regulador de voltaje como en el control de excitación de la mayoría de las plantas generadoras. Un disturbio severo del sistema trae como consecuencia voltajes anormales a los que responde o trata de corregir el condensador y su control de excitación. La señal de voltaje se puede tomar de las terminales del condensador, como se muestra en la figura 7.4, o del bus de transmisión. Cuando se usa la señal directa del bus de transmisión generalmente se requiere de alguna caída de voltaje en el circuito de control para proporcionar una operación estable. En la figura 7.4 la caída se proporciona en la reactancia del transformador elevador y

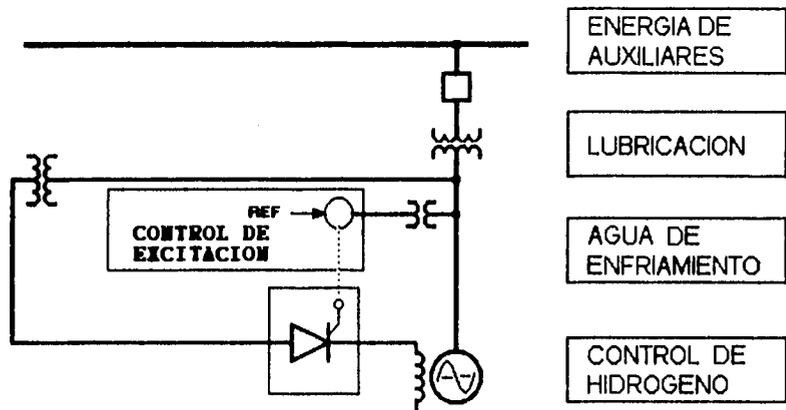


Figura 7.4 Sistemas Auxiliares Principales del Condensador.

puede aumentarse o disminuirse con el control.

Las pérdidas totales a plena carga del condensador incluyendo sus auxiliares son del orden del 1% de la capacidad nominal y aproximadamente 2/3 de ellas son función de la carga.

7.3 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS BÁSICAS.

7.3.1 CONSTANTES DE MÁQUINA

Los valores típicos de las principales constantes eléctricas se dan en la tabla 7.1 junto con las de turbogeneradores e hidrogeneradores para su comparación; la reactancia y las constantes

Constante	Turbo-Generador		Hidro	Condensador Sincrono
	2/polos	4/polos		
X_d	2.0	2.0	.01	2.0-2.5 pu
X'_d	0.22	0.33	0.32	0.35-0.45 pu
X''_d	0.16	0.22	0.21	0.25-0.30 pu
T'_{d0}	4	9	5-10	9-10 seg
H	2.5	4	3-6	1.2 kW-seg/kVA
X_q	2	2	0.6	1.2-1.6 pu
X_p (reactancia de Potier)				0.30-0.40

TABLA 7.1 Constantes Típicas de Máquina.

de tiempo son similares a las de los turbogeneradores de 4 polos; la constante de inercia H , -la cual es una característica sin importancia relativamente para un condensador - es mucho más pequeña puesto que no está conectado a turbina.

7.3.2 DIAGRAMA FASORIAL.

El diagrama fasorial para un condensador es muy simple porque, excepto por una pequeña corriente de pérdidas la cual puede ser despreciada, el total de la corriente está en cuadratura con el voltaje terminal ya sea atrasada o adelantada. La figura 7.5 muestra la relación fasorial correspondiente a las dos direcciones de flujo de potencia reactiva; desde una condición sin carga, un incremento de excitación (es decir. operación "sobrecargada ") genera potencia reactiva hacia el sistema (figura 7.5 a)). Se muestra también la correspondiente relación fasorial basada en la

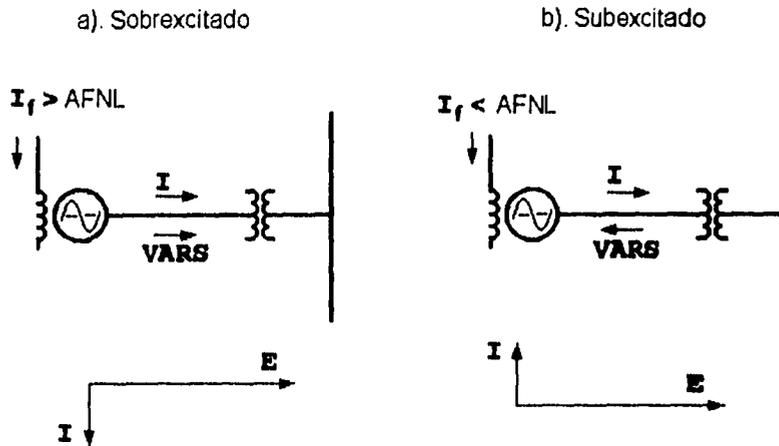


Figura 7.5 Definiciones básicas de excitación y flujo de Potencia Reactiva.(AFNL es Excitación sin Carga).

convención normalmente aplicada para generadores. El flujo de potencia reactiva hacia el sistema con operación sobreexcitada es exactamente como la que produce un capacitor paralelo. Un decremento en la excitación desde la condición sin carga (es decir, operación subexcitada) absorbe potencia reactiva del sistema con la relación fasorial mostrada en la figura 7.5 b), exactamente como la que absorbe un reactor paralelo.

La figura 7.6 muestra un diagrama fasorial más completo para operación sobreexcitada; el voltaje E_1 representa la corriente de campo en por unidad, despreciando la saturación y E_f la corriente total de campo derivada como se muestra. Puesto que la corriente del condensador es únicamente reactiva, la curva de capacidad reactiva del generador convencional no es aplicable, y otras curvas tales como la curva V se usan para describir la operación del condensador.

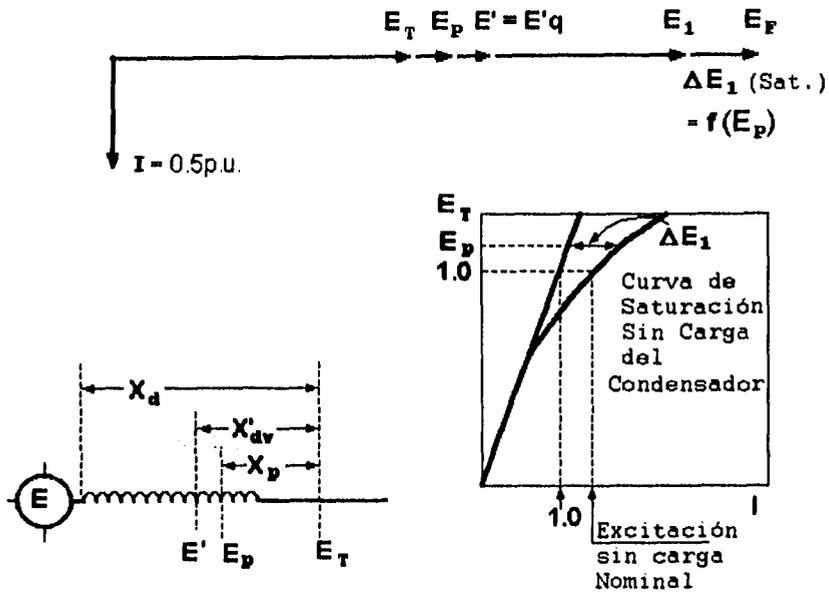


Figura 7.6 Diagrama fasorial para operación sobreexcitada.

7.3.3 CURVA V

Un condensador síncrono proporciona ajuste continuo de la potencia reactiva en ambas regiones: sobreexcitada y subexcitada. En la región sobreexcitada hay dos capacidades de placa, una continua y otra de sobrecarga de tiempo corto. Las características de operación de estado estable se muestran por una curva V, como la de la figura 7.7. La porción del lado derecho de la curva V representa la operación sobreexcitada, como para un banco de capacitores paralelo. La porción izquierda de la curva V representa operación subexcitada, en la cual la máquina está absorbiendo potencia reactiva del sistema, como para un banco de reactores para-

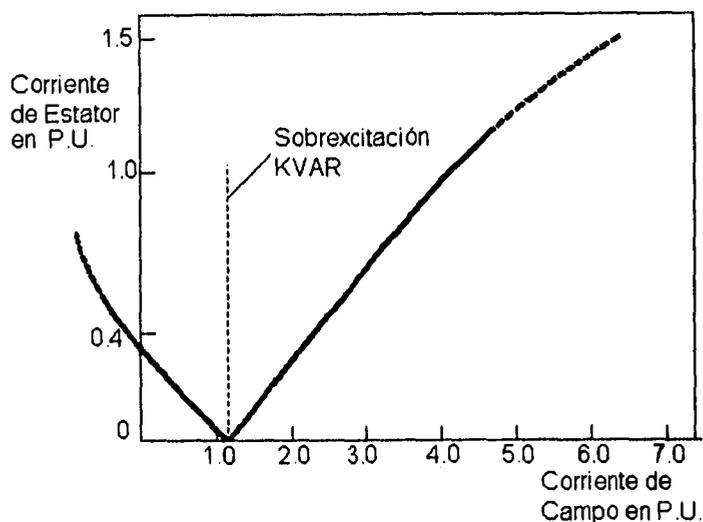


Figura 7.7 Curva V del Condensador. La corriente de campo base (1.0 pu) como se definió en la figura 7.6.

lelo. La operación normal continua puede estar en cualquier punto sobre la curva abajo de 1.0 p.u. de la corriente nominal de estator. La parte punteada a la derecha representa operación de sobrecarga momentánea obtenida por un incremento en la excitación.

La capacidad del condensador subexcitado se obtiene operando con corrientes de campo por abajo de excitación en vacío. Como se indica en la figura 7.7 esta operación puede en teoría extenderse aún dentro del rango de corrientes de campo negativas; la operación en corrientes de campo negativo (dentro de límites) es posible sin deslizamiento de polos a causa del par de reluctancia asociado con la construcción del rotor de polos salientes. La condición límite donde un polo podría deslizarse en operación de estado estable ocurre en la figura 7.7 en aproximadamente un 0.6 P.U. de corriente reactiva subexcitada correspondiendo a E_f/X_d . Un excitador tipo

conmutador de CD puede invertir su polaridad para proporcionar corrientes de campo negativas y muchos condensadores en servicio tienen inherentemente esa capacidad. Un sistema de excitación estático convencional (tiristor alimentado de transformador) no puede proporcionar corriente invertida uniforme aún cuando tendrá capacidad plena de invertir el voltaje para forzar el campo durante transitorios. Este sistema estático permite operar hasta un valor mínimo del 10% del voltaje de excitación requerido para operar en vacío. Típicamente esta capacidad subexcitada (como se muestra en la figura 7.7) está cercana al 35-40% de sus condiciones normales. Se puede proporcionar un excitador estático con capacidad de corriente negativa agregando un puente de tiristores adicional a los controles asociados, de tal modo que la capacidad subexcitada de un condensador se puede incrementar hasta su límite de estabilidad.

7.3.4 EQUIVALENTES SIMPLIFICADOS.

Mientras que la "curva V" mencionada usualmente describe la operación normal, no es de mucha ayuda para condiciones de operación no usuales donde por períodos cortos de tiempo los voltajes no son normales. Para un análisis del comportamiento en esta situación se pueden utilizar programas de computadora de estabilidad transitoria. Para propósitos de estimación, sin embargo, un circuito equivalente simple consistente de un voltaje atrás de una reactancia de máquina como en la figura 7.8 puede ser útil para comprender el desempeño de la máquina en situaciones de contingencia, y proporciona una forma de comprobar resultados de computadora.

Por ejemplo, con el condensador funcionando a la mitad de su potencia nominal como en la figura 7.7, considere una condición de emergencia del sistema repentina, resultado de la pérdida de líneas críticas o generación, lo cual reduce el voltaje en el bus de transmisión en la

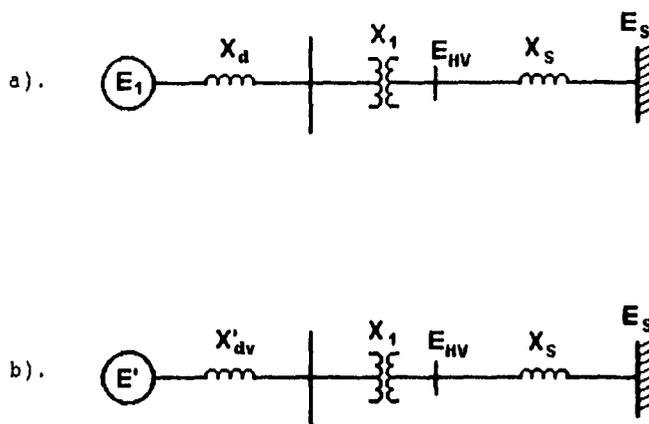


Figura 7.8 Equivalente Simplificada para estimación del comportamiento. (a) Estado Estable. (b) Transitorio.

localización del condensador a un 70%. Suponiendo los valores de reactancia de la banda inferior de la tabla 7.1 y un 10% de reactancia de transformador, la respuesta inmediata del condensador (despreciando los primeros ciclos) podría ser un incremento brusco en corriente reactiva de salida hasta de 113% de la corriente normal del condensador. La respuesta subsecuente es una función de la acción del sistema de excitación; para el mismo disturbio los capacitores paralelo experimentarían una reducción drástica de corriente.

Suponiendo un caso correspondiente con la misma capacidad nominal disponible pero en capacitores paralelo conmutados la corriente reactiva podría ser solo el 80% de la nominal. Esto muestra que al comparar las alternativas para suministrar potencia reactiva durante emergencias, es importante considerar las capacidades del equipo derivadas de los estudios del sistema que demuestren mejoras equivalentes más que simplemente las capacidades nominales.

conmutador de CD puede invertir su polaridad para proporcionar corrientes de campo negativas y muchos condensadores en servicio tienen inherentemente esa capacidad. Un sistema de excitación estático convencional (tiristor alimentado de transformador) no puede proporcionar corriente invertida uniforme aún cuando tendrá capacidad plena de invertir el voltaje para forzar el campo durante transitorios. Este sistema estático permite operar hasta un valor mínimo del 10% del voltaje de excitación requerido para operar en vacío. Típicamente esta capacidad subexcitada (como se muestra en la figura 7.7) está cercana al 35-40% de sus condiciones normales. Se puede proporcionar un excitador estático con capacidad de corriente negativa agregando un puente de tiristores adicional a los controles asociados, de tal modo que la capacidad subexcitada de un condensador se puede incrementar hasta su límite de estabilidad.

7.3.4 EQUIVALENTES SIMPLIFICADOS.

Mientras que la "curva V" mencionada usualmente describe la operación normal, no es de mucha ayuda para condiciones de operación no usuales donde por períodos cortos de tiempo los voltajes no son normales. Para un análisis del comportamiento en esta situación se pueden utilizar programas de computadora de estabilidad transitoria. Para propósitos de estimación, sin embargo, un circuito equivalente simple consistente de un voltaje atrás de una reactancia de máquina como en la figura 7.8 puede ser útil para comprender el desempeño de la máquina en situaciones de contingencia, y proporciona una forma de comprobar resultados de computadora.

Por ejemplo, con el condensador funcionando a la mitad de su potencia nominal como en la figura 7.7, considere una condición de emergencia del sistema repentina, resultado de la pérdida de líneas críticas o generación, lo cual reduce el voltaje en el bus de transmisión en la

FALTA PAGINA

No 99 a 100

correctos, o para controlar adecuadamente el intercambio de potencia reactiva con las regiones vecinas. Los bancos de capacitores paralelo conmutados y los bancos de reactores paralelo se usan comunmente para el control del voltaje en transmisión, y la habilidad de lograrlo es una función del tamaño de los pasos de conmutación.

Los condensadores sincronicos tienen una gran ventaja técnica en este papel en el que ellos:

- 1.- Proporcionan potencia reactiva ajustable continuamente, lo que permite un estrecho control de los voltajes de transmisión.
- 2.- Tienen la capacidad de proporcionar tanto potencia reactiva inductiva como capacitiva cumpliendo con los requerimientos de (1).

7.4.2. SUMINISTRO DE POTENCIA REACTIVA DE EMERGENCIA.

La habilidad de proporcionar control de voltaje en emergencias durante disturbios importantes del sistema es, probablemente, el incentivo principal más reciente para la aplicación del condensador. Esta necesidad se presenta durante contingencias tales como la ocurrencia de una falla y pérdida repentina de transmisión ó generación importante. En casos extremos esto puede provocar la pérdida o aislamiento (división) del sistema.

Los trastornos mayores del sistema se caracterizan generalmente por voltajes fuera de lo normal, al menos inicialmente. Pueden ocurrir voltajes extremos en cualquier dirección, particularmente donde queda un área aislada. Los condensadores sincronicos bajo control de reguladores de voltaje cambian automáticamente su salida en la dirección adecuada para oponerse a la desviación del voltaje. La figura 7.9 muestra la salida momentánea de potencia reactiva de

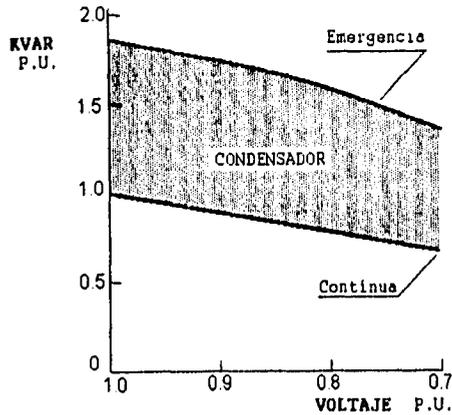


Figura 7.9 Soporte de Potencia Reactiva de Emergencia.

emergencia con voltaje reducido disponible en una instalación. Como se observa, los condensadores tienen capacidades momentáneas en exceso de los rangos de placa. Típicamente pueden tener una capacidad del 150% de la corriente nominal por 1.0 min. En operación real la salida del condensador es por supuesto, una función del voltaje del sistema y el tope máximo de excitación disponible mas bién que los parámetros asignados. La figura 7.10 ilustra el efecto del límite (cielo) del sistema de excitación sobre la respuesta del condensador a un abatimiento del voltaje del sistema. En este ejemplo se supone un cambio brusco del 1.0 al 0.8 p.u. del bus de alto voltaje. Para condiciones extremas del sistema ocurre automáticamente una salida muy alta del condensador y es importante, por lo tanto, que el diseño del control proporcione una protección adecuada de sobrecargas para un rango de condiciones amplias tanto para el devanado del estator como del rotor. La reducción de la corriente de campo a su valor nominal por un límite de excitación máxima no es suficiente para garantizar la protección de la bobina del estator que aún

podrá estar considerablemente sobrecargado.

El período de tiempo durante el cual se puede disponer de la capacidad de sobrecarga del condensador durante una emergencia del sistema es el adecuado para permitir el recierre de circuitos de transmisión y la acción de algunos controles de generadores. Por ejemplo, las turbinas de gas y algunas unidades hidráulicas en un modo de reserva de capacidad conectada pueden levantar su capacidad total en cuestión de menos de un minuto. El recierre de línea automático usualmente se inicia dentro de los 10 - 20 seg.

La importancia de suministrar soporte de reactivos en una área de carga en el extremo receptor del sistema de transmisión se muestra en la figura 7.11. Esto ilustra la importancia de soporte de reactivos en el extremo receptor para me-

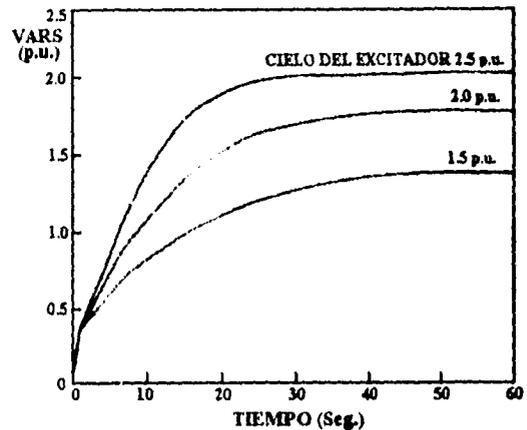


Figura 7.10 Comportamiento transitorio del condensador sincrónico. Techo del excitador en pu del voltaje del excitador a carga plena.

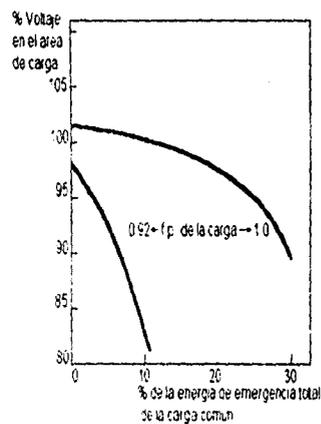


Figura 7.11 Transferencia de Energía en Reserva.

jorar la capacidad de la red de transmisión para importar potencia dentro de un área con deficiencia de generación.

7.4.3 MINIMIZACIÓN DE OSCILACIONES TRANSITORIAS

El uso de compensación reactiva paralelo en estaciones de conmutación intermedia es uno de los medios de mejora de la estabilidad transitoria de generación remota. Los condensadores síncronos y compensadores estáticos controlados pueden contribuir para mejorar la estabilidad transitoria en estos casos; además de las condiciones de estabilidad un voltaje anormal en áreas

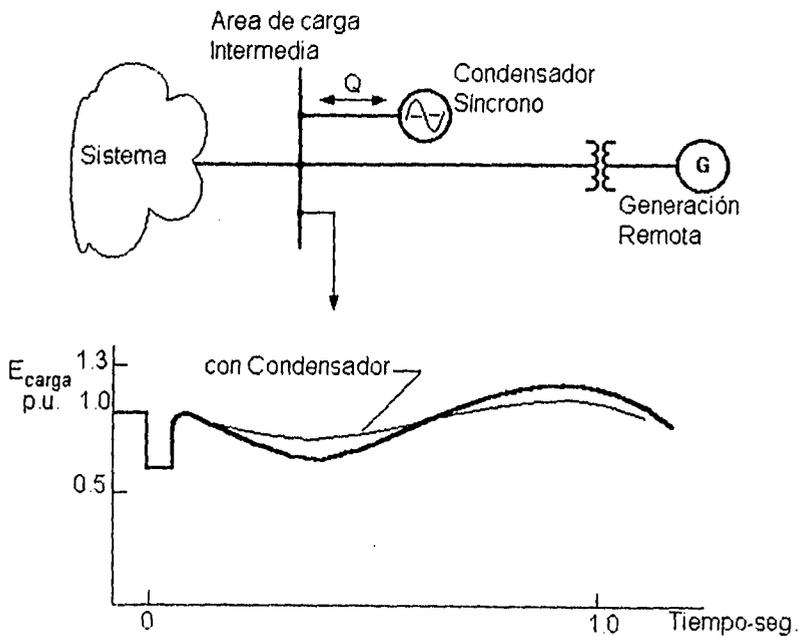


Figura 7.12 Oscilaciones de voltaje en el área de carga después de un disturbio transitorio.

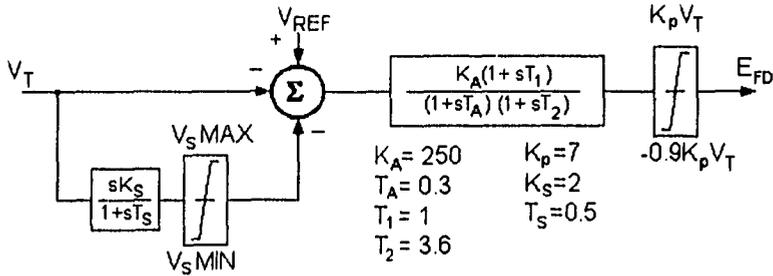


Figura 7.13 Representación para computadora del sistema de excitación. Sistema de excitación estática alimentada de bus.

de carga intermedia acompañado de oscilaciones transitorias puede también ser un problema. La situación ilustrada en la figura 7.12 muestra la aplicación de un condensador para reducir oscilaciones de voltaje que se presentan después de una falla. Un condensador síncrono tiene una constante de tiempo de campo muy grande, sin embargo, para que la ayuda sea efectiva durante oscilaciones de voltaje transitorio, el sistema de excitación deberá equiparse con un control suplementario que suministre una señal de error proporcional a la relación de cambio del voltaje.

Esta función de comando compensa el

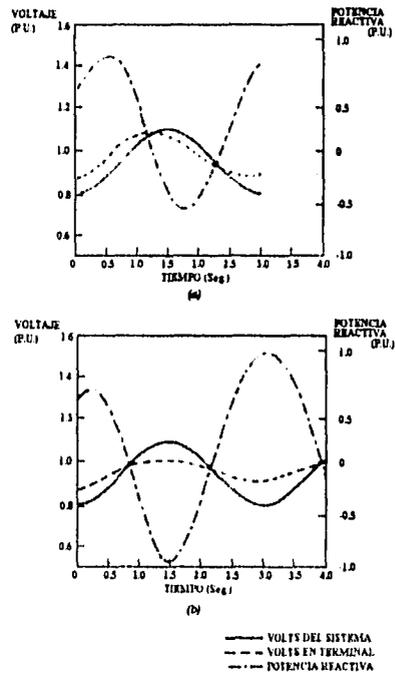
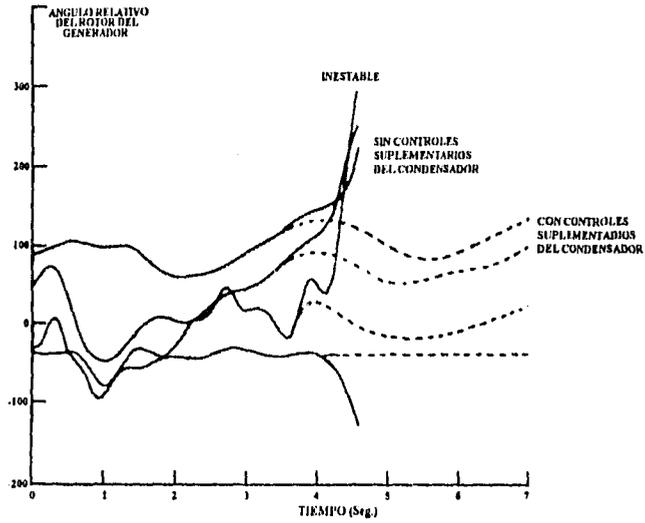
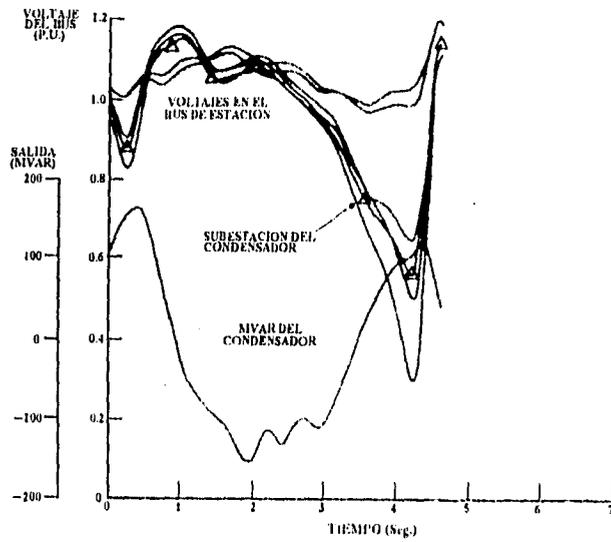


Figura 7.14 Comportamiento del condensador síncrono durante variaciones en el voltaje del sistema. (a) Sin control suplementario. (b) Con control suplementario.

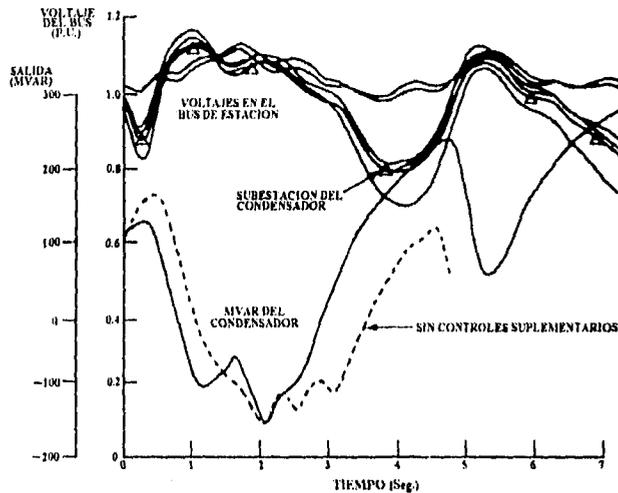


(a) ANGULO DEL ROTOR DEL GENERADOR



(b) COMPORTAMIENTO SIN CONTROLES SUPLEMENTARIOS DEL CONDENSADOR

Figura 7.15 Incremento de la estabilidad durante transitorios del sistema usando condensador síncrono con controles suplementarios en el regulador de voltaje.



(c) COMPORTAMIENTO CON CONTROLES SUPLEMENTARIOS DEL CONDENSADOR

Figura 7.15 (continúa).

atraso de fase inherente en el condensador, de tal modo que la salida reactiva está en fase con los requerimientos transitorios. La figura 7.13 muestra una función estabilizadora agregada al modelo de la representación de la excitación para computadora. La figura 7.14 muestra la efectividad del control suplementario en la mejora del comportamiento del condensador para una oscilación cíclica simulada en el voltaje del sistema.

La necesidad de un control suplementario en el regulador de voltaje para obtener los máximos beneficios de un condensador durante oscilaciones en transitorios se demuestra más específicamente en los estudios de estabilidad de un sistema interconectado muy grande. Un ejemplo de resultados de simulación se muestra en la figura 7.15. El sistema de suministro de energía se caracteriza porque las unidades de generación importantes se encuentra alejadas al área

de carga; al ocupar un lugar entre generadores ampliamente separados las áreas de carga están sujetas a variaciones de voltaje muy grandes durante oscilaciones transitorias. Un condensador síncrono de 140 MVAR se usa para suministrar control de voltaje y ayudar a mantener la estabilidad transitoria durante disturbios. El caso particular mostrado es para una falla trifásica de 3.5 ciclos en un circuito importante de la red de alto voltaje, la cual resultó en inestabilidad transitoria del sistema. A pesar de agregar el condensador con un sistema de excitación estático de techo alto, este caso se comportó como inestable sin el control suplementario. La razón de esto es el retraso en el control del regulador de voltaje. La figura 7.15 muestra la corrección de fase y el incremento de la salida en MVAR suministrado por el control suplementario, lo que conduce a mantener la estabilidad del sistema.

Enfatizando un punto anterior con respecto a la capacidad de bajo voltaje inherente al condensador, es interesante observar en este ejemplo práctico que a pesar de una reducción de voltaje cercana al 80% en la localización del condensador la salida en MVAR'S es substancialmente superior a su valor nominal.

7.4.4 APLICACIONES EN SISTEMAS DE ALTO VOLTAJE DE CORRIENTE DIRECTA (HVDC).

La figura 7.16 muestra el uso de condensadores síncronos en el extremo receptor de una línea de CD de alto voltaje. En esta aplicación el condensador satisface diferentes necesidades.

- 1.- Suministra una parte de los requerimientos de potencia reactiva del condensador.
- 2.- Permite al control del convertidor de CD mantener un control aceptable del voltaje de CA donde la capacidad de corto circuito del sistema sea baja.

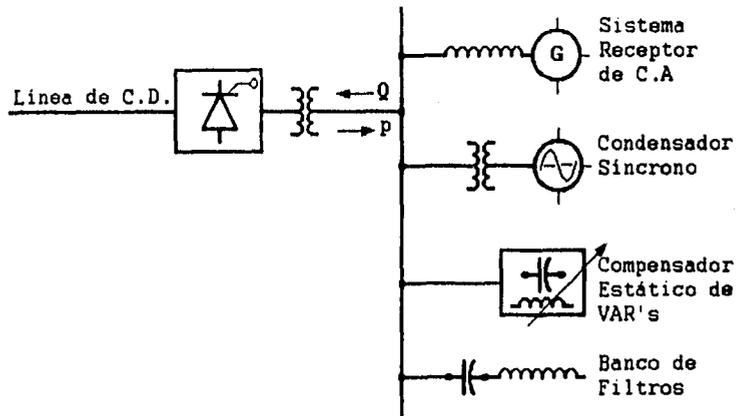


Figura 7.16 Aplicaciones de Condensadores Síncronos en AVCD.

Cuando el sistema receptor no cumple por sí mismo con los requerimientos de corto circuito la capacidad adicional de corto circuito de un condensador síncrono puede hacer frente a esta necesidad tan bien como suministrar una parte de los requerimientos de reactivos del proceso de inversión. De los suministros de potencia reactiva disponible, el condensador tiene la habilidad única de proveer estabilidad de voltaje en corto tiempo en el rango de subtransitorios. Una condición extrema es el bloqueo repentino del enlace de C.D. por falla franca, lo cual resulta en una pérdida total de la carga de potencia reactiva del convertidor y una elevación instantánea correspondiente en el voltaje del sistema de corriente de C.A. Estas consideraciones establecen que la capacidad del condensador requerida tanto para una operación aceptable con el consumo normal y los requerimientos de reactivos post-subtransitorios, se suministren de la manera más económica. Se dispone de un bloque fijo de potencia reactiva en los bancos de capacitores asociados con los filtros de armónicas. Generalmente un compensador controlado provee potencia

reactiva controlada adicional. Con un sistema receptor de C.A. robusto, esto es, un nivel alto de corto circuito; el total de los requerimientos reactivos variables pueden proveerse del sistema o de capacitores paralelo conmutados.

7.5 MÉTODOS DE ARRANQUE.

Los métodos de arranque prácticos para grandes condensadores síncronos incluyen voltaje reducido, motor de arranque y arrancador estático. Arranque a tensión plena o arranque a través de la línea generalmente no se usan para grandes condensadores a causa de la magnitud de la caída de voltaje del sistema y también a la severidad de esfuerzos en el condensador. Generalmente el arranque no es frecuente, las unidades se desconectan únicamente cuando se requiere por mantenimiento; además el tiempo de arranque generalmente no es crítico, 15 - 20 min. es aceptable.

7.5.1. MOTOR DE ARRANQUE.

Este método usa un motor de rotor devanado con un par menos de polos que el condensador principal para acelerar la unidad a la velocidad nominal y sincronizarla a la línea. Tiene la ventaja de eliminar cualquier caída de voltaje en el sistema, también como los esfuerzos en el estator o en el devanado amortiguador durante el arranque. Hay también un respaldo considerable de experiencia con este método de arranque el cual se ha usado extensamente tanto para condensadores síncronos como para unidades hidráulicas y bombeo. Se usa un motor de

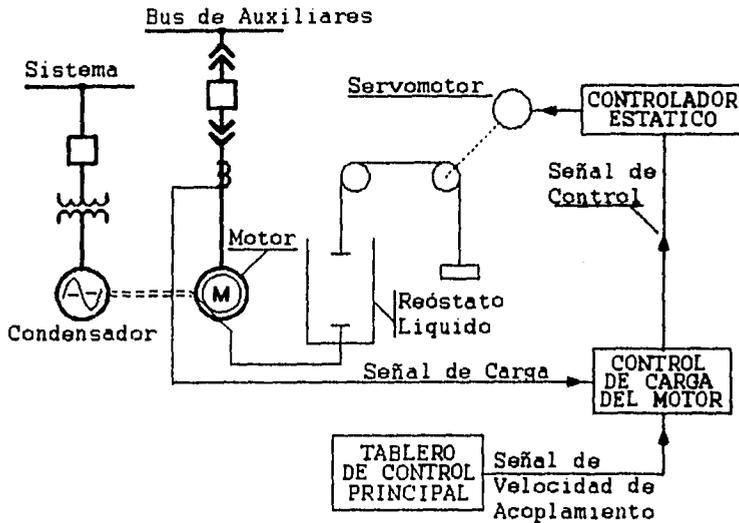


Figura 7.17 Control del Motor de Arranque.

capacidad cercana al 0.5% del valor nominal del condensador.

El control del par durante el arranque es por medio de un reóstato líquido controlado, como se muestra esquemáticamente en la figura 7.17. Durante el período de aceleración el control posiciona los electrodos para mantener un par constante. Al 98% de la velocidad aproximadamente, el control responde a la salida del relevador de ajuste de velocidad (generalmente pulsos) para llevar el deslizamiento a un valor muy pequeño y permitir al relevador de sincronización automática iniciar el cierre del interruptor.

Cuando el condensador tiene un excitador de C.D. conectado directamente, éste puede usarse como un motor para conducir al condensador hasta su velocidad nominal y sincronizarlo a la línea. Dos condensadores de 250 MVAR actualmente en servicio usan un motor de arranque-

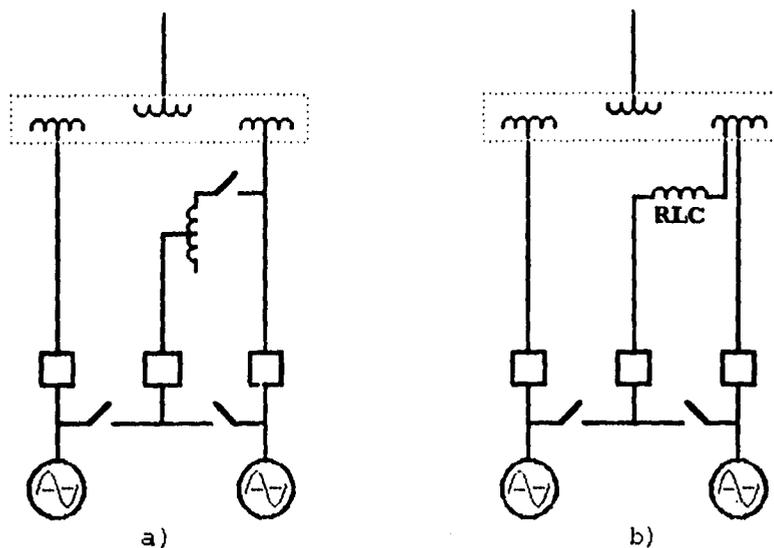


Figura 7.18 Arranque a voltaje reducido. a) Tap de transformador. b) Autotransformador.

excitador, en un sistema automatizado. El control del par durante el arranque en este caso es por medio de un voltaje de D.C. controlado aplicado al motor²excitador.

7.5.2 ARRANQUE A VOLTAJE REDUCIDO.

Dos arreglos para arranque a voltaje reducido se muestran en la figura 7.18 a) y b). Se han usado varios arreglos de conmutación, particularmente con respecto a los autotransformadores. La selección es más importante desde el punto de vista económico que cualquier diferencia práctica en la operación. Esta incluye conexiones de autotransformadores las cuales utilizan un disparo de un interruptor neutral con los devanados en serie sirviendo como un reactor durante la transición encendido-rodado, algunas veces referido como el método Korndorfer. La

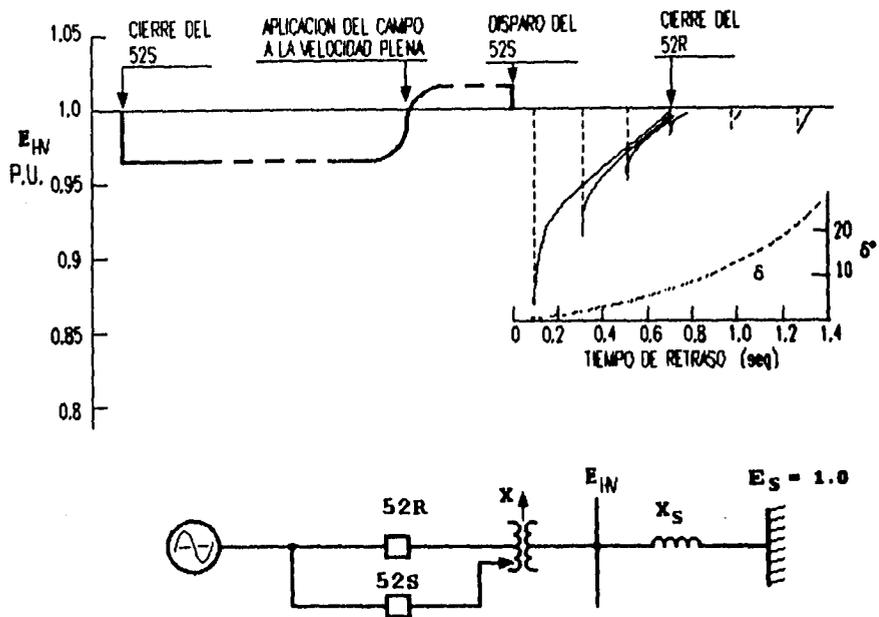


Figura 7.19 Transferencia Arranque-Marcha Retrasada. 1976 IEEE.

impedancia de magnetización del autotransformador de arranque normal bajo estas circunstancias es tan alta que practicamente no hay diferencia en la operación del transfer abierto de los arreglos mostrados en la figura 7.18.

El tap de voltaje reducido del devanado del transformador delta de la fig. 7.18 a) puede ser un tap central simétrico para voltaje medio o una conexión esquina delta para un tap de voltaje más bajo. El tap de esquina delta introduce una impedancia desbalanceada lo cual resulta en un flujo de corriente desbalanceada durante el arranque. Sin embargo, el flujo de corriente desbalanceada es pequeña generalmente y de poco interés para el diseñador del sistema de protec-

ciones con respecto al ajuste del sensor del relevador de tierra. En el diseño del transformador se podría admitir la necesidad de evitar un desbalance excesivo de los voltajes en taps.

La corriente de corto circuito en un tap tiende a ser más alta en amperaje que la del devanado total. Cuando esta excede del rango de corriente de interrupción o momentánea del interruptor considerado se puede requerir un reactor limitador de corriente (RLC) como se muestra en la figura 7.18 a).

La unidad se arranca como un motor de inducción en el tap de voltaje reducido. La excitación se aplica cuando se alcanza la velocidad plena y la unidad toma su paso. A causa del par de reluctancia, la unidad podría caer inicialmente en un "polo equivocado". Como parte de la secuencia de encendido automático, se aplica una corriente de campo suficiente para asegurar si es necesario que se realice un deslizamiento intencional de polo. Se hace una verificación usando un relevador de potencia reactiva para asegurarse que el condensador tenga la orientación correcta de polos antes de continuar con el procedimiento. En seguida de esta verificación, la transferencia a voltaje pleno se hace disparando el interruptor de arranque y cerrando el interruptor del rodado. Al mismo tiempo que el interruptor de arranque se dispara, se utiliza la corriente de campo total forzada por el sistema de excitación para minimizar la corriente transitoria y la caída resultante de voltaje. Típicamente el voltaje del tap de arranque es el 35 - 50%. Cuando se usa particularmente un tap de voltaje bajo, el transitorio de transferencia puede ser mucho más grande que el transitorio inicial a menos que se quiera usar un medio de control para reducir esto. La figura 7.19 ilustra un caso donde un ligero retraso en el cierre del interruptor de arranque redujo la segunda caída de voltaje a un valor mínimo.

Para este método de arranque se requieren amortiguadores robustos del tipo ilustrado en

la figura 7.3. Como el tamaño de la unidad se incrementa, se vuelve más difícil conseguir barras amortiguadoras de una capacidad térmica adecuada y por tanto se requiere un método de arranque diferente. Los condensadores enfriados con hidrógeno de rango cercano a los 170 MVARs generalmente requerirán un arranque del tipo "no amortiguado" tal como el motor de arranque.

7.5.3 ARRANQUE ESTÁTICO

El arranque estático mostrado esquemáticamente en la figura 7.20 es básicamente un tipo de arranque síncrono o "back-to-back" en el cual el condensador se acelera a la velocidad nominal en sincronismo con el equivalente estático de un generador de arranque. El equipo de arranque estático no únicamente es un equivalente estático autocontenido de un generador de arranque, sino también su excitación, válvulas, gobernador y controles de sincronización. Los principales elementos del sistema de arranque estático son los siguientes:

- 1.- Cubículos de Arrancador Estático, los cuales contienen los tiristores de potencia y su control asociado.
- 2.- Reactores de Conmutación y Reactor Amortiguador localizados junto al cubículo del arrancador.
- 3.- El Equipo de Potencia para suministro de energía al arrancador y para la conexión de la unidad a ser arrancada.

Básicamente el arrancador es como el equipo convertidor de una terminal de HVDC excepto que el "sistema" receptor al cual se le envía la potencia es de frecuencia variable. Durante la aceleración el convertidor del lado de la línea opera como un rectificador cuando el convertidor del lado de la máquina opera como un inversor. Arriba de una cierta velocidad mínima (5 -10%)

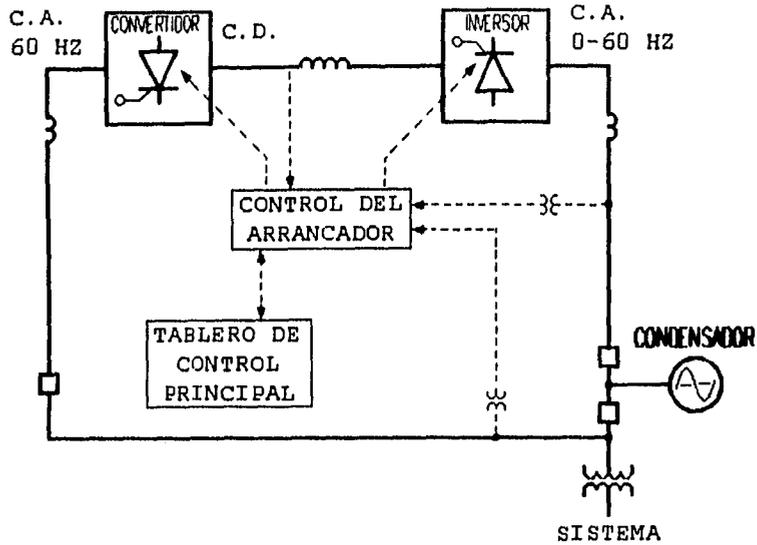


Figura 7.20 Arreglo Esquemático del Sistema de Arranque Estático.

el condensador puede proporcionar la conmutación reactiva requerida para la operación de el inversor. Por abajo de esta velocidad es necesario establecer el flujo giratorio del estator conmutando sucesivamente la salida del inversor de fase a fase.

7.6 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DE LA ESTACIÓN.

Mientras que una discusión detallada del equipo de estación está más allá del alcance de este capítulo, se mencionarán algunas consideraciones únicas para el condensador.

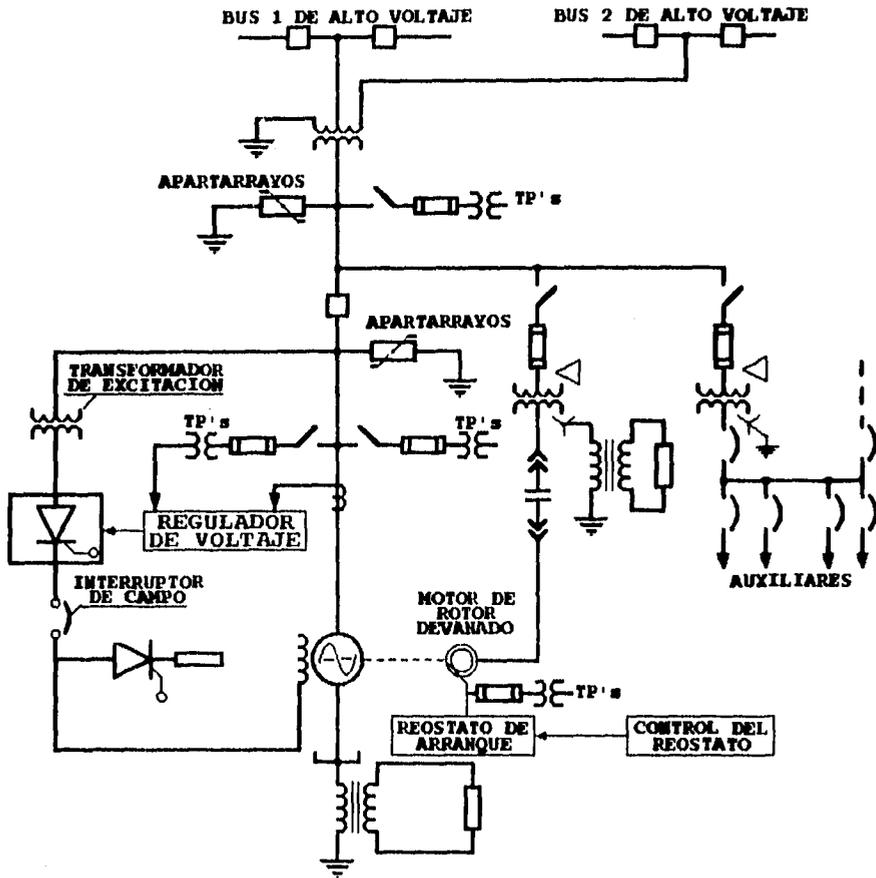


Figura 7.21 Arreglo Unifilar Típico de la instalación del Condensador.

7.6.1 DIAGRAMA UNIFILAR DEL ARREGLO BÁSICO.

El diagrama unifilar de una instalación de condensador varía considerablemente de acuerdo a los arreglos de subestación existentes donde será acomodado y el método de arranque empleado. La figura 7.21 muestra un arreglo típico usando un motor de rotor devanado para

arranque.

Donde hay autotransformadores de enlace interconectando dos niveles de voltaje de transmisión en la subestación, una conexión económica al sistema de potencia podría ser como se muestra, a través del devanado terciario delta de un autotransformador acoplado. Una alternativa sería conectar al condensador con un transformador reductor propio. Dos consideraciones importantes y relacionadas en cualquier caso son la impedancia y la relación (de transformación) del transformador. En general, es deseable que la impedancia sea la más baja posible de acuerdo con la capacidad interruptiva para permitir una utilización máxima de la capacidad del condensador. Una impedancia baja también reduce el problema de seleccionar una relación de transformador para conseguir un amplio rango de condiciones, permitiendo la potencia reactiva del condensador deseada sobre el rango esperado de variación de nivel de voltaje de transmisión sin exceder de los límites de tolerancia del voltaje normal del condensador de $\pm 5\%$.

7.6.2 CONTROL Y PROTECCIÓN.

En la mayoría de los casos los condensadores están completamente automatizados con arranque y paro remoto y disponen de un control de voltaje.

Los requerimientos de relevadores de protección son esencialmente los mismos que usa una unidad turbogeneradora, sin embargo hay algunos requerimientos especiales. Se aplica un tipo diferente de relevador de pérdida de campo, puesto que para un condensador una corriente de campo cercana a cero es normal. Esta función se implementa con lógica combinada de corriente de campo y voltaje de terminales de tal modo que una corriente de campo baja junto con un voltaje bajo de terminales se debe considerar anormal.

Se tiene también un relevador de baja frecuencia en los condensadores para protección en casos donde se llegan a aislar del sistema por un disparo remoto.

Una función importante de protección es el control de sobrecarga en los devanados del estator y rotor. Puesto que el único medio de "descargar" un condensador es reduciendo la corriente de campo, esta función normalmente se dispone como parte del equipo de excitación y consiste de un control automático de reducción (runback) suplementando la función limitadora de excitación máxima normal.

7.6.3 SISTEMAS AUXILIARES.

Los sistemas auxiliares básicos de un condensador aparte de los medios de arranque son los de lubricación, enfriamiento y control de hidrógeno.

El total del requerimiento de potencia auxiliar para un condensador operando en condiciones normales es del orden de la décima (0.1%) parte del uno por ciento, de la cual la mayoría está asociada con el sistema de agua de enfriamiento.

La ventilación de la máquina de la figura 7.2 es totalmente hermética, con gas hidrógeno circulando por medio de ventiladores montados en la flecha, a través de intercambiadores de calor gas - agua. Puesto que el agua de enfriamiento es muy solicitada, generalmente se emplean ya sea torres de enfriamiento o intercambiadores de calor agua aire. Comúnmente se emplea un sistema cerrado conteniendo una mezcla de glicol para evitar congelación en áreas de muy baja temperatura. En otros casos el control de congelación se implementa diseñando un sistema de enfriamiento que permita un drenado automático.

Un sistema de control de hidrógeno mantiene la presión normal por medio de reguladores

de presión, disponiendo una compensación por fugas de la carcasa del condensador.

El sistema de aceite lubricante usualmente se localiza en un foso directamente bajo el condensador. El aceite lubricante se suministra a cada rodamiento al flujo y presión adecuados. También durante el arranque se suministra aceite a alta presión en los rodamientos para levantar la flecha de la superficie de rodamiento de los cojinetes y con esto reducir la fricción en el arranque y además reducir el desgaste del metal babbitt. Una bomba lubricante de respaldo de C.D. da servicio de emergencia a la bomba normal lubricante de A.C.

8. CONCLUSIONES.

8.1 APLICACIONES DE LA COMPENSACIÓN DE VAR'S EN EL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL (SEN).

Una vez analizadas las ventajas que ofrecen los CEV's, tanto en el renglón técnico como en el económico, se comprende la amplia difusión que este dispositivo ha tenido en los últimos años aplicado en las redes eléctricas de potencia y en las redes eléctricas industriales. En México

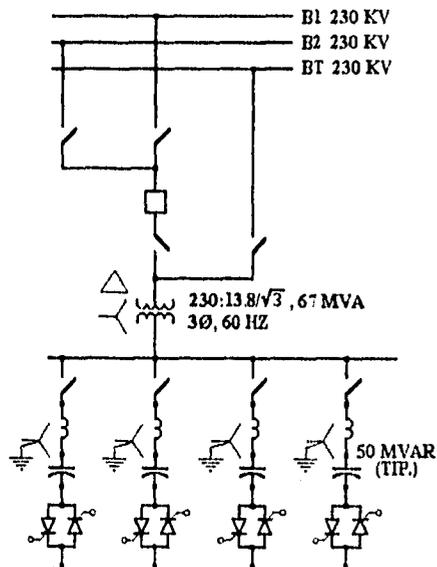


Figura 8.1 CEV de la subestación de Puebla.

se ha seguido la tendencia y la red eléctrica nacional cuenta en la actualidad con varios CEV's que en sus diversas configuraciones se aplican en zonas diferentes, dependiendo de las necesidades del sistema. En el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se tienen en operación los siguientes tipos:

- Capacitor Conmutado con Tiristores (CST).
- Reactor Controlado con Tiristores (RCT).
- Capacitor Conmutado con Tiristores/Reactor Controlado con Tiristores CST/RCT.
- Transformador Controlado con Tiristor (TCT).
- Reactor Saturable (RS).

8.2 INSTALACIONES PRINCIPALES DE CEV'S EN EL SEN.

En la subestación de Puebla se tiene un CEV del tipo CST, constituido por 4 ramas shunt capacitivas de 50 Mvars cada una, para una capacidad total de 200 Mvars que, aplicado a la red de 230 KV soporta el voltaje y controla los reactivos del área; en la figura 8.1 se muestra el diagrama unifilar de este CEV.

En Cananea se tiene un CEV del tipo CST, que comprende 4 ramas shunt capacitivas de 20 Mvars cada una para un rango de 0 a 80 Mvars capacitivos; en la figura 8.2 se muestra su diagrama unifilar.

En Acatlán se tiene un CEV de 200 Mvars inductivos que con su actuación permite la transferencia de potencia desde Manzanillo hasta la ciudad de Guadalajara, conservando la

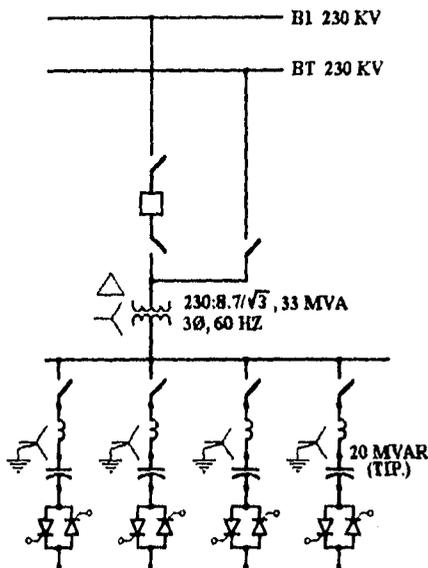


Figura 8.2 CEV de la subestación de Cananea.

estabilidad del sistema en caso de disturbio y permitiendo el control de potencia reactiva en el área occidental del sistema; en la figura 8.3 se muestra su diagrama unifilar.

En Temazcal, actualmente la subestación más importante del SEN, se puso en servicio el CEV más grande del mundo que en 4 pasos de 75 Mvars capacitivos, 4 pasos de 75 Mvars inductivos y control sobre 9 reactores conmutables (de capacidad variada) a las líneas de 400 KV, define un rango desde 300 Mvars capacitivos hasta 920 Mvar inductivos, dotando a la red de una herramienta excepcional para mantener los voltajes y los flujos de reactivos dentro de una tolerancia muy aceptable; este equipo esta en operación desde 1981. En la figura 8.4a se muestra el diagrama unifilar del CEV y en la figura 8.4b el diagrama unifilar de la subestación.

En Sta. Ana se tiene un CEV del tipo TCT, comprende un transformador especial con

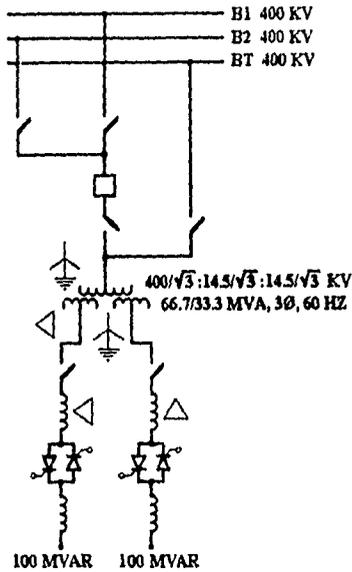


Figura 8.3 CEV de la subestación de Acatlán.

3 devanados en conexión Y/ Δ / Δ de un rango de 0 a 50 Mvar inductivos. Siendo la subestación de Sta. Ana un nodo tal que soporta una demanda variable muy acentuada se analizó y se decidió ampliar el rango del compensador y se instalaron 4 ramas de 20 Mvar capacitivos.

En Cd. Juárez se tiene un reactor saturable que, aplicado a la red de 69 KV, está resolviendo en forma muy satisfactoria los requerimientos de la red para el control de reactivos.

Las instalaciones anteriores mencionadas son del sistema de transmisión de energía, en cuanto a instalaciones de uso de energía eléctrica podemos mencionar el sistema de bombeo de agua Cutzamala, en donde se cuenta con bombas impulsadas por motores de hasta 20,000 HP, por tal motivo se requirió que en la subestación se instalara un CEV para soportar permanen-

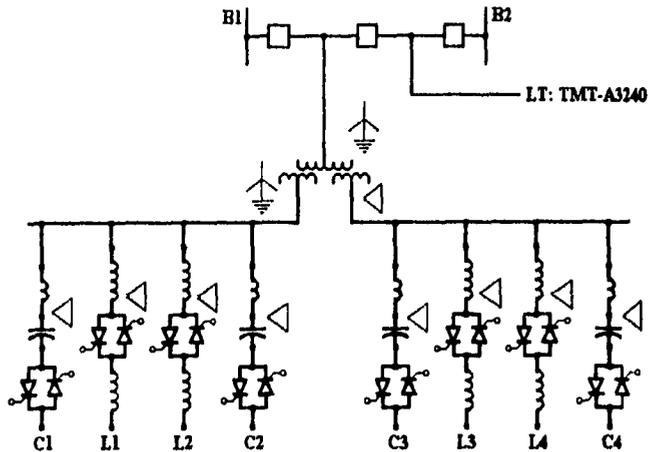
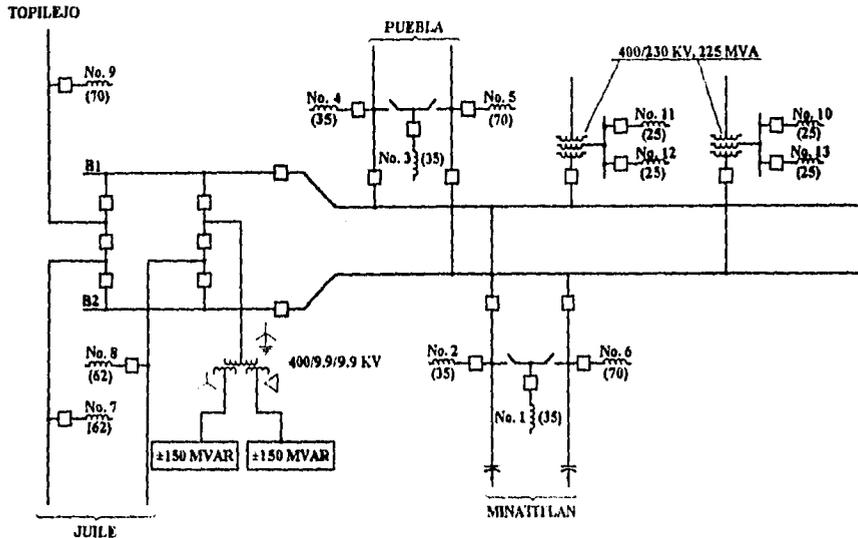


Figura 8.4a Diagrama esquemático del CEV de la subestación de Temazcal.

temente el arranque de estos motores que provocan serias alteraciones al voltaje. Este CEV se forma de una parte conmutable con tiristor y otra conmutable con interruptor; la primera resuelve los requerimientos instantáneos de reactivos durante el arranque y la otra el control de voltaje y reactivos a la red de 115 KV.

8.3 LA INDUSTRIA ELÉCTRICA NACIONAL Y LA FABRICACIÓN DE EQUIPO PARA LA COMPENSACION DE VAR'S.

En la industria mexicana se han aplicado diversos medios para el control de voltaje y reactivos, como por ejemplo Hylsa, en Puebla, tiene un condensador síncrono y Las Truchas, en Michoacán, tiene instalado en su planta un CEV que compensa los transitorios provocados al



LOS NUMEROS ENTRE PARENTESIS INDICAN LA CAPACIDAD DE LOS REACTORES EN MVAR

Figura 8.4b Diagrama esquemático de la subestación Temazcal.

sistema eléctrico por la operación de los hornos eléctricos.

En el mundo la aplicación de estos CEV's se ha hecho en forma creciente y si temporalmente se ha detenido es por razones estrictamente económicas, algo similar ha sucedido en México donde existen proyectos pendientes de ejecución.

La futura aplicación de estos dispositivos y el inmenso campo de utilización del tiristor en el área de los sistemas eléctricos de potencia está requiriendo de un desarrollo más elaborado y de una utilización más formal para que esta tecnología del mundo electrónico que está irrumpiendo en el sector del control de potencia eléctrica se llegue a dominar y que permita que el industrial nacional pueda competir en el futuro en los proyectos internos o, inclusive, en el

exterior. Si bién la fabricación de tiristores se ve poco justificable, la fabricación de un CEV con sus controles, su sistema de enfriamiento, el equipo principal de capacitores y reactores se ve con mayor probabilidad de poder elaborarse por la industria nacional.

BIBLIOGRAFIA

- Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation; Electrical Transmission and Distribution Reference Book. 1964.
- Cigre Working Group; Modeling of Static Shunt Var Systems for System Analysis, Electra No. 51. 1977.
- Cigre Working Group; Static shunt Devices for Reactive Power Control, Cigre Paper No. 31-08. 1974.
- Depto. de Operación y Despacho CENACE-CFE; Seminario sobre Compensadores Estáticos de Var's (CEV'S), CFE. 1982.
- G. Seguíer; Electrónica de Potencia, Edit. Gustavo Gili, Barcelona Esp. 1979.
- Frank H., Landstrom, Power Factor Correction with Thyristor Controlled Capacitor, ASEA Journal. 1976.
- Reichert K.; Controllable Reactor Compensator for More extensive Utilization of High Voltage Transmission Systems, Cigre Paper 31-04. 1974.
- Mohan N., Undeland, Robbins; POWER ELECTRONICS: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons. 1989.
- Byerly R. T., Poznaniak D. T., Taylor E. R.; Compensación Reactiva Estática para Sistemas de Transmisión de Potencia. Westinghouse Electric Corporation.

- Hauth R. L., Moran R. J.; Basics of Applying Static Var Systems on HVAC Power Networks.
- Hauth R. L., Moran R. J.; Introduction to Static Var Systems for Voltage on Var Control.
- Stevenson, William D.; Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, Mc Graw Hill. 1982.
- Peterson, T.; Simulation Models of Thyristor Switched Capacitors in Transmission Applications, ASEA. 1975.
- Frank, Harry; Compensación de Potencia Reactiva en las Redes de Alta Tensión, Boletín ASEA 3. 1983.
- Frank H., Ivner S.; Compensación en Derivación, Controlada por Tiristores, en Redes de Potencia, Boletín ASEA 5-6. 1981