

327
Zej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

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:

HELIODORO JUAREZ MIRANDA

D I R E C T O R:

ING: AUGUSTO HINTZE

MEXICO, D. F.

1986



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 está 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.

I N D I C E

CONTROL DE LA POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS ELECTRICOS DE ALTA TENSION

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Compensación de Potencia reactiva	5
	-Potencia Reactiva	
	-Caída de Voltaje	
	-Pérdidas y Utilización de la Capacidad Térmica del Equipo	
	-Control de Voltaje y Balance de la Potencia Reactiva.	
1.3	Compensación de Potencia Reactiva en Siste... mas de Transmisión	15
	-Razones para la Compensación	
	-Control de Voltaje en Estado Estable	

- Estabilidad Sincrona
- División de la Carga
- Sobrevoltajes.

C A P I T U L O I I

CONFIGURACIONES BASICAS DE SISTEMAS COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA

- 2.1 Generalidades..... 27
- 2.2 Descripción y uso Recomendado de Cada Uno
de los Compensadores de Potencia Reactiva.... 29

C A P I T U L O I I I

EL COMPENSADOR ESTATICO DE POTENCIA REACTIVA

- 3.1 Capacitores Conmutados con Thyristores..... 37
- 3.2 Reactor Controlado con Thyristores..... 38
- 3.3 Reactor Controlado con Thyristores, Capa..... 39
citor Conmutado con Thyristores

C A P I T U L O I V

OPERACION DEL THYRISTOR

4.1	Generalidades (Introducción a la Electro... nica de Potencia)	45
4.2	Principio de Operación del Rectificador Controlado de Silicio (SCR)	46
4.3	Característica de la Compuerta.....	52
4.4	Métodos de Disparo del SCR.....	53
4.5	Métodos y Circuitos de Elocueo.....	55
4.6	Tiempos de Conmutación de un SCR.....	56
4.7	Conexiones de Thyristores.....	60
4.8	Protecciones.....	63
4.9	Influencia de la Velocidad de Crecimiento... de la corriente (di/dt)	66
4.10	Montaje en Triac.....	68

C A P I T U L O V

CONTROL Y GENERACION DE ARMONICAS.....	73
--	----

C A P I T U L O VI

CONTROL DE COMPENSADORES ESTATICOS DE VARS

6.1	Principio de Operacion del CEV.....	97
6.2	Control.....	100
6.3	Representacion Matematica.....	108

C A P I T U L O VII

CONCLUSIONES.....	110
-------------------	-----

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

- 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 Voltaje y Balance de la Potencia Reactiva
- 1.3 Compensación de Potencia Reactiva en Sistemas de Transmisión.
 - Razones para la Compensación
 - Control de Voltaje en Estado Estable
 - Estabilidad Sincrona
 - División de la Carga
 - Sobrevoltajes.

1. INTRODUCCION

1.1.- ANTECEDENTES.

En el desarrollo y progreso de la humanidad, el hombre ha llegado a depender para el desempeño de su vida cotidiana, en gran parte, de la electricidad, tanto así, que su consumo ha llegado a ser igual que el acero, un parámetro para determinar el adelanto tecnológico en que se encuentra el país o sector social al que pertenece. Debido a esto el incremento de fuentes generadoras de energía eléctrica ha ido creciendo, los sistemas de transmisión han aumentado en la misma medida, y los de distribución se han hecho, al igual, cada vez más complejos y a la par de ellos los problemas para manejar grandes cantidades de energía se han presentado en diferentes formas, encontrándose siempre la solución más adecuada.

En la historia encontramos que uno de los principales problemas ha sido la regulación de voltaje en las líneas de transmisión: al principio, en los sistemas de corriente continua se solucionó aumentando el voltaje de generación, solución que además permitía una transmisión de mayor potencia de manera más económica, pues disminuía pérdidas, pero esto se limitaba a aplicaciones industriales por demás restringidas. El invento del transformador (Gaulard y Gibbs 1883) permitió un manejo más eficiente y

menos restringida de energía a potenciales elevados y con ellos se comenzaron a usar 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 reducía considerablemente las dimensiones de los generadores.

Con el tiempo ante la demanda, siempre en aumento de -- electricidad, y la diversidad de usos que se le ha dado, ha surgido la necesidad de usar fuentes de energía, que por su naturaleza muchas de ellas están alejadas de los principales centros de consumo, tales como las centrales hidroeléctricas y geotérmicas, otras, como las centrales termoeléctricas, - que son más flexibles en cuanto a su localización, pero aún así necesitan estar cerca de lugares donde se puede disponer de agua suficiente para el buen desarrollo de su ciclo térmico, razón por la cual las centrales termoeléctricas están más restringidas en cuanto a que su capacidad instalada es mucho mayor. Por lo anterior, el voltaje en las líneas de - transmisión se ha incrementado, alcanzando así valores de - 765 KV y 1000 KV (en México, las redes de alto voltaje se operan a 400 KV); las distancias entre centros generadores y consumidores son actualmente muy grandes y debido a las características eléctricas inherentes de las líneas de transmisión, el consumo y generación de potencia reactiva se ha convertido en un interesante reto para el Ingeniero. Este último problema es el que nos ocupa y trataremos ampliamente. --

En si, implica y trae como consecuencia lo siguiente:

- Incremento en las caídas de voltaje y problemas de regulación del mismo.
- Incremento de pérdidas debido a corrientes elevadas que aumentan costos de transmisión.
- Uso inadecuado de la capacidad térmica de equipo -- por manejo de potencia reactiva.

Para la solución de este problema, se podría hacer que en las líneas (sobre todo medias y largas), la carga conectada equivalga a la potencia característica de las líneas (SIL, por sus siglas en inglés), con lo cual se tendría un balance perfecto entre la potencia reactiva consumida y generada en la línea. Pero esto en sistemas eléctricos de potencia es imposible por la naturaleza de la carga, que en magnitud y fase es totalmente variable y aleatoria, únicamente se puede aplicar este criterio en sistemas de comunicación, con lo que se logra una máxima reducción de ondas reflejadas en la transmisión.

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

condiciones instantáneas de operación de los sistemas de transmisión.

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

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

1.2 COMPENSACION DE POTENCIA REACTIVA

POTENCIA REACTIVA

La potencia reactiva se genera en las líneas de transmisión por sus características inductivas y capacitivas. -- De estas la última es independiente de la carga conectada -- a ellas y la primera es variable en función de la carga.

Para comprender la influencia de la potencia reactiva analicemos un circuito en el que exista un elemento reactivo. (figura N° 1).

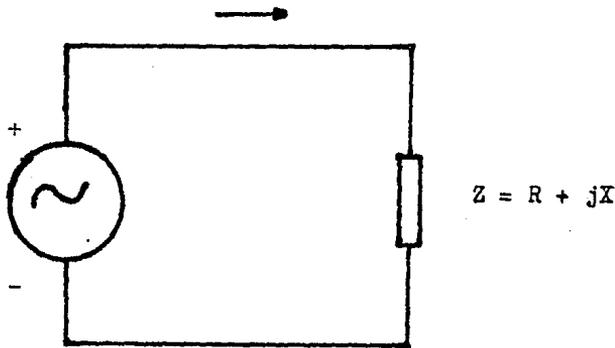


FIGURA N° 1.

Donde:

$$e = \sqrt{2} E \text{ sen } (wt + \varphi)$$
$$i = \sqrt{2} I \text{ sen } (wt)$$

de aquí la potencia consumida será

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

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

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

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 cual 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 del voltaje y la 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 sí se representa en el diagrama vectorial siguiente. (Figura N° 2)

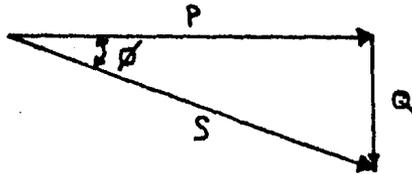


FIGURA N° 2.

o ayudándonos de la relación entre voltajes y corrientes. -
(Figura No 3).

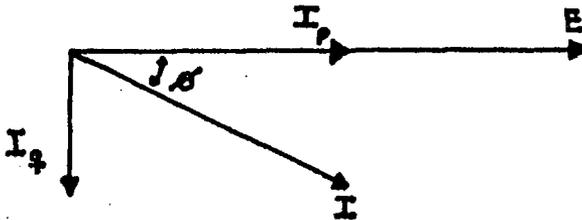


FIGURA No. 3.

Como nos referimos a una carga con un elemento re-
activo inductivo, indicamos la corriente a través de él ----
"atrasada", en el caso de una carga con elementos capacitivos
esta provocaría que la corriente estuviera "adelantada" con-
respecto al voltaje. Todo esto lo podemos interpretar como -
que la carga inductiva (la más común en sistemas de potencia)
absorbe potencia reactiva, esto es, Q es positiva y la carga
capacitiva genera potencia reactiva y por tanto en ella Q es
negativa.

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

CAIDA DE VOLTAJE.

En el punto anterior observamos como aparecen en un circuito corrientes no deseadas al existir elementos reactivos en un circuito, 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 a través del cual fluye una corriente I y se transmite una potencia $S_1 = P_1 + Q_1$ y se obtiene una potencia $S_2 = P_2 + Q_2$ (Figura N° 4)

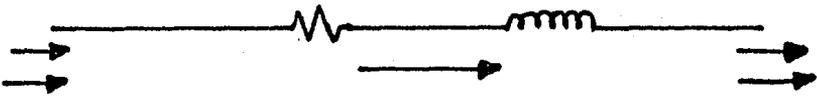


FIGURA N° 4.

El cual puede estar representado por el diagrama fasorial siguiente. (Figura N° 5).

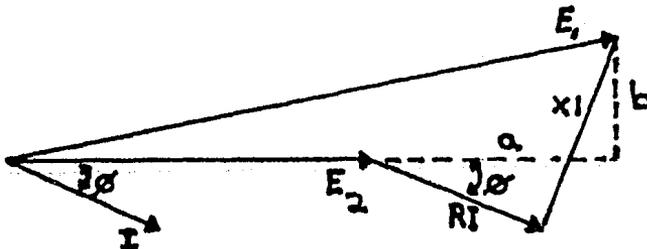


FIGURA N° 5.

donde RI es la caída de voltaje potencia 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 al considerar que $a \approx E_1 - E_2$

para calcular E_1 es menor del 0.5 %, y por tanto podemos calcular la caída de voltaje como:

$$a = RI \cos \phi + XI \sin \phi$$

$$a = \frac{1}{E_2} (RP_2 + XQ_2)$$

$$b = \frac{1}{E_2} (XP_2 - RQ_2)$$

En donde observamos que aparece un término afectado por la reactancia inductiva que generalmente llega a tener mucha importancia debido a los valores que toma en líneas de transmisión medias y largas. Para tener una idea más clara de este concepto, analicemos una línea de transmisión con las siguientes características y un voltaje en el punto receptor de 19 KV ; Qué voltaje en el extremo de la fuente es necesario para alimentar una carga de 2 MW a un factor de potencia de 0.8 ?

$$\frac{V_s}{35 \text{ Km}} = \frac{V_r}{V_r}$$

$$C_u \ 50 \text{ mm}^2$$

$$\left. \begin{aligned} r &= 17.5 \ \Omega \text{ mm}^2 \text{ - km} \\ x &= 0.4 \ \Omega / \text{Km} \end{aligned} \right\} 20 \text{ KV}$$

Solución:

$$V_S = V_R + a$$

$$a = \frac{1}{E_2} (R P_2 + X Q_2)$$

$$\text{donde } R = \frac{17.5}{50} \times 35 = 12.25$$

$$X = 0.4 \times 35 = 14$$

$$P_2 = 2 \text{ MW}$$

$$E_2 = 19 \text{ KV}$$

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

$$= 2 \times 0.75 = 1.5 \text{ MVA}$$

Sustituyendo

$$a = \frac{1}{19} (12.25 \times 2000 + 14 \times 1500) = 2394.7 \text{ V}$$

por tanto el voltaje necesario es $V_S = 21.4 \text{ KV}$

La caída que produce la parte reactiva de la línea es

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_2} X Q &= \frac{1}{19} \times 14 \times 1500 \\ &= 1109 \text{ V} \\ &= 1.1 \text{ KV} \end{aligned}$$

PERDIDA Y UTILIZACION DE LA CAPACIDAD
TERMICA DEL EQUIPO.

Algo que se toma en cuenta en la utilización de un -- equipo y que es una razón muy poderosa en las decisiones-- para la selección del mismo son las pérdidas. Para noso-- tros, en el tema que tratamos es muy importante conside-- rarlas en vista de los resultados del punto anterior.

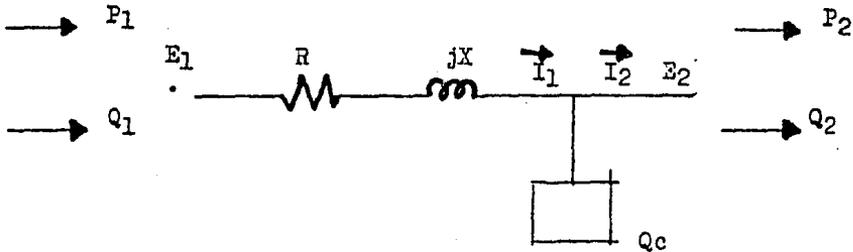
Como sabemos que las pérdidas resistivas son propor-- cionales al valor de la corriente elevada al cuadrado y -- los parámetros resistivos de una línea de ninguna manera -- podemos afectarlos operando a una temperatura dada, la for-- ma indicada de disminuir estas pérdidas es minimizando la-- corriente por otros medios.

Ya que:

$$I = \frac{S}{E}$$

$$I^2 = \frac{P^2 + Q^2}{E^2}$$

Si consideramos una línea con un compensador aco-- plado con las siguientes características, transmitiendo -- una potencia $S_2 = P_2 + Q_2$.



Si suponemos Q_c capacitiva tenemos que las pérdidas ΔP son:

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

De donde podemos ver que se minimiza si hacemos que:

$$Q_c = Q_2$$

De tal manera que la potencia reactiva 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:

Calcule las pérdidas de un circuito con una resistencia total de 12.25 ohms, que alimenta a una carga de 2 Mw y $f.p. = 0.7$, con un voltaje en el extremo receptor de 19 Kv

$$I = \frac{S}{V} = \frac{2000/0.7}{19} = 150.38 \text{ A}$$

$$P_1 = RI^2 = 12.25 (150.38)^2 = 0.28 \text{ Mw}$$

¿De que capacidad será un compensador para que $f.p. = 1$?

Para que el factor de potencia sea igual a uno, el compen

sador tiene que tomar un valor en Kvar igual a la carga, esto es.

$$Q_c = \left(\frac{2000}{0.7} \right)^2 - (2000)^2 = 2040$$

Con esto logramos que:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{2000}{19} = 105.26 \text{ A}$$

Por lo tanto

$$P_2 = RI^2 = 12.25 \times (105.26)^2 = .135 \text{ Mw}$$

La reducción de pérdidas con compensación será.

$$P = P_1 - P_2 = .28 - .135 = .14 \text{ Mw}$$

La caída de voltaje será:

$$a = r \times I = 12.25 \times (105.26) = 1.28 \text{ Kv}$$

El voltaje de envío será:

$$V_s = V_r + a = 19 + 1.28 = 20.28 \text{ Kv} .$$

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

Como además la capacidad de transmisión es función de la temperatura y esta depende de la temperatura ambiente y se incrementa con las pérdidas, al tener un mínimo de pérdidas por efecto Joule la capacidad de transmisión mejora notablemente.

CONTROL DE VOLTAJE Y BALANCE DE LA
POTENCIA REACTIVA

Como ya se discutió antes, la potencia reactiva influye en el voltaje, por tanto una manera de controlar este 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:

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

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

Existen métodos más obvios para el control de voltaje 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 evitar pérdidas es evitar la transmisión de potencia reactiva desde puntos lejanos puesto que que ello trae consigo:

- Incremento en la caída de voltaje
- Incremento de pérdidas
- Utilización innecesaria de la capacidad térmica del equipo.

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 sistema de distribución.

1.3 COMPENSACION DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE TRANSMISION.

Esta parte del capítulo revisa las razones para -- usar compensación reactiva en sistemas de transmisión y -- echa un vistazo a los dispositivos disponibles. Se describen los compensadores estáticos y los capacitores serie con mayor detalle que otros dispositivos - los compensadores estáticos, porque son un nuevo medio de compensación reactiva y los capacitores serie, porque su habilidad para incrementar la capacidad de transmisión y de minimizar pérdidas no ha sido completamente aprovechada en los sistemas de potencia.

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 carga. A medida que las redes se hicieron mas dispersas, se adoptaron motores síncronos, pequeños condensadores síncronos y capacitores estáticos en paralelo, para corregir el factor de potencia. Para sistemas de transmisión, se instalaron condensadores síncronos cada vez más grandes. Junto con el desarrollo de capacitores mas eficientes y económicos, ha existido un extraordinario crecimiento en el uso de capacitores paralelo como un medio de obtención de potencia reactiva, particularmente dentro de los sistemas de distribución. Con la introducción

ción de líneas de alta tensión, los reactores paralelo u los capacitores serie se han convertido en dispositivos de compensación muy importantes. El desarrollo mas moderno es el compensador estático.

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 transmitida sobre distancias largas porque esto implica:

- Incrementar las caídas de voltaje, que complican el control de voltaje.
- Incrementar las pérdidas debido a corrientes más altas, que se traduce en costos extra de transferencia.
- Una utilización innecesaria de las capacidades térmicas de los aparatos, particularmente los transformadores y cables debido a corrientes mas altas.

Por consiguiente, y en forma ideal, el balance de potencia reactiva debe efectuarse dentro de cada región de un sistema de potencia, dentro de cada sistema de transmisión y dentro de cada sistema de distribución. En la práctica sin embargo, no siempre se sigue este principio por alguna u otra razón.

Las siguientes discusiones y descripciones se re--

fieren en particular a transmisiones de muy alto voltaje.

RAZONES PARA LA COMPENSACION REACTIVA

Los elementos de transmisión que consumen o generan potencia reactiva son los transformadores, las líneas aéreas, los cables subterráneos en alguna forma y los dispositivos de compensación.

Los transformadores siempre consumen potencia reactiva. 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 debida 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 varia 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 (Ver figura 6). Para una cierta carga transferida, la potencia reactiva consumida es igual a la potencia reactiva generada. Esta carga transmitida en MW, se llama carga de impedancia fuente -- (surge impedance loading: SIL) o carga natural de la línea. Si hay una salida forzada o prevista, de una línea -- conectada en paralelo con otras muy cargadas, se crea un-

un gran incremento de demanda de potencia reactiva. La generación de potencia reactiva en el enlace se reduce y el consumo de potencia reactiva se incrementa enormemente.

Los cables subterráneos en grandes áreas urbanas y -- las líneas áreas largas de alto voltaje son fuentes importantes de potencia reactiva. La tabla 1 muestra cifras tipicas de generación en líneas y el SIL de líneas aéreas.

A un lado de las consideraciones evidentes en lo que respecta a la transferencia de potencia reactiva mencionadas en párrafos anteriores , en particular deben ser discutidos los siguientes tópicos:

- Control de voltaje en estado estable
- Estabilidad síncrona
- División de la carga
- Sobrevoltajes.

CONTROL DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

La figura 7 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, des--preciamos la resistencia y suponemos que V_1 , el voltaje

de envío, es fijoe igual a 1.Opu. Para valores razona--- bles de P y Q, el voltaje V_2 en el extremo receptor se ex presa como:

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

Todas las cantidades están en por unidad. Esta ecuación es mas bien informativa. Muestra que para cada valor de X, V_2 es determinado primeramente por la diferencia de poten--- cias reactivas $(Q - Q_2)$ y secundariamente por P. A menos de de que sea compensada, las variaciones de P y de Q pueden -- crear variaciones de voltaje inaceptable para la operación - del sistema de potencia. La ecuación 1 muestra también dos - métodos posibles de compensación para control de voltaje:

- Compensación paralelo, que es una absorción o inyec--- ción en paralelo de potencia reactiva, influyendo en - $(Q - Q_2)$
- Compensación serie por medio de capacitores serie re--- duciendo así la X.

De estos dos métodos para control de voltaje, la compen sación paralelo es empleada usualmente en primer lugar.

Hay por supuesto, también métodos mas obvios para con--- trol de voltaje: control de voltaje del generador, en buses adyacentes a los generadores y el uso de los cambiadores de

de TAP en los transformadores.

ESTABILIDAD SINCRONA

Desde el 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 aceptados de estos términos. En este documento los dos términos se usan en el sentido definido por un grupo de trabajo de la CIGRE, donde estabilidad en estado estable se refiere a disturbios "pequeños" y la estabilidad transitoria a disturbios grandes. Además el término límite de estabilidad, en estado estable o transitorio, se usa en el sentido de potencia máxima antes del disturbio-supuesto, y que puede ser continua 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 es el tipo de estabilidad mas importante porque puede influenciar la selección de elementos básicos de los sistemas de potencia:

Niveles de voltaje de transmisión, número de líneas en paralelo, seccionalización de líneas, etc. por consiguiente, el último tipo de estabilidad será considerado primero.

Consideremos varias líneas en paralelo formando un enlace, este puede ser representado por el circuito equivalente de la Figura No. en forma aproximada. En condiciones estables o transitorias, la diferencia angular entre los voltajes de enlace queda expresada por:

$$\theta = \text{ang} \text{ sen } \frac{PX}{V_1 V_2} \quad (2)$$

En condiciones de estado estable θ es generalmente menor de 30° para las 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 transmisiones 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 (2), tanto la compensación paralelo como la compensación serie se puede usar para reducir θ elevando, por lo tanto, los límites de estabilidad transitoria. La compensación paralelo, particularmente la inyección de reactivos durante la oscilación de potencia crítica después de un disturbio, mantendrá altos los voltajes, y por lo tanto reduciendo 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 remota planta generadora a un sistema grande, y suponemos que se ha hecho una completa utilización de las medidas para disminuir los costos, la compensación serie es generalmente considerada como el método mas 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 en generadores, de sistemas de excitar de alta respuesta 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 y apropiado de la excitación del generador, incluyendo control suplementario de excitación por medio de los llamados estabilizadores de potencia el medio mas 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 condensadores síncronos y mejor aún con compensadores estáticos.

DIVISION 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 puede minimizar las pérdidas en línea activa. En algunos casos, por ejemplos similares al mostrado en la figura - 8 , la reducción en las partidas totales por transmisión puede pagar parcial o completamente la instalación de un capacitor serie en unos pocos años, aunque no sea la razón principal para su instalación.

Los transformadores defasadores también pueden ser usados para controlar la división de carga.

SOBREVOLTAJES

Los sobrevoltajes temporales en líneas de muy alta tensión trabajando con un extremo abierto, por ejemplo - después de energizar las líneas o debido a un rechazo de carga, se pueden reducir en forma efectiva mediante compensación paralelo con reactores. Aunque esta no sea la razón principal para su uso la compensación paralelo con reactores es tan bien benefica por la reducción de -

sobrevoltajes por switcheo, especialmente cuando los reactores estan conectados directamente en la línea como se muestra la figura 9.

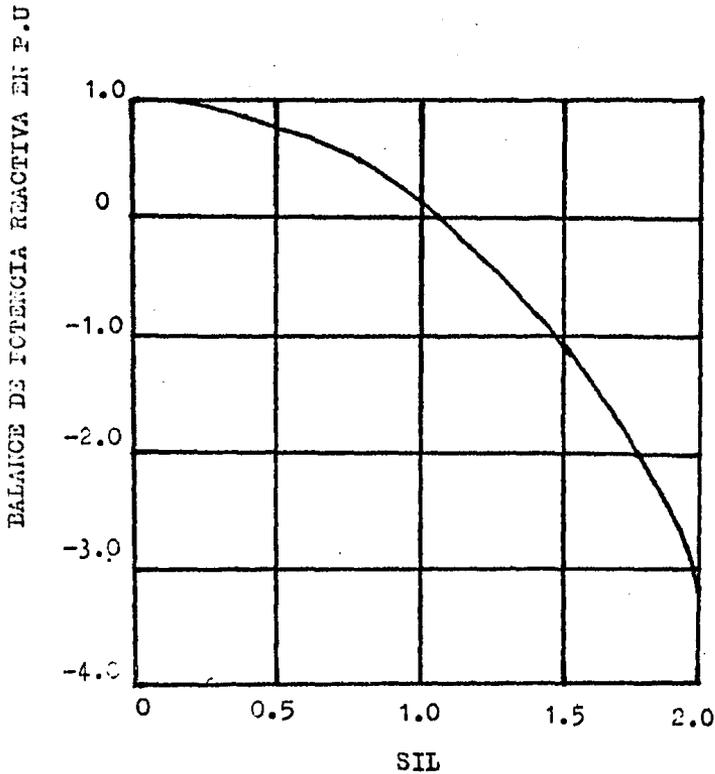


FIGURA N° 6. BALANCE DE POTENCIA REACTIVA EN LA LINEA DE TRANSMISION

VOLTAJE DE OPERACION	GENERACION DE LA LINEA Kvar/Km	SIL MW
345	500	400
750	2800	2200
1150	7200	5500

TABLA N° 1.

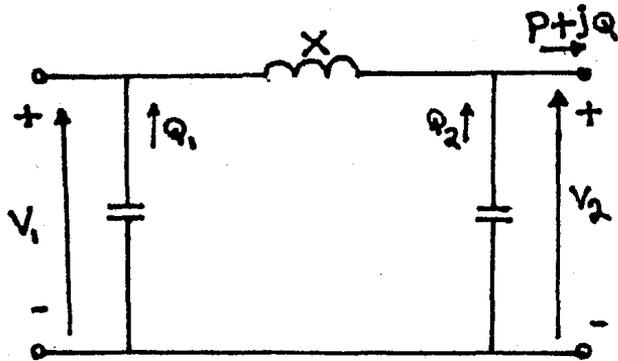


FIGURA N° 7

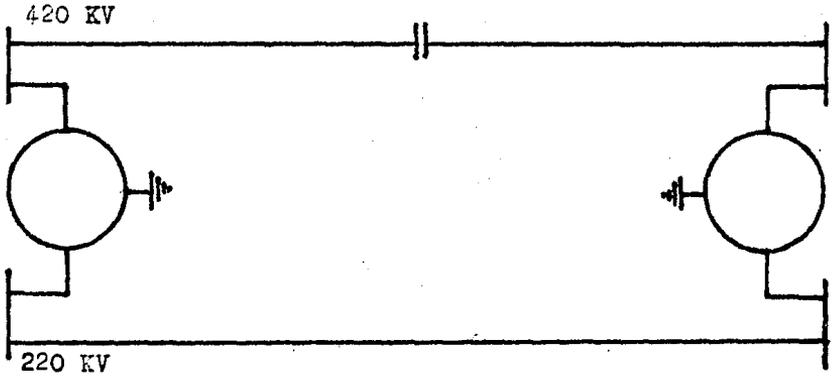


FIGURA N° 8.

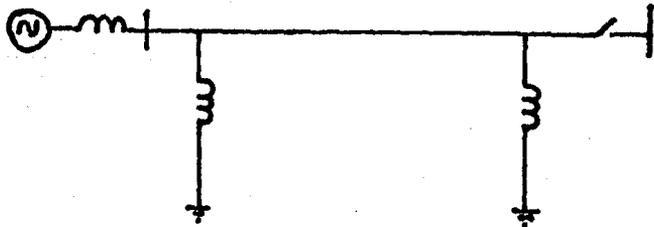


FIGURA N° 9.

C A P I T U L O I I

CONFIGURACIONES BASICAS DE SISTEMAS COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA

- 2.1 Generalidades
- 2.2 Descripción y uso Recomendado de Cada Uno de los
 Compensadores de Potencia Reactiva

II. CONFIGURACIONES BASICAS DE SISTEMAS COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA

2.1 GENERALIDADES.

Antes de particularizar podemos dar una descripción general de los sistemas usados para obtener estas configuraciones.

Algunos sistemas implican elementos mecánicos, en movimiento, como interruptores y generadores, otros son completamente estáticos, como los thyristores usados como conmutadores o interruptores de los elementos reactivos conectados a las líneas de transmisión. También podemos tener sistemas en los que, por la forma en que están conectados los elementos reactivos pueden ser fijos y/o conmutados y controlados. De estos 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 thyristores lo denominaremos Compensador de VARS Estático. Con respecto a los sistemas que tienen sus elementos fijos es bueno mencionar el Reactor Saturable y el Capacitor Serie. En cualesquiera de los casos anteriores, si los niveles de manejo 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 cuanto a consumo de potencia reactiva.

En los compensadores estáticos por el uso de tryristores el voltaje máximo que se puede manejar en ellos es de 34.5 KV. De los compensadores que tienen sus elementos acoplados a las líneas en forma permanente podemos mencionar al Reactor Saturable, que tiene una característica de armónicas superior a cualquier compensador estático.

Con todo lo anterior podemos hacer una lista de -- las principales configuraciones y se muestra a continuación:

- 1.- Condensador Sincrono
- 2.- Reactores Conmutados en Paralelo
- 3.- Capacitores Conmutados en Paralelo
- 4.- Capacitor Serie
- 5.- Compensador Estático:
 - a) Capacitores Conmutados con Tiristores
 - b) Reactor Controlado con Tiristores
 - c) Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Fijo
 - d) Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Segmentado.
 - e) Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Fijo conmutado.
 - f) Reactor Controlado con Tiristores, Capacitor Fijo "12 pulsos"
 - g) Transformador Controlado por Tiristor de Alta Impedancia.

- h) Capacitor Conmutado Mecanicamente , Reactor Controlado con Thyristores.
- i) Reactor Saturable.

2.2.- DESCRIPCION Y USO RECOMENDADO DE CADA UNO DE LOS COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA

2.2.1.- CONDENSADOR SINCRONO. 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. Figura N.º 1.

2.2.2 .- REACTORES CONJUNTADOS 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 generalmente operan en baja carga y en cables subterráneos, también reducen sobrevoltajes en condiciones de circuito abierto. Su configuración se puede ver en la Figura N.º 2.

2.2.3.- CAPACITORES CONJUNTADOS EN PARALELO . Seme-

jante 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 . Para su configuración se utilizan capacitores y interruptores (figura No 3.) .

2.2.4 CAPACITOR 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 4 . Este sistema se instala por las siguientes razones.

- Para incrementar la capacidad de transmisión.
- División de la carga en circuitos paralelos .

Independientemente de las razones mencionadas , el capacitor serie tiene efectos benéficos sobre el control de voltaje y potencia reactiva y por lo tanto se le 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 -- subsincrona 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 la Figura No. 5. Todos sus elementos se encuentran combinados de tal forma que en su conjunto proporcionan una 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 mas sencillos empleando interruptores convencionales.

2.2. e.- COMBINACION DE DISPOSITIVOS DE COMPENSACION. Debido al crecimiento constante de los sistemas de potencia las líneas de transmisión deberían crecer al mismo ritmo que la capacidad de generación, pero por políticas económicas o requerimientos ecológicos, que en nuestros días han adquirido gran importancia, se justifican en algunos casos agregar equipo de compensación de reactivos generalmente -

diferente al instalado inicialmente, que permite optimizar la transmisión de potencia a través de una línea. Esta diversificación e incremento de compensación lo determinan también las nuevas cargas conectadas al sistema. En sí, el hecho de 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.

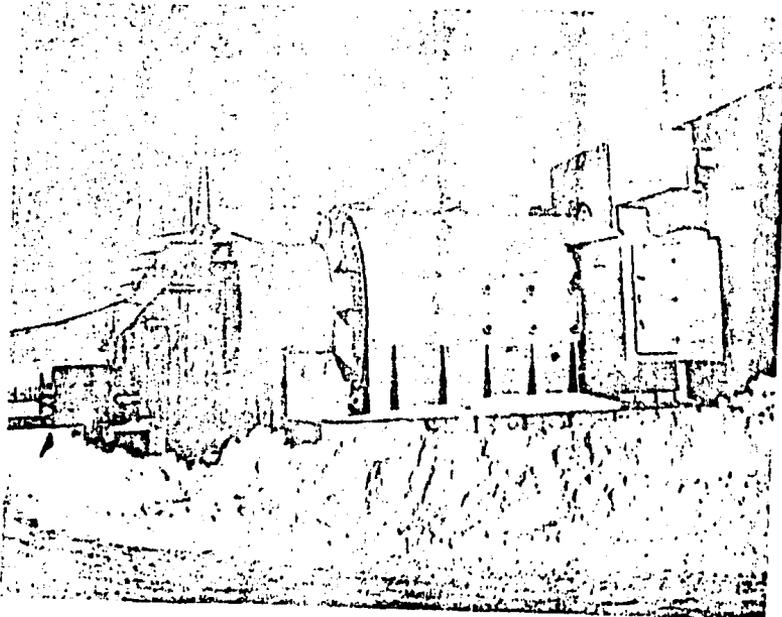


FIGURA N° 1.

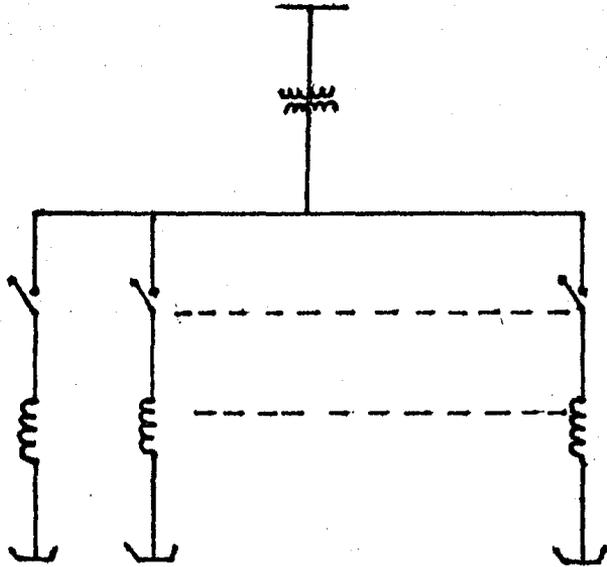


FIGURA N° 2 .- REACTORES CONMUTADOS EN PARALELO.

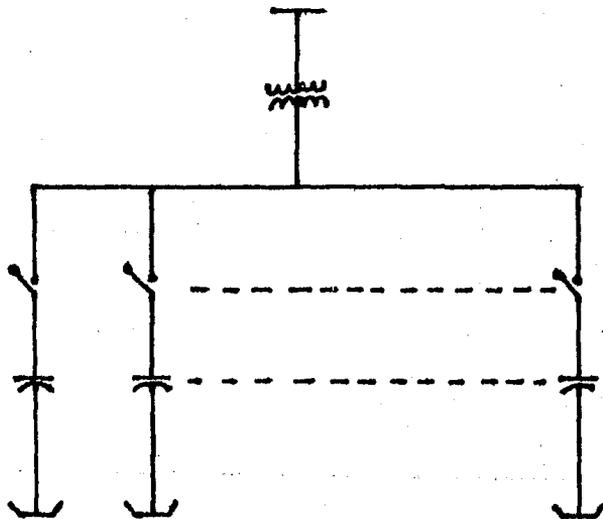


FIGURA N° 3. CAPACITORES CONMUTADOS EN PARALELO

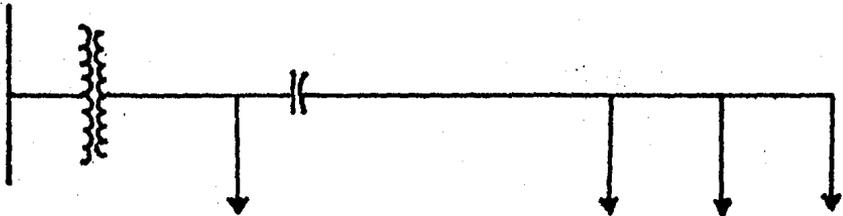


FIGURA N° 4. CAPACITOR SERIE

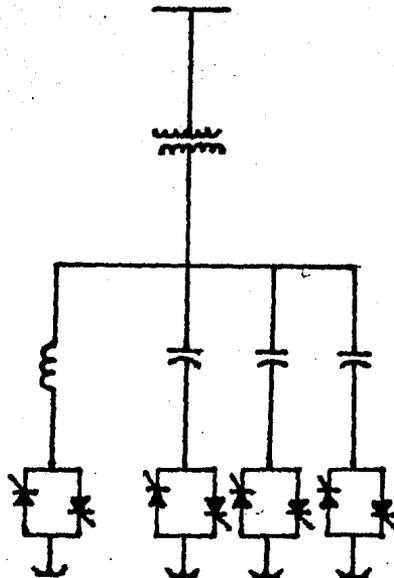


FIGURA N° 5. COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS

C A P I T U L O I I I

EL COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA

- 3.1 Capacitores Conmutados con Thyristores.
- 3.2 Reactor Controlado con Thyristores.
- 3.3 Reactor Controlado con Thyristores, Capacitor
 Conmutado con Thyristores.

III.- COMPENSADORES ESTATICOS DE POTENCIA

REACTIVA

En el capítulo anterior observamos que son múltiples las configuraciones para este tipo de compensador, de las cuales consideramos únicamente algunos por ser más representativos, pero con esto no restamos de ninguna manera la importancia de las demás. El compensador controlado por Thyristores en general complementa y algunas veces reemplaza al compensador síncrono pues tiene las grandes ventajas de una respuesta rápida y conversión de la energía con pequeñas pérdidas.

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 transitorios que necesiten de respuestas rápidas. Para evi

tar esto, en la sección de control se hace necesario tener hasta tres variables.

Al considerar las partes inductiva y capacitiva máximas requeridas en el compensador estático se tiene que tomar en cuenta la transmisión de potencia máxima y la minima 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 energía a transmitir. Este tema lo trataremos ampliamente en otro capítulo.

Con respecto al tamaño máximo de escalones en la potencia de compensación, esto se debe considerar sobre todo en los sistemas de capacitores conmutados, pues la compensación aquí se va realizando de manera escalonada, tomando en cuenta valores discretos.

Para la elección del sistema de compensación mas adecuado no solo se considera lo antes mencionado, la mayor parte de las veces se define por su costo y este incluye no solamente el precio instalado (inversión inicial), sino también costos de operación que se desglosa en mantenimiento y pérdidas, de las cuales estas últimas, tienen un valor alto debido al costo de la energía.

3.1 CAPACITORES CONMUTADOS CON THYRISTORES

En principio los condensadores se han usado para compensar reactivos en sistemas de distribución y en plantas industriales y generalmente son fijos o 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 Thyristores como se puede ver en la Figura N. 1, donde se indica una reactancia en serie que limita la corriente a través de los Thyristores 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 puede proporcionar en forma escalonada el compensador se puede implementar como en la Figura N. 2. En este último caso se puede conectar un escalón de capacitores con un mínimo de transitorios si se da un impulso de encendido al interruptor de Thyristores en el momento en que la tensión de la red son iguales, en este instante la tensión a través de los Thyristores es cero. La desconexión se puede efectuar con un retardo máximo de medio período bloqueando los impulsos de disparo a los Thyristores. Con los impulsos de disparo bloqueados, los Thyristores permanecen en estado de no conducción y el escalón del condensador empieza a

descargarse a través de la resistencia de descarga conectada en paralelo con él. El efecto de conectar el condensador con distintas cargas eléctricas cuando la tensión a través de los Tiristores es cero lo podemos ver en el oscilograma de la Figura No. 3.

3.2.- REACTOR CONTROLADO POR TIRISTORES

Como ya se indicó en el capítulo No. 2, su uso se recomienda para evitar sobrevoltajes y compensación de reactivos capacitivos. Su conexión se hace como lo indica la Figura No. 4, que por lo demás es muy sencilla y puede ser acoplada al sistema por medio de los Tiristores usándolos como sistema de conmutación y además ser controlado por los mismos variando el ángulo de fase de conexión y desconexión. Cuando se usa el control del ángulo de fase se obtiene un cambio continuo en el consumo de potencia reactiva pero a expensas de la generación de 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 2 veces por período, como se ve en la Figura No. 5.

El hecho de controlar el período de conducción de los Tiristores implica la generación de armónicas de orden

3°, 5°, 7°, 9°, 11° y 13° con amplitudes de 13.8%, 5% y 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 No. 6. Sin embargo, con control equilibrado los componentes de sucesión nula (3°, 9°, etc.) sólo circularán entre las reactancias en el caso de conexión en triángulo, o en el devanado delta del transformador para conexión estrella. En la corriente de la línea debido a diferencias asimétrías solo se presentará una pequeña parte de estas armónicas. A pesar de esto, puede resultar necesario reducir las armónicas aún más adoptando soluciones según sea el caso.

3.3. REACTOR CONTROLADO CON TIRISTORES, CAPACITOR CONMUTADO CON TIRISTORES.

La figura No. 7, muestra la configuración de un CST/RCT. Como se observó el tipo CST tiene un control por-escalón de la potencia reactiva mientras que el RCT el control es continuo (fino). Al tenerse una combinación de estos dos tipos, se logra un control fino de la potencia reactiva tanto inductiva como capacitiva por medio del RCT. Considerese arbitrariamente que cada una de las tres ramas de la figura No. 7 es de cincuenta MVAR y que el CEV (COM PENSADOR ESTÁTICO DE VARS) esta operando como reactor (RCT).

Si por exigencias del sistema se requieren MVAR capacitivos, la corriente por el reactor empieza a disminuir por acción del control del intervalo de conducción de los Tiristores hasta llegar a cero. Un instante después se conecta una rama capacitiva a plena capacidad entrando simultáneamente a a plena conducción el RCT (modo Reactor Switchado por Tiristor) de tal forma que los reactivos netos al sistema son cero. A medida que se requieran MVAR'S capacitivos, la corriente por el reactor se disminuye paulatinamente hasta que al llegar a cero se tienen 50 MVAR capacitivos inyectados al sistema, si aún por exigencias del voltaje de operación del sistema se requieren mas MVAR capacitivos la rama C2 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 ser cero se tienen 100 MVAR capacitivos netos inyectados al sistema. Este procedimiento de control lo podemos observar gráficamente en la Figura No. 8.

Las características de este tipo son:

- Control fino de la potencia reactiva (inductiva y capacitiva)
- No se tienen transitorios

- Baja generación de armónicas
- Tiempo de respuesta de 1-2 a 1 ciclo a una orden del regulador.

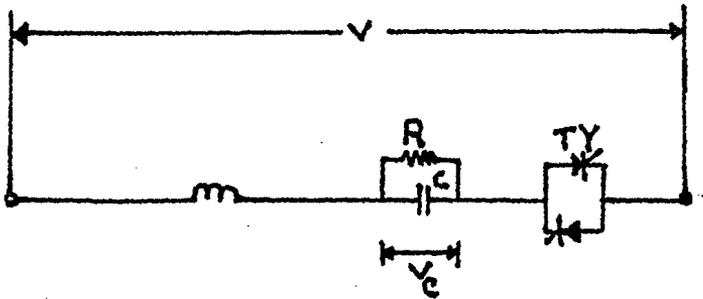


FIGURA No 1.

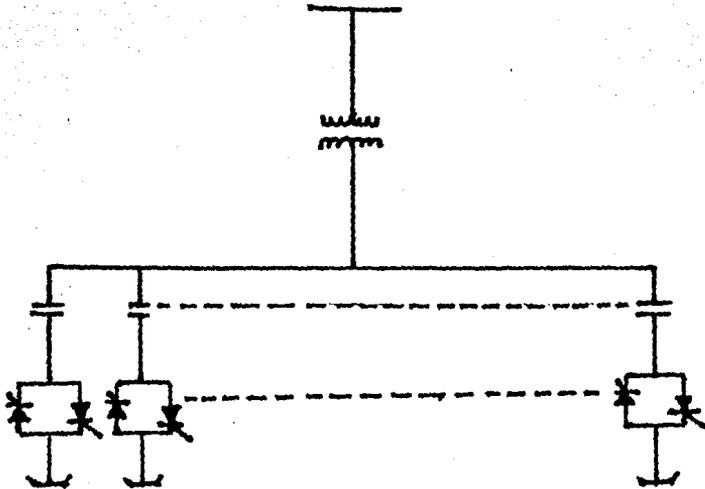


FIGURA No. 2.

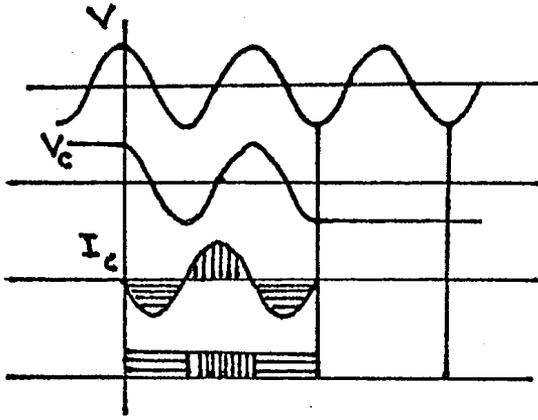


FIGURA No 3.



FIGURA No 4.

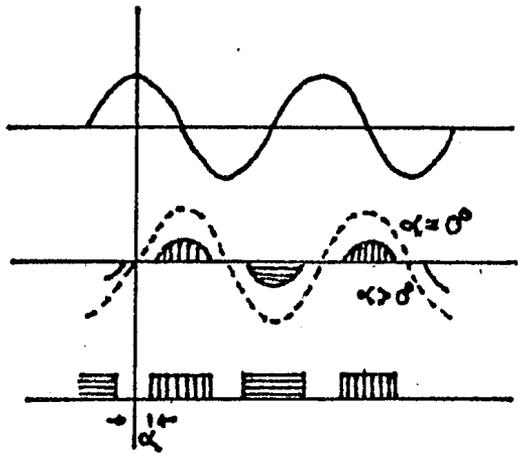


FIGURA No 5.

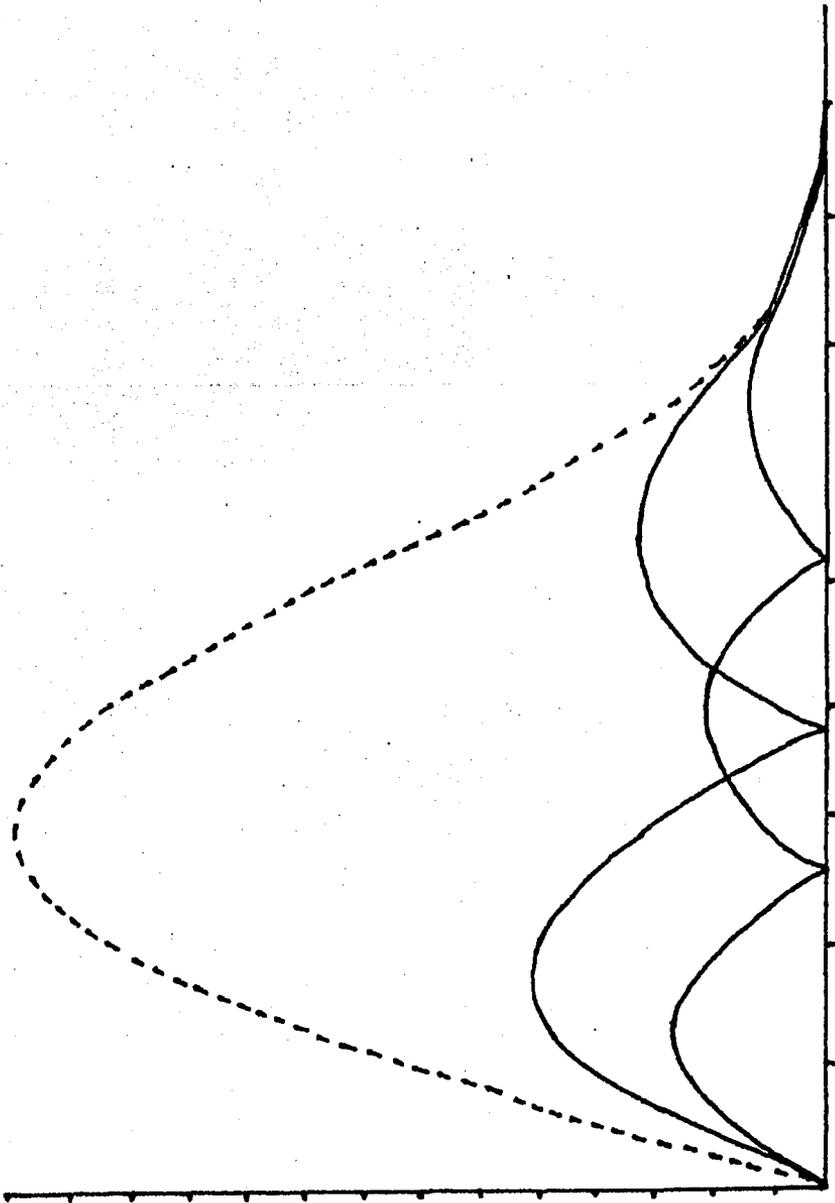


FIGURA No 6. .

C A P I T U L O I V

OPERACION DEL THYRISTOR

- 4.1 Generalidades (Introduccion a la Electronica de Potencia)
- 4.2 Principio de Operación del Rectificador Controlado de Silicio (SCR)
- 4.3 Característica de la Compuerta
- 4.4 Métodos de Disparo del SCR
- 4.5 Métodos y Circuitos de Eloqueo
- 4.6 Tiempos de Conmutacion de un SCR
- 4.7 Conexiones de Thyristores
- 4.8 Protecciones
- 4.9 Influencia de la Velocidad de Crecimiento de la Corriente (di/dt)
- 4.10 Montaje en Triac

IV .- OPERACION DEL THYRISTOR

4.1 .- GENERALIDADES (INTRODUCCION A LA ELECTRONICA DE POTENCIA

La introduccion del Thyristor en 1955 , ha producido cambios revolucionarios en el campo del control de la Potencia Electrica. Mientras que estos cambios fueron inicialmente aplicados en la mas baja potencia (tipicamente para el control y el manejo de los motores), su impacto hasta ahora ha sido propagado através de toda la Ingenieria Electrica de Potencia alcanzando el campo de los Sistemas de Potencia.

La principal razon para esto es la habilidad de los Thyristores para proporcionar un rápido. eficiente y muy compacto método para el control de grandes cantidades de Potencia Elctrica ; de hecho en algunas aplicaciones, tales como un control de Vars Estatico, los reguladores de Thyristor estan dando una nueva dimension a la realizacion de los sistemas.

4.2.- PRINCIPIO DE OPERACION DEL RECTIFICADOR CON CONTROLADO DE SILICIO (SCR)

El rectificador controlado de silicio es un dispositivo semiconductor formado por cuatro capas, dos de ellas tipo N y dos tipos P, colocadas alternadamente. Posee tres terminales externas denominadas "anodo", "catodo" y "compuerta". En la Figura No. 1 se muestra el simbolo del dispositivo y en la Figura 2 la estructura fisica del mismo.

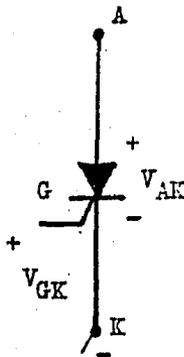


FIGURA N° 1.

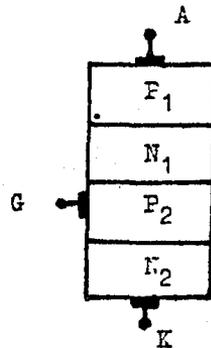


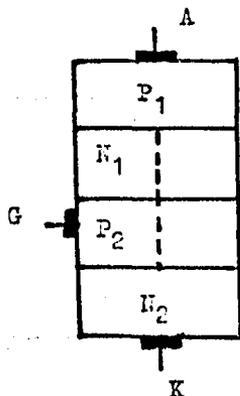
FIGURA N.º 2.

Este dispositivo se parece al diodo rectificadr en - que requiere una polaridad adecuada para conducir; es decir V_{AK} sea positivo. Ademas de esta condición, se requiere aplicar una señal a la compuerta del dispositivo a-

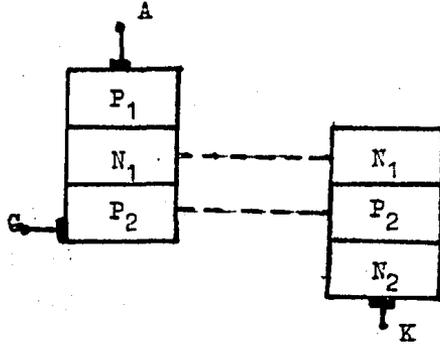
fin de que éste entre en conducción; si no se aplica la señal de compuerta, el SCR permanecera apagado a un cuando V_{AK} sea positivo.

Por otro lado, si V_{AK} es negativo, el dispositivo es tará apagado aunque se le proporcione una señal a la compuerta.

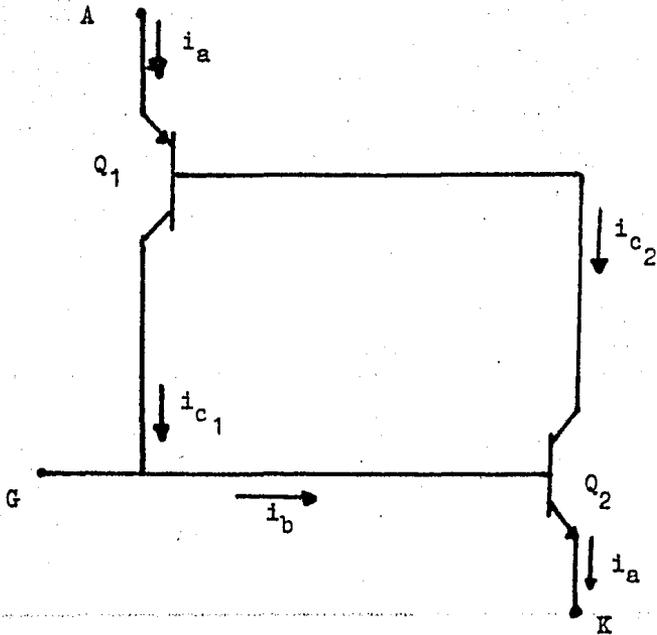
Para comprender la operación del dispositivo, es necesario recurrir al diagrama de la estructura física. Podemos dividir las dos capas centrales del SCR (N_1 y P_2) - tal como se muestra en la Figura No. 3 a. A continuación - separamos la estructura en dos partes, cada una de ellas - formada por tres partes o capas (Figura No. 3b). Cada parte corresponde entonces a la estructura de un transistor - de modo que podemos plantear el modelo equivalente de la - Figura No. 3c.



(a)



(b)



(c)

FIGURA No. 3.

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

Supongase ahora que ambos transistores están debidamente polarizados (V_{AK}) positivo, pero apagados. Si se inyecta una corriente en la compuerta, esta fluye hacia la base de Q_2 , generando en éste una corriente de colector, 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. Cuando esto ocurre, el funcionamiento del SCR se hace independiente de la señal de la compuerta; es decir, ésta sirve únicamente para encenderlo.

En términos de corriente se tiene lo siguiente:

$$i_a = i_{c1} + i_{c2} + I_{c0}$$

Donde I_{c0} es la corriente de fuga en la unión común $N_1 - P_2$.

$$i_a = \alpha_1 i_{e1} + \alpha_2 i_{e2} + i_{c0}$$

Pero, como puede apreciarse del circuito:

$$i_{e1} = i_{e2} = i_a$$

Por lo tanto;

$$i_a = (\alpha_1 + \alpha_2) i_a + I_{c0}$$

De donde se obtiene:

$$i_a = \frac{I_{c0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Si $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$ entonces i_a sera pequeña porque i_{c0} también lo es; esta condición corresponde al apagado del dispositivo.

Si $(\alpha_1 + \alpha_2)$, se aproxima a la unidad entonces crecera y estará limitada únicamente por la imperancia de -- carga del SCR: esta condición corresponde al encendido -- SCR .

En la figura 4 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, existe un efecto de avalancha que encendera al SCR; este efecto limita el voltaje en directa que el SCR es capaz de bloquear.

— RAZON DE CAMBIO DE VOLTAJE.— La región vacía de la unión $N_1 P_2$ presenta las características de un capacitor.

Si el voltaje Anodo-catodo- varia muy abruptamente entonces fluira una corriente en la unión y encendera el SCR, - este efecto se conoce como dv/dt .

— TEMPERATURA.- A altas temperaturas I_{CO} aumenta es to casiona un aumento en las corrientes de colector tal -- que $(\alpha_1 + \alpha_2)$ se aproxima a la unidad.

— CUANDO SE ILUMINA MEDIANTE UN HAZ LUMINOSO.- La- unión entre la puerta y el catodo puede provocar la conduc ción del Tiristor, debido a que esta luz puede suministrar la energía suficiente para romper el enlace o enlaces en - esta zona, produciendose los portadores minoritarios sufi- cientes para que el Tiristor conduzca. Los Tiristores que utilizan este tipo de excitacion para el disparo son cono- cidos como "LASCR" light Activated Silicon Controlled Rec- tifiers.

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

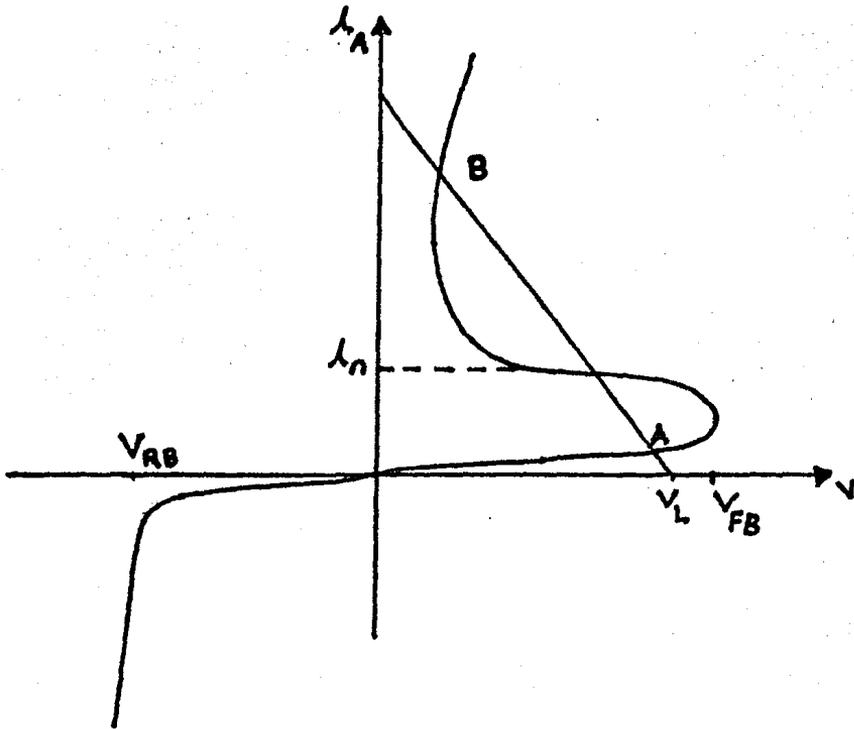


Figura 4.- Característica Voltaje- Corriente del SCR.

4.3 - CARACTERÍSTICA DE COMPUERTA

La característica de compuerta es la que simboliza (I_g, V_{GK}) con una corriente de anodo nula, esta es, entonces las características del diodo de unión P-N de Compuerta Catodo correspondiente a un Tiristor bloqueado.

Las características de compuerta presenta gran dispersión. El fabricante indica la zona del plano (V_{GK}, I_g)

donde se localiza la característica de compuerta cualquiera - que sea la componente de un tipo dado. Esta region se halla - limitada por dos curvas C_1 y C_2 que son las características - de corriente y voltaje de componentes extremas . todo esto se esquematiza en la figura 5 .

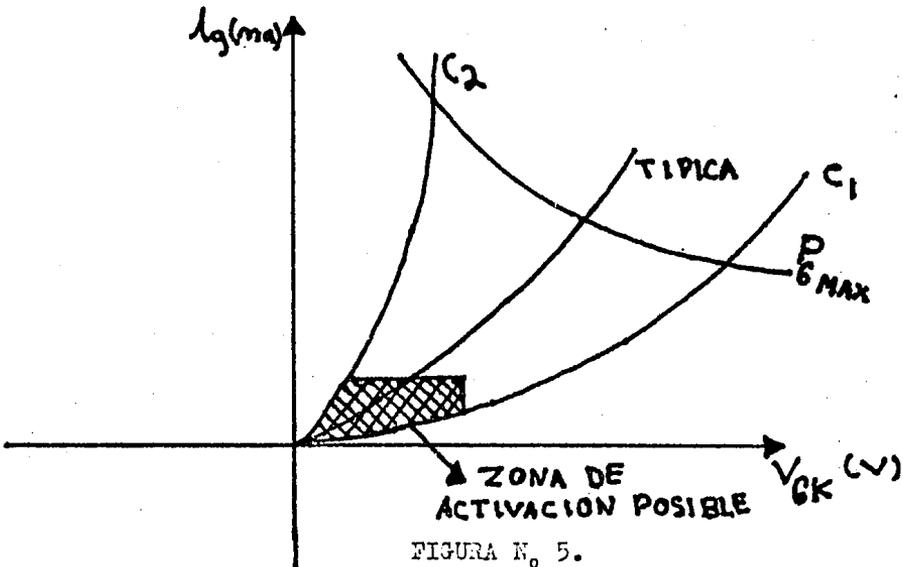


FIGURA N.º 5.

4.4 MÉTODOS DE DISPARO DEL SCR

El termino "DISPARO DEL SCR" se refiere a la aplicación-- de una excitacion a la compuerta , tal que lleve al dispositi vo al estado de conducción.

Existen dos formas de excitar la compuerta estas son:

1) Disparo por aplicación de un voltaje continuo , se mantiene la excitación en la compuerta durante todo el lapso en el cual el SCR debe estar encendido . Como se muestra en la figura 6.

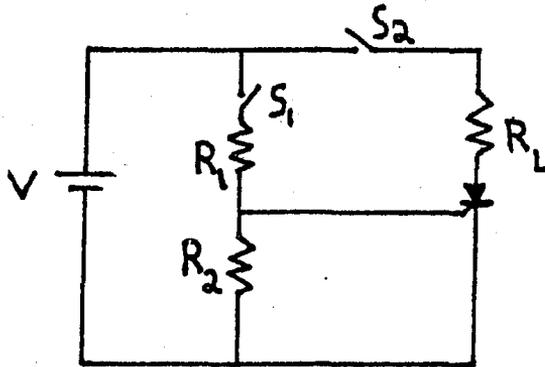


FIGURA N.º 6.

2) Disparo por aplicación de un pulso .- La excitación en la compuerta se mantiene hasta que la corriente del SCR es superior a la corriente de amarre , como se muestra en la figura 7.

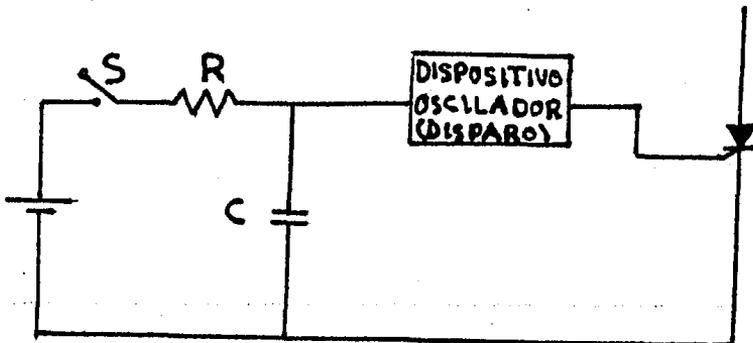


FIGURA N.º 7.

Una vez encendido , la unica forma de lograr que un SCR recobre su condicion de bloqueo , es disminuyendo la corriente a través de él , a un valor inferior a la corriente de mantenimiento durante un tiempo superior al tiempo de apagado -- del dispositivo.

4.5 MÉTODOS Y CIRCUITOS DE BLOQUEO

Hay distintos metodos para que un SCR pase de la zona de conduccion a la zona de bloqueo , se pueden agrupar genericamente en tres grupos.

1) Conmutacion Natural-. Cuando se provoca que la corriente de paso se hace inferior , a la corriente de mantenimiento , bien sea interrumpiendo su paso con un interruptor ; bien sea aumentando la impedancia de la carga , derivando la -- corriente en paralelo mediante un interruptor , un transistor , etc como se muestra en la figura 8.

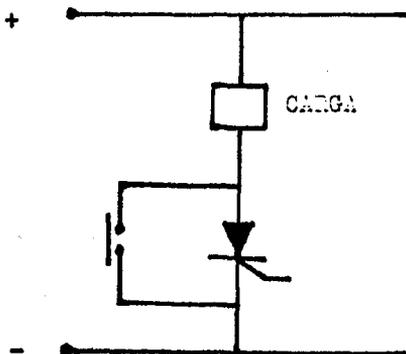


FIGURA N.º 8.

2) Conmutación Forzada.- Cuando se invierte la tensión entre anodo y catodo del SCR mediante un circuito exterior. Como se muestra en la Figura No. 9.

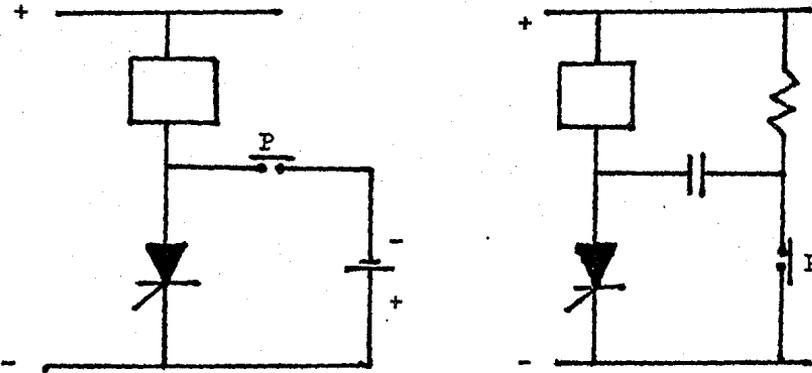


FIGURA N.º 9.

3) Conmutación de Línea.- Si el circuito está alimentado en alterna al llegar el semiciclo negativo el SCR deja de conducir.

4.6.- TIEMPOS DE CONMUTACION DE UN SCR

TIEMPOS DE ACTIVACION.

Quando se aplica un pulso de control a un SCR, que tiene una diferencia de potencial positiva V_{AK} , esta no decrece inmediatamente. Puesto que el impulso se aplica cuando $T = 0$ y la diferencia de potencial V_{AK} tiene un valor inicial V_0 .

La diferencia de potencial V_{AK} equivale al 90% de V_0 al principio del tiempo.

La diferencia de potencial V_{AK} se hace igual al 10% de V_0 al principio del tiempo T_2 , este es el método para definir la demora o retraso de activación T_1 y el tiempo de descenso $T_2 - T_1$ de la diferencia de potencial V_{AK} .

Los fabricantes administran a menudo los tiempos de activación T_2 , mismos que son del orden de unos cuantos - microsegundos y depende esencialmente del tiempo de ascenso de la corriente de compuerta y el valor máximo, - - - que esta adquiere. Todo esto se muestra en la figura 10.

TIEMPOS DE DESACTIVACION.

En lo que respecta a la desactivación de un SCR, - por ejemplo de conmutación obligada.

Las graficas de corriente de anodo y la diferencia de potencial V_{AK} (t) tiene la forma de la figura No. 11.

La conmutación se inicia en el instante $T = 0$ y la corriente, la diferencia de potencial V_{AK} disminuyen para anularse en el instante T_1 . El circuito de conmutación impone una nueva disminución de la diferencia de potencial V_{AK} , que se hace negativa.

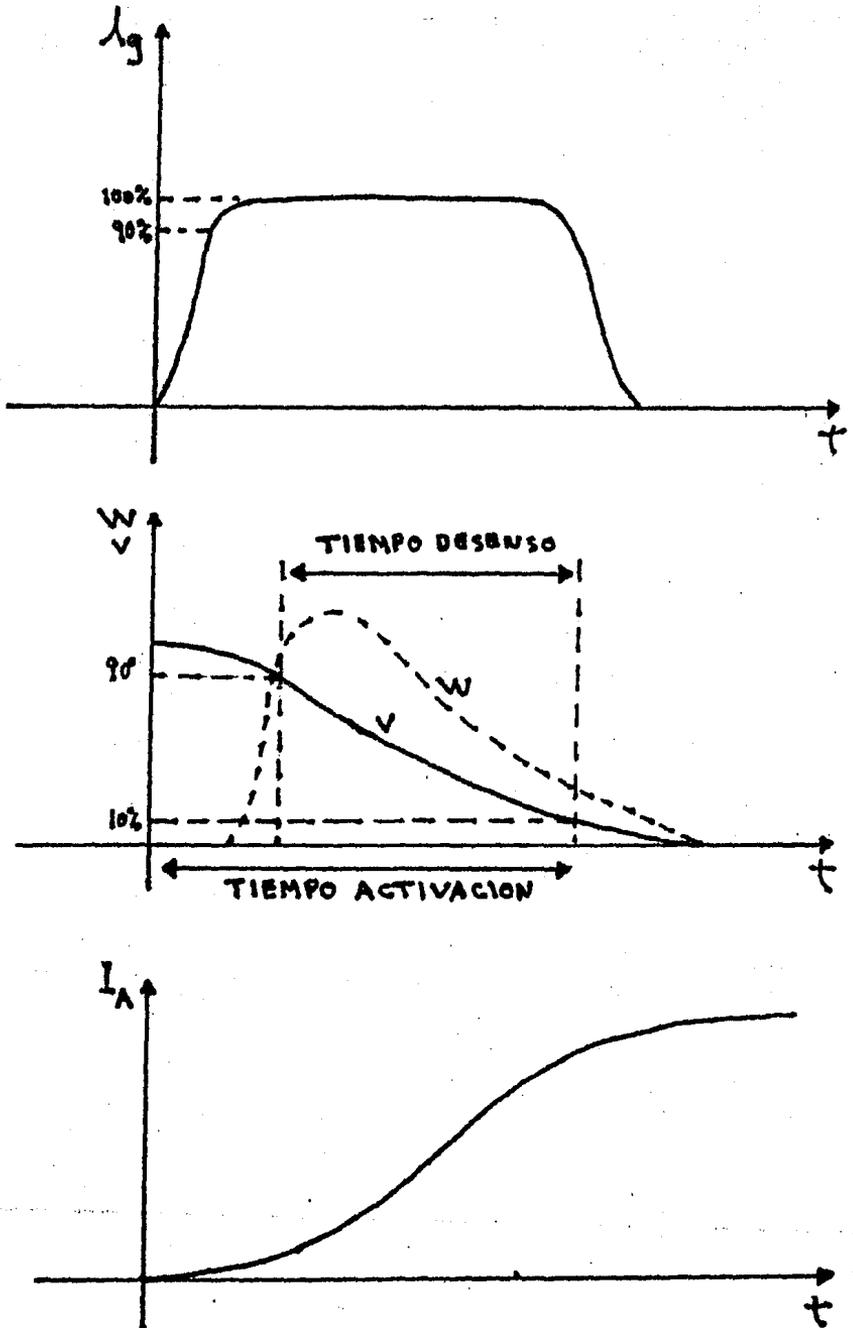


FIGURA N.º 10.

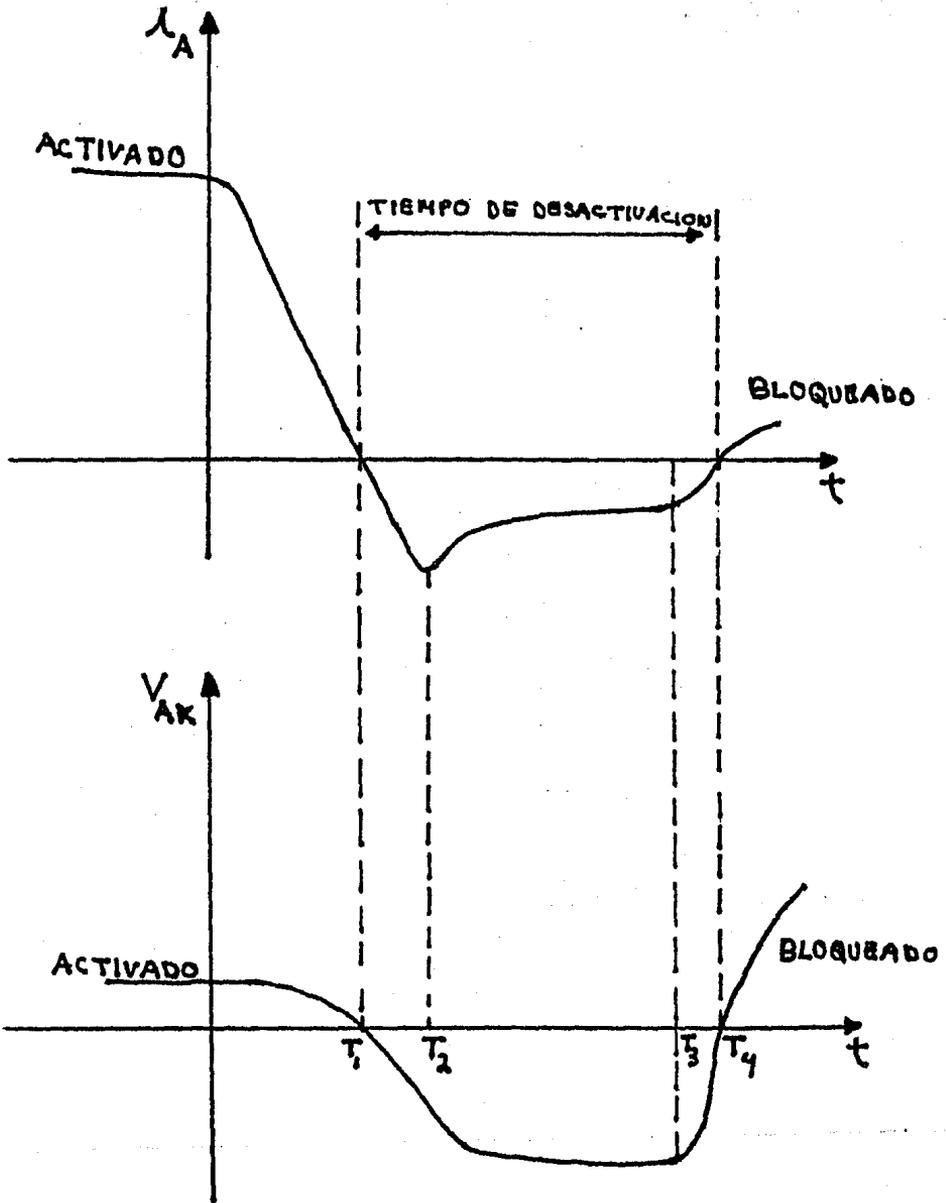


FIGURA N.º 11.

Por tanto se puede comprobar un punto de corriente negativa y después una corriente inversa en tanto V_{AK} se mantenga negativa. En ausencia de cualquier actividad en el circuito de compuerta, el SCR se mantendrá bloqueado si la diferencia de potencial V_{AK} se conserva en un valor negativo durante un lapso suficientemente largo. En la figura N° 11, V_{AK} vuelve a hacerse positiva en el instante.

Por definición se da el nombre de Tiempos de desactivación del SCR a los instantes. Estos tiempos varían de unos microsegundos para los SCR de potencia baja, hasta un centenar de microsegundos aproximadamente para los Tiristores de gran potencia.

Por tanto, la frecuencia máxima de utilización de un SCR es limitada.

4.7. CONEXIONES DE TIRISTORES

Para alcanzar altos valores medios de corriente en la carga debe recurrirse a la conexión en paralelo de los SCR y en serie para alcanzar altos valores de tensión.

Ocurre sin embargo, tanto en la conexión en serie como en paralelo, que aunque los elementos conectados sean todos originalmente idénticos sus características

presentan ciertas variaciones de unos con respecto a ---
otros, debido a las tolerancias constructivas

CONEXION EN SERIE

Para trabajar con una tensión elevada, conectamos--
un grupo de Thyristores en serie, y sucede que al pasar -
los elementos SCR del estado de conducción al de no con--
ducción, es decir cuando cambia la polaridad de la tensión
a rectificar, no todos ellos dejan de conducir corriente--
al mismo tiempo . A causa de 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 tensi--
ón inversa a rectificar, para lo cual el no esta direncio
nado.

Para solucionar este problema se recurre a conectar -
en paralelo con cada elemento rectificador una red equili
bradora; cuya misión es la de distribuir equitativamente
la tensión entre ellos; esta red esta formada generalmen--
te por una resistencia y un condensador en paralelo, como
se indica en la figura N.º 12.

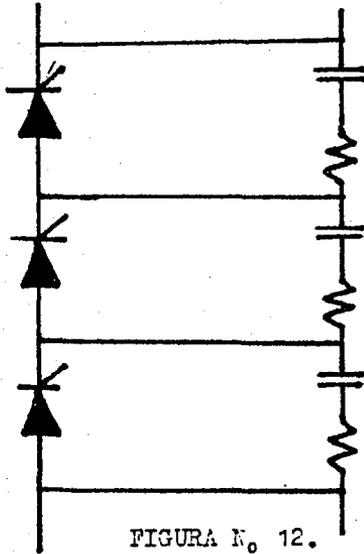


FIGURA N.º 12.

CONEXION EN PARALELO

Quando se pretende obtener una elevada intensidad de corriente se conectan los elementos SCR en paralelo.

En esta conexión el problema que se presenta es que en el sentido directo de conducción, no todos los elementos SCR conducen la misma corriente; ello es debido también a las pequeñas diferencias que impone la tolerancia en los elementos SCR de un mismo tipo.

Para solucionar el problema que presenta la conexión en paralelo de los elementos rectificadores, se recurre a montar estos apareados, como si entre ambos formasen un solo elemento. Este problema se puede solucionar también conectando una resistencia en serie con cada SCR.

También puede intentarse solucionar este problema dotando a los elementos SCR de elementos de refrigeración cuya acción sea superior a la que teóricamente necesita el elemento, con ello puede evitarse la destrucción de los elementos, aunque se encarezca la instalación. Se puede ejemplificar lo dicho anteriormente con la Figura No. 13.

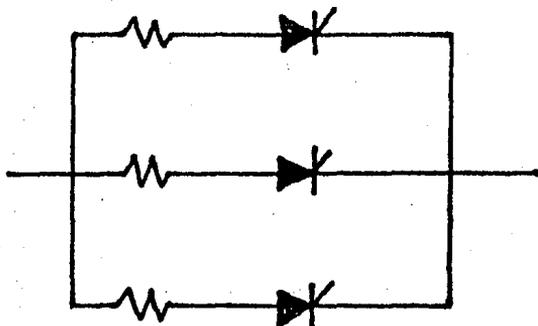


FIGURA N. 13.

4.8.- PROTECCIONES.

Por su naturaleza los elementos SCR son inherentemente incapaces de sostener sobrecargas, por esto los SCR 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 éstos. Pero se puede tomar en cuenta:

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

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 el condensador y posterior disipación de ella a una velocidad mucho mayor.

Conexión en paralelo con el circuito a proteger de elementos supresores de Selenio (KLIP-CRILL) que presentan una brusca caída de tensión cuando se sobrepasa su tensión inversa, conexión de resistencias no lineales VDR. Empleo de redes RC , ya sea en paralelo con cada SCR o cada rama. En este caso el condensador almacena energía correspondiente , debido a la sobretensión , descargandose seguidamente sobre la resistencia . Como se indica en la siguiente

figura N° 14:

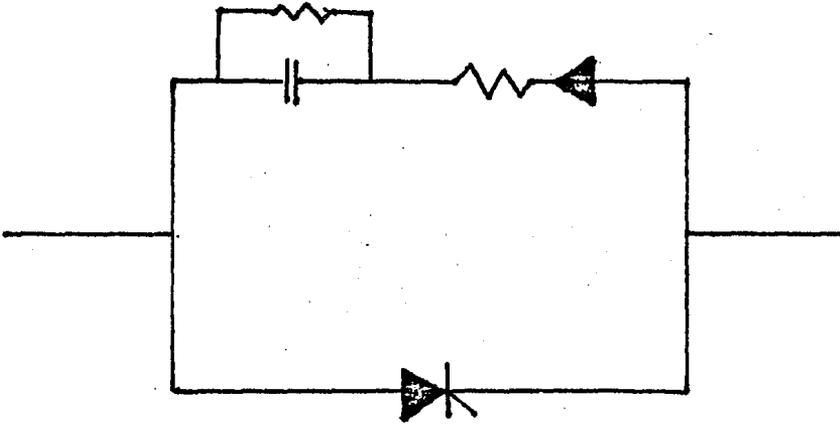


FIGURA N.º 14.

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 milísegundo, provocando un calentamiento local muy pronunciado.

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

- Diseño sobrado del SCR
- Impedancia de línea limitadora de corriente
- 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 ANODO Y CÁTODO no disminuye instantáneamente, habrá una presencia simultánea de corriente y tensión en una pequeña zona, 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 destruido por ser di/dt elevada, para poder trabajar con altas di/dt es conveniente que el tiempo de subida de la corriente de puerta sea muy corto.

El método común de protección del Tiristor frente a di/dt es el de colocar en serie con éste una inductancia.

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 como se indica - la Figura No. 15.



FIGURA N.º 15.

CONFIGURACION DE TIRISTORES

La configuración de la Figura No. 16 incluye dos Tiristores Th_1 y Th_2 en paralelo. La configuración se denomina "DE AZADA" porque:

- El Catodo de Th_1 se enlaza al anodo de Th_2
- El Catodo de Th_2 se enlaza al anodo de Th_1

Así se obtiene $V_{AK} = - V_{AK}$. Como un Tiristor se excita solo cuando la diferencia de potencia anodo - catodo es positiva, cuando mucho un solo Tiristor conduce. El circuito de control en día pulsos de corriente a las compuertas de cada Tiristor.

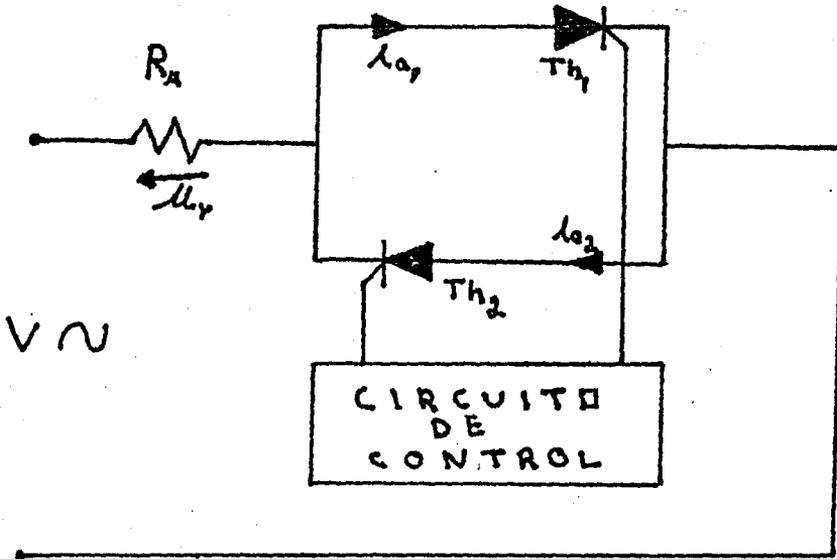


Figura No. 16.

4.10.- MONTAJE DEL TRIAC.

Es posible simplificar la configuración anterior (Figura No. 16) utilizando un TRIAC que equivale a un Tiristor bidireccional. El símbolo del TRIAC, además de su característica estacionaria se ilustra en la Figura No. 17.

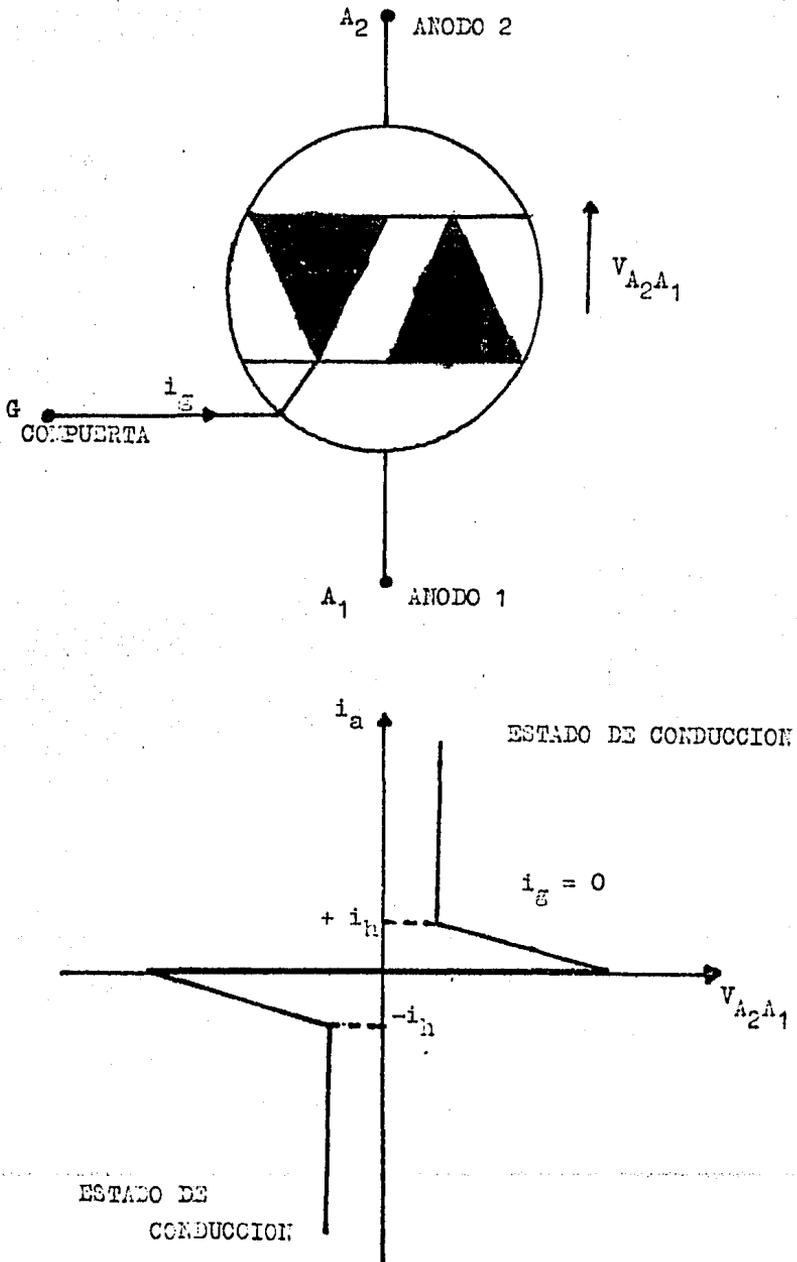


FIGURA N.º 17.

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 es positiva con i_A circulando del anodo hacia el catodo, el TRIAC puede conducir en ambos sentidos y se puede excitar, cualquiera que sea la polaridad de la diferencia de potencial $V_{A_2 A_1}$.

La excitación de un TRIAC se puede efectuar con ayuda de la Figura No. 18.

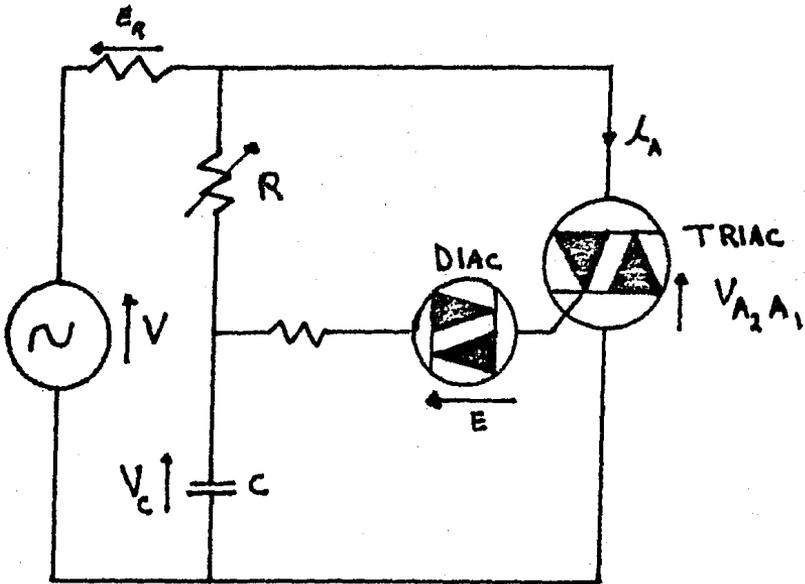


Figura No. 18.

Esta configuración lleva un diodo bidireccional denominado DIAC cuya característica de corriente y voltaje

se muestra en la Figura No. 19.

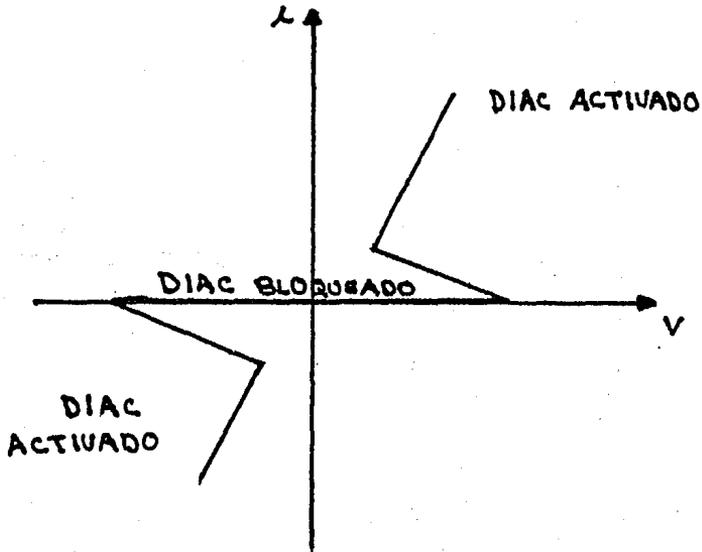


Figura No. 19.

Como V es positivo, el capacitor C 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 $V_{A_1 A_2}$ del TRIAC conductor es muy débil en relación con V).

En el momento que V 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 poten- cial alternante en las terminales de la carga, para ajus- tar el valor eficaz de V_R , se puede modificar el tiempo- de conducción del TRIAC durante cada alternancia cambiando la constante de tiempo $\tau = (R + R_A) \cdot C$ de carga del ca- pacitor. Por ejemplo, una disminución de R implica una - carga más rápida de C, una excitación más temprana y un va- lor eficaz más grande .

C A P I T U L O V

C O N T R O L Y G E N E R A C I O N D E A R M O N I C A S

V.- CONTROL Y GENERACION DE ARMONICAS

De los diferentes dispositivos citados anteriormente, -- los Compensadores Estáticos son los de interés para nosotros. Existen un número de diferentes tipos de dispositivos controlables externamente, dentro de los cuales, los más interesantes son: Los capacitores conmutados por Thyristores y los --- reactores controlados (ángulo de fase) por Thyristores.

Los capacitores en paralelo, están divididos en pasos que son conmutados, es decir, conectados o desconectados, individualmente por Thyristores Bidireccionales. Cada paso de este tipo de compensador, esta integrado por dos elementos más importantes, el capacitor C y el conmutador TY, como se muestra en la Figura N.º 1. Además, se puede ver un elemento menor, un reactor, cuyo propósito es limitar la corriente a través del Thyristor y prevenir la resonancia con la red.

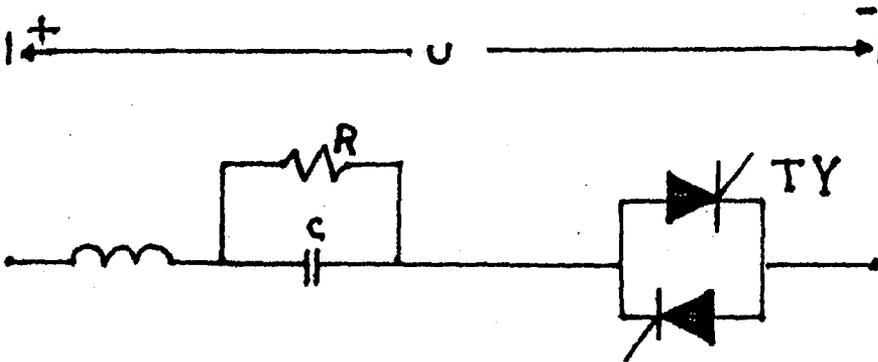


Figura N.º 1.

En la figura N.º 2, se puede observar el funcionamiento de este compensador. Primeramente, se escoge conectar los capacitores, en el instante cuando ocurre el paso natural por cero de la corriente y se mantienen cargados al valor pico, positivo o negativo del voltaje de operación de la red, durante el tiempo, que están en espera de funcionar.

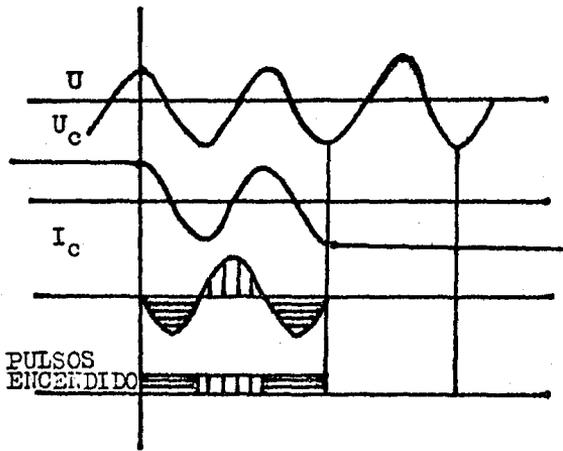


Figura N.º 2.

La desconexión de los capacitores, implica la suspensión de pulsos de encendido para los Thyristores, los cuales se apagarán 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 -

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 desliga, por la forma de conmutar la operación de este compensador, es la No Generación de Armónicas.

En el esquema básico de un compensador estático (fig. 3) del tipo reactor controlado (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 el cual no se muestra.

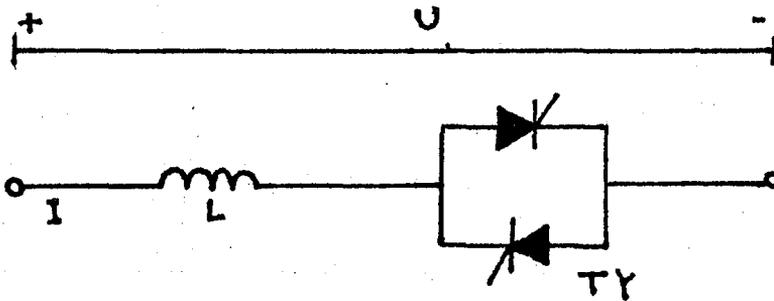


Figura No. 3.

El principio de operación se muestra en la Figura No. 4; donde la corriente, y por supuesto la componente fundamental de ésta, es controlada por el defasamiento del

encendido del Tiristor, con respecto al paso natural por -
cero de la misma.

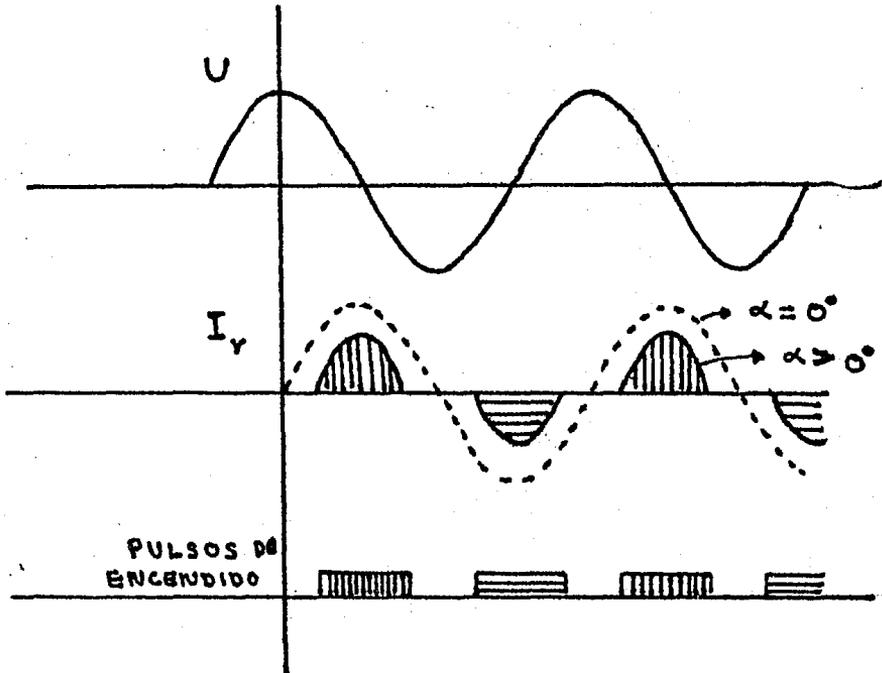


Figura No. 4.

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

Además y como algo importante, tienen como 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 ha-
ber realizado una evaluación de las pérdidas, desde el pun-
to de vista económico.

En párrafos anteriores hemos visto que una de las-
características importantes, tanto en los capacitores para
lelos, así como en los reactores controlados, es la no ge-
neración y la generación de armónicas respectivamente.

La corriente en un reactor controlado por Thyris-
tor (TCR), puede ser controlada desde cero hasta un valor-
máximo, de acuerdo al diseño del TCR, ejerciendo dicho con-
trol sobre el ángulo de encendido α , que muestra la si-
guiente figura (Figura N.º 4) y donde se puede observar tam-
bién la forma de onda que la corriente presenta.

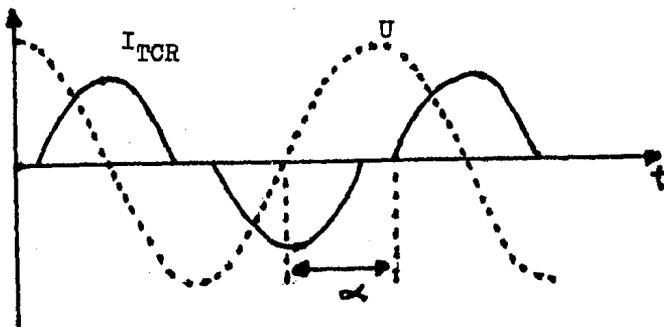


Figura N.º 5.

Si $\alpha = 90^\circ$ el Tiristor esta conduciendo totalmente, por lo que el TCR se comporta como un reactor paralelo normal. -- Así también cuando $\alpha = 180^\circ$ el Tiristor bloqueará el paso de la corriente, manteniéndola en cero. Para otros ángulos de control entre 90° y 180° , el Tiristor permitirá el paso de corriente en solo una parte del ciclo, como se ve en la Figura No. 5.

De la misma figura 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-

. Esta dependencia se puede observar en la siguiente gráfica, 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 como una función del ángulo de control. El valor máximo de cada armonica se lista en la tabla siguiente:

Se puede observar en la gráfica que estos valores máximos tabulados no suceden simultáneamente para todas las armónicas y además son válidos para cada fase en un TCR.

<u>n</u>	<u>In max/Io</u> <u>(%)</u>	<u>n</u>	<u>In max/Io</u> <u>(%)</u>	<u>n</u>	<u>In max/Io</u> <u>(%)</u>
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	0.20	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

Ahora bien, para TCR's existen dos formas posibles de conexión como a continuación se muestra; ambas se comportan de la misma manera vistas desde las terminales de entrada.

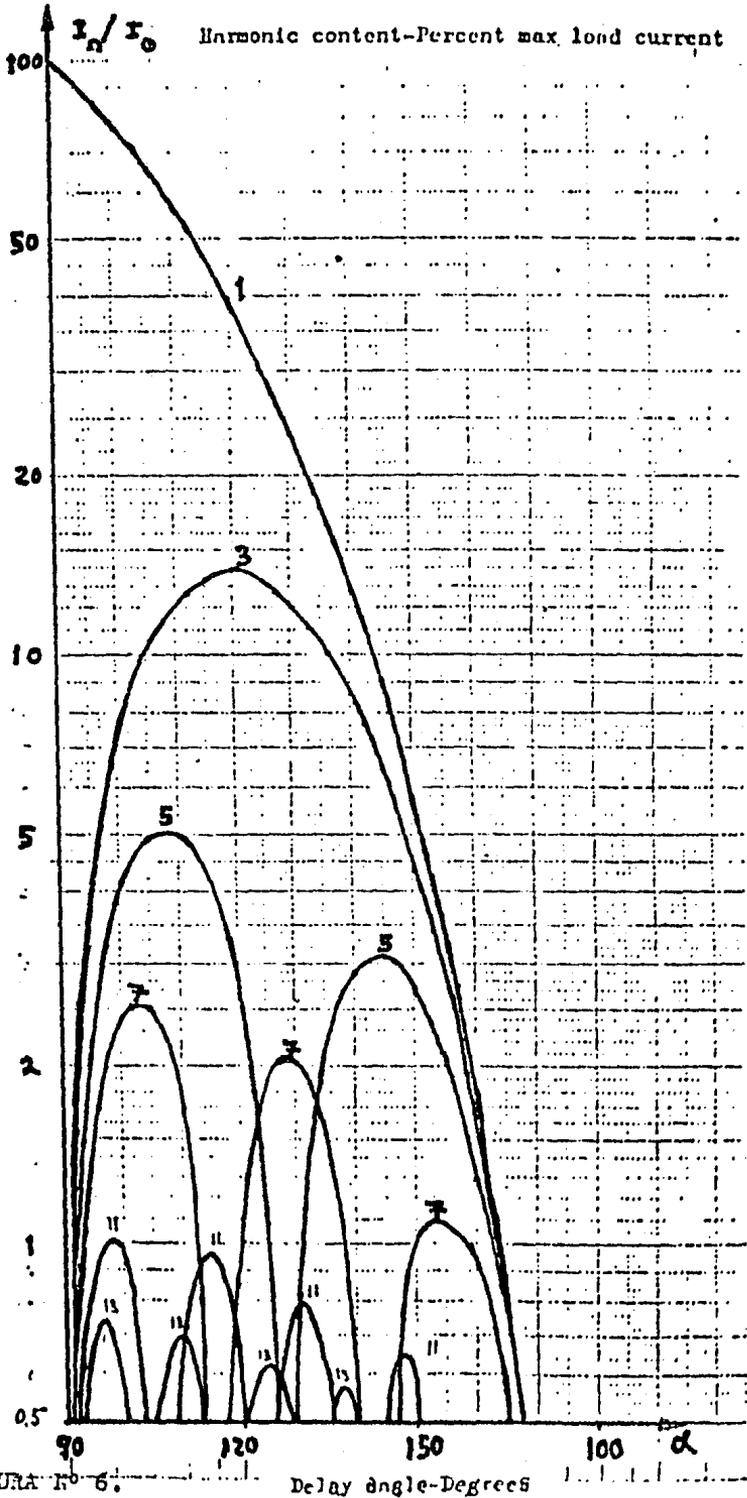


FIGURA No 6.

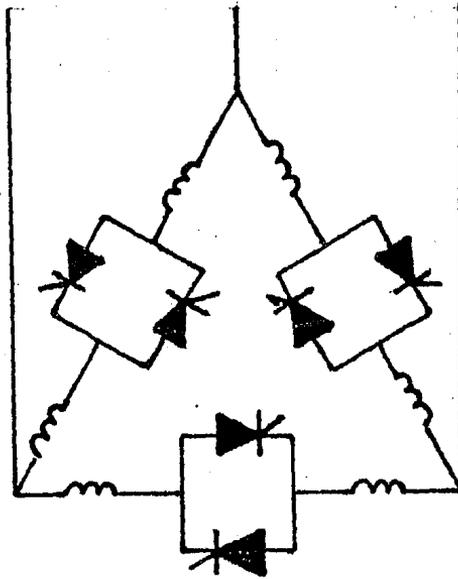
Delay angle-Degrees

Cuando son controladas simétricamente, la generación de armónicas en las tres fases será la misma . Todas las armónicas múltiplos de tres (3 , 9 , 15 , etc) , serán de secuencia cero , por lo que para la conexión de la figura 7a , solo circularán dentro de la conexión delta. Para la conexión de la figura 7b , las armónicas múltiplo de tres , circularán por las tres fases del TCR y por el neutro del secundario , pero en el primario solo circularán en la conexión delta y no escaparán hacia la línea . Por lo tanto , teóricamente no habrá generación de armónicas en un TCR controlado simétricamente.

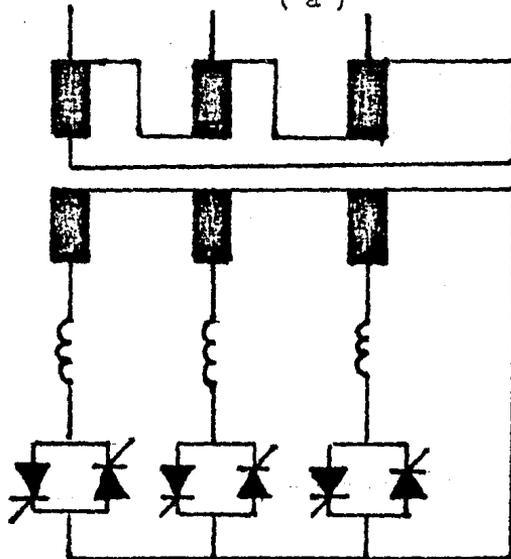
Sin embargo en la practica siempre existira ligero desbalanceo entre fases , lo que producirá una generación de armónicas , resultando pequeñas componentes de secuencia positiva y negativa , las cuales escaparán de la delta y se irán por la línea. Normalmente esto se considera únicamente para la tercera armónica , la cual es de magnitud mayor . Las siguientes , son causas que pueden producir generación de la tercera armónica.

- Voltajes de línea desbalanceados
- Diferencia de reactancia entre las tres fases
- Diferencia de angulo de control , entre las tres fa

ses.



(a)



(b)

FIGURA N.º 7.

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 dá 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 $dI_3/d\alpha = 0$.

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 circuitos de fase cerrada y 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 de línea. Por ejemplo, el máximo valor de la tercera armónica, en la corriente de línea se presentará si una de las fases es controlada con $\alpha = 120^\circ$ y otra con $\alpha = 90^\circ$. En este caso, la tercera armónica no circulará por la delta, sino que toda fluirá por la línea. Debe notarse sin embargo en este caso, que mientras la corriente máxima de la tercera armónica en la línea sea igual a la corriente máxima de la tercera armónica en una

fase del TCR, 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 del TCR. Esto significa que la componente de tercera armónica en la corriente de línea es: $13.8/\sqrt{3} = 30\%$ de la corriente a plena carga.

Una forma de reducir la generación de armónicas en grandes reactores controlados por tiristor (TCR) y con control trifásico simétrico, es haciendo la conocida conexión de 12 pulsos, cuyo diagrama esquemático se muestra en la figura 8.

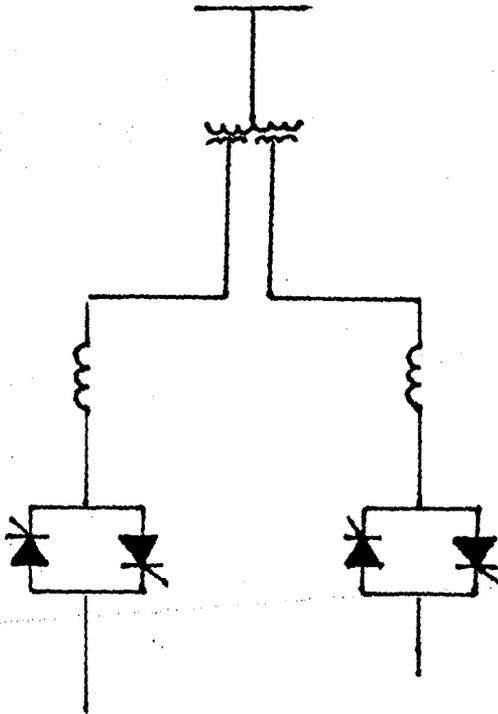


FIGURA N.º 8.

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

Por ejemplo, las contribuciones de la quinta y séptima armónica, generadas por cada TCR, 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 la treceava corriente armónica, generada por 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 TCR. Para las armónicas 17 y 19, el defasamiento entre las contribuciones de los dos TCR, 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 etc.

Ahora bien, para compensadores estáticos grandes, el reactor controlado por tiristor (TCR), puede dividirse en dos o más unidades iguales, considerando para esto las siguientes ---

técnicas:

- Control de doce pulsos
- Control de secuencia (reactor conmutado con tiristor/ reactor controlado por tiristor)

El beneficio del control de doce 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 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 armónicas, se reducirán al 50%

Ya se ha visto que los capacitores y reactores se pueden

combinar, formando un compensador estático. Las siguientes figuras (figura 9 a y b) muestran dos configuraciones posibles.

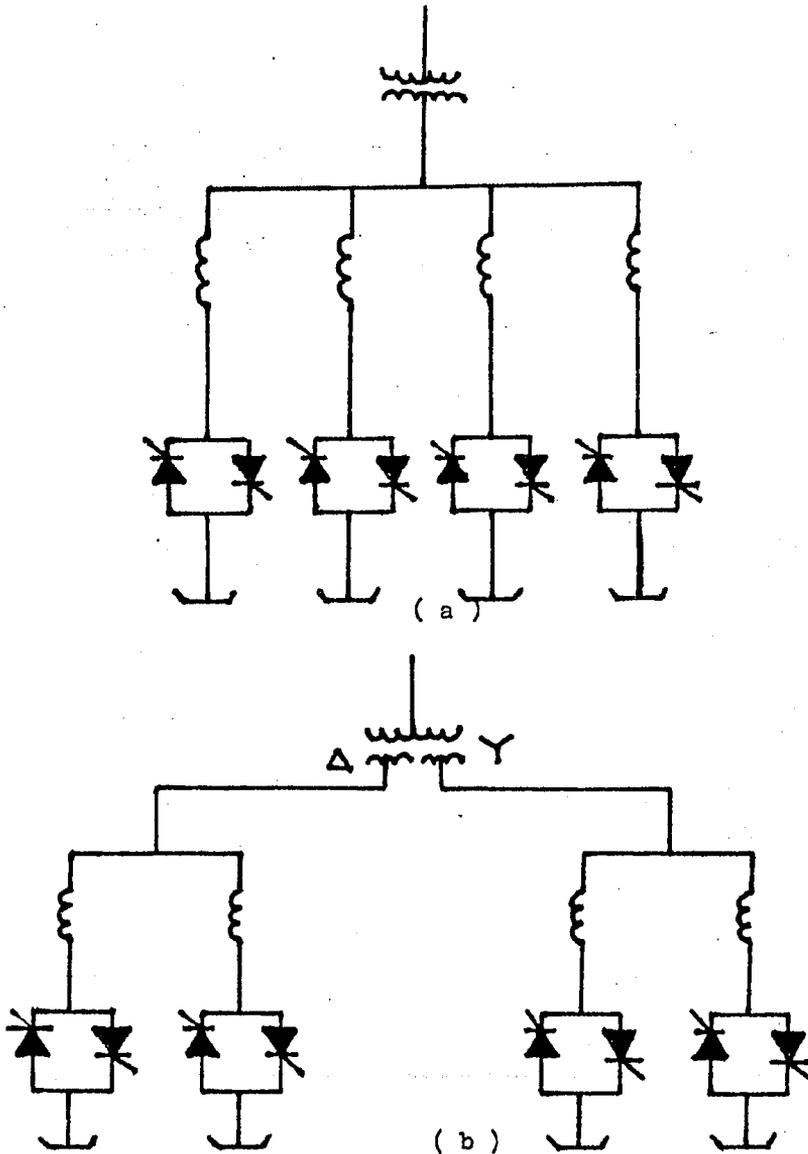


FIGURA N.º 9

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 Thyristor, estan desconectados, y el Compensador actúa--
como un reactor controlado por Thyristor ordinario. En la --
región adelantada, sin embargo uno o ambos capacitores con--
mutados por Thyristor, son conectados y tendrán influencia--
sobre el flujo de corrientes armónicas. Lo más importante es
eliminar el riesgo de que entre en resonancia los capacitores
y la inductancia del transformador debido a las armónicas
generadas por el reactor controlado por Thyristor. De otro--
modo, tal resonancia podría amplificar demasiado la corriente
armónica en cuestión, provocando la sobrecarga de los --
capacitores y aumentando la distorsión del voltaje en el --
bus primario.

La mejor forma de evitar la resonancia, es--
conectando reactores en serie, con los capacitores conmuta--
dos por Thyristor (TSC's), escogiendo los de tal forma que --
la frecuencia de sintonización, esté ligeramente abajo de --
la armónica más pequeña generada por el TCR. De esta forma,
ambos, el transformador y los TCR's, serán inductivos a --
las frecuencias armónicas peligrosas , y por lo tanto no --
existirá resonancia.

Debe hacerse notar que aún, en la configuración de 12 pulsos, Figurar N° 9b , la quinta y séptima armónica están presentes en el lado secundario, por lo que los TSC's deben estar sintonizados abajo de la quinta armónica.

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

Normalmente los TSC's, se sintonizan ligeramente abajo de la quinta armónica (4.5X frecuencia fundamental), lo que significa que el TSC, 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 TCR.

Un tipo de control frecuentemente ventajoso, es usar control de doce pulsos en la región retrasada, cuando el TSC está desconectado, y control secuencial en la región adelantada, usando el TSC en el mismo secundario donde está el TCR, como filtro para la quinta y séptima armónica. Es posible entonces, cuando la compensación adelantada es pequeña, contar con un solo TSC y un TCR, en =

vez de dos de cada uno como requiere verdaderamente la operación de doce pulsos. De esta forma, las pérdidas pueden reducirse considerablemente en esta región.

Además de las armónicas generadas por los compensadores estáticos, a base de TCR's, las fuentes más comunes generadoras de armónicas en una red son:

- Convertidores de corriente directa de alto voltaje, rectificadores para motores de DC y rectificadores para fundidoras de aluminio. Los cuales normalmente generan la quinta, séptima, onceava, treceava armónicas y cuya magnitud es igual a la componente fundamental dividida por el número correspondiente.
- Hornos de Arco, donde particularmente durante la fundición, la corriente es totalmenté distorsionada, la cual al analizarse, contiene un gran número de frecuencias armónicas y no-armónicas.
- Saturación de Transformadores, en donde las corrientes magnetizantes de un sistema de transformadores y reactores en paralelo contienen armónicas, especialmente en sistemas de alto voltaje, donde se trabajan arriba de

la curva de magnetización, cerca a la saturación: La más importantes son la tercera y la quinta armónica.

Ahora bien, 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 la figura 10:

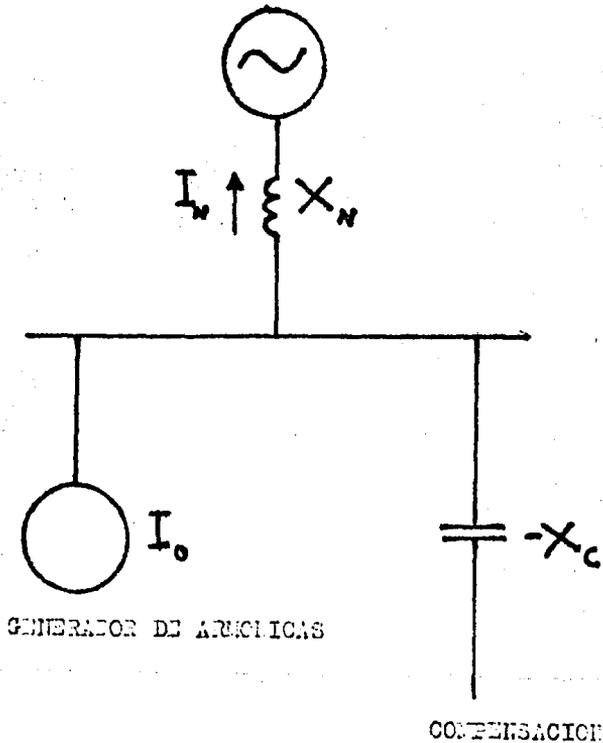


FIGURA 10.

El voltaje sin carga , es de 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 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 el grado al que está cargado.

En la figura 11 , se puede observar la amplificación de corriente a diferentes frecuencias para un sistema como el que se analizó anteriormente.

La forma más comun de eliminar el riesgo de entrar en resonancia, es instalar pequeños reactores en serie con los capacitores, lo que influenciará muy poco la generación de reactivos a la frecuencia fundamental. Sin embargo, a altas frecuencias X_r se incrementará y la impedancia del capacitor disminuirá hasta que en cierta frecuencia $X_r - X_c = 0$. A esta frecuencia se le llama frecuencia de sintonización y-

a frecuencias más altas, la impedancia total se hará positiva (inductiva). Escogiendo a f_t abajo de la armónica más pequeña, la impedancia de compensación así como la de la red serán inductivas y no se presentará resonancia.

Abajo de f_t , la impedancia de compensación es negativa de tal forma que se crea un punto de resonancia, pero que no se presentará, al no haber generación de esta frecuencia.

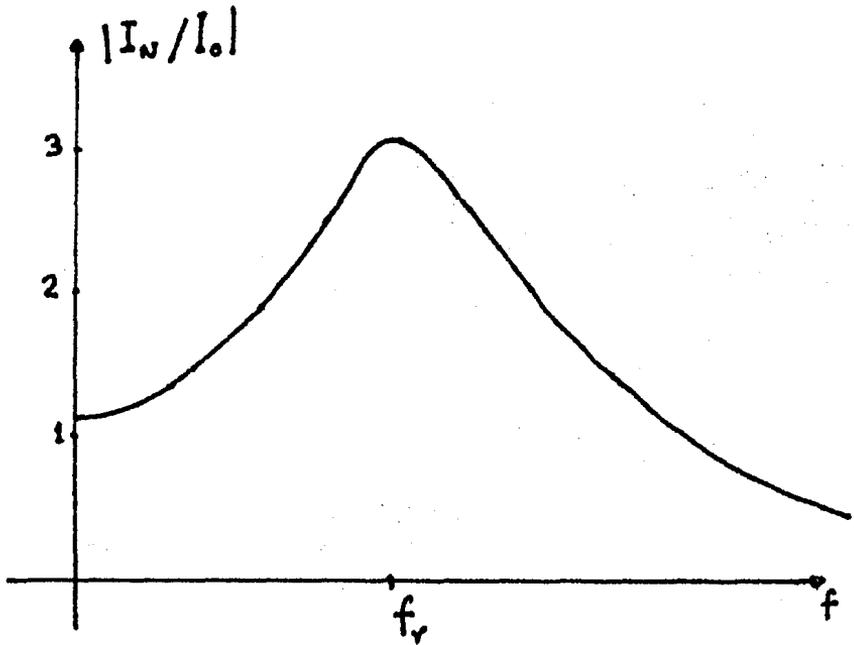


FIGURA N.º 11.

La figura 12 muestra el caso anterior .

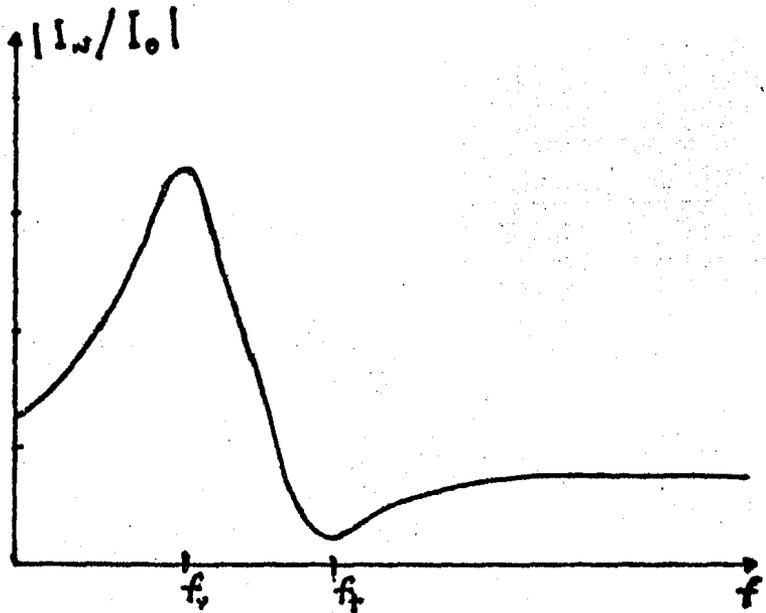


FIGURA Nº 12.

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

Como se puede observar en la figura 12 , la quinta armónica resultante en la corriente de línea I_n , será muy baja -

si f_4 se selecciona para la quinta armónica. En este caso el banco de capacitores se llamará filtro para la quinta armónica.

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 13 muestra un diagrama de amplificación de corriente con filtros para la quinta, séptima y onceava armónica.

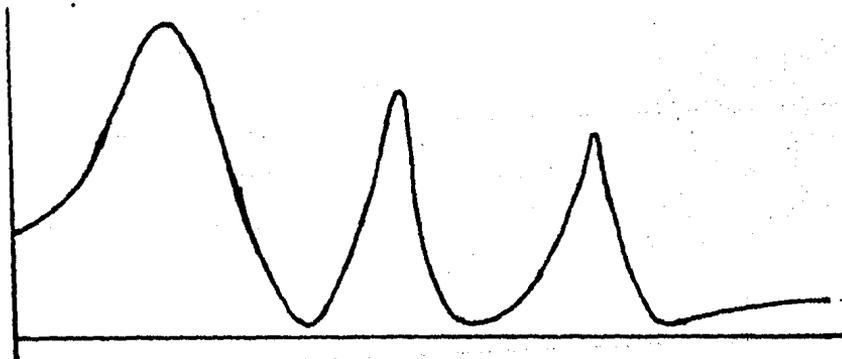


FIGURA N. 13.

C A P I T U L O V I

CONTROL DE COMPENSADORES ESTATICOS DE VARS

- 6.1 Principio de Operacion del CEV.
- 6.2 Control.
- 6.3 Representacion Matematica.

VI-. CONTROL DE COMPENSADORES ESTATICOS DE VARs'

El Compensador Estatico de Varás (CEV) , es un sistema integrado de componentes electricos estaticos (capacitores , reactores , transformadores e interruptores) combinados de tal manera que proporcionen una rapida y continua -- compensacion controlable de potencia reactiva de derivacion.

En la figura 1 se muestra un esquema simplificado de -- un CEV "tipico" cuya salida reactiva es variada por los interruptores del Tiristor en respuesta a una forma de regulador de voltaje de control de realimentacion. Bajo condicio-

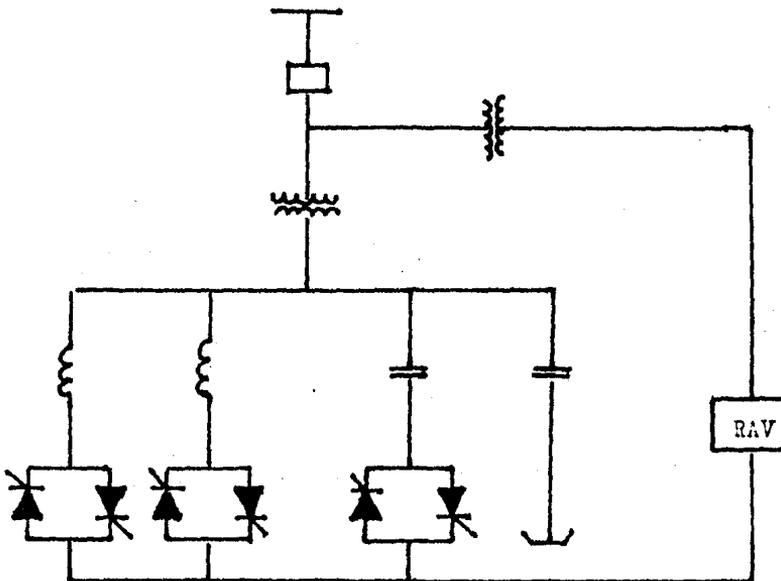


FIGURA N.º 1.

nes de regimen estable , la relacion entre la salida del CEV y el voltaje del "bus" de la estacion se conoce como la caracteristica de control de regimen estable del CEV. En la figura 2 se muestra una caracteristica de control tipica para un CEV del tipo que se presenta en la figura 1.

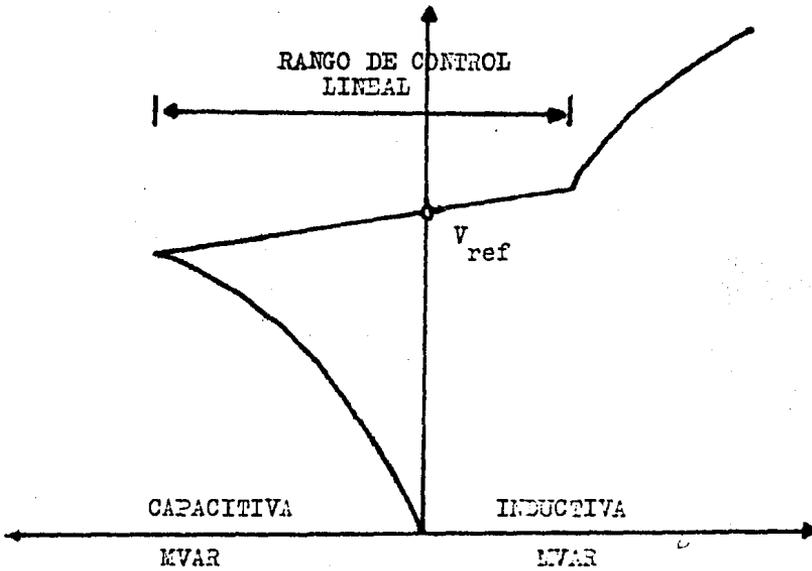


FIGURA N.º 2.

6.1 PRINCIPIO DE OPERACION DEL CEV

En la figura 3 se muestra la configuracion de un CEV tipo CST/RCT , como sabemos el tipo CST tiene un control escalonado de la potencia reactiva , mientras que el RCT el con-

trol es continuo (fino, al tenerse una combinación de estos tipos de CEVS se logra un control fino de la potencia reactiva tanto inductiva como capacitiva por medio del RCT . - Considerese arbitrariamente que cada una de las tres ramas - de la figura 3 , es de 50 Mvar y que el CEV esta operando como reactor (RCT) . Si por exigencias del sistema se requieren Mvar capacitivos , la corriente en el reactor empieza a disminuir por accion del control del intervalo de conduccion de los tiristores hasta llegar a cero , un instante despues se conecta una rama capacitiva a plena capacidad , entrando simultaneamente a plena conduccion el RCT (modo RST) de tal forma que los reactivos netos del sistema son cero. A medida que se requieran Mbars capacitivos. La corriente hasta llegar a cero se tiene 50 Mvar capacitivos inyectados al sistema , si aun por exigencias del sistema se requieran mas Mvar capacitivos , la rama del CST y el RCT entran a plena conduccion. Para inyectar mas potencia reactiva al sistema nuevamente en la rama del RCT la corriente se modula de tal forma que los Mbars netos capacitivos se vean incrementados. Cuando la corriente por el reactor llega a cero se tienen 100 -- Mvar capacitivos netos inyectados al sistema.

6.2 CONTROL

El Compensador Estático de Vars desde el punto de vista de control es un elemento pasivo cuya susceptancia se modifica de acuerdo al voltaje de la barra controlada.

El problema básico de control es regular el voltaje de la barra mediante la conversión de la señal de error de voltaje en una señal de cambio en el valor de susceptancia. La figura 4 representa en forma esquemática los elementos que integran el sistema de control del CEV.

Con respecto a la figura 4, el filtro acondiciona la señal de error de voltaje para evitar las variaciones de alta frecuencia en el sistema activen la lógica de control, la constante de tiempo del filtro determina el rango de frecuencias que se filtran.

En el amplificador integrador se realiza la conversión del error de 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 Vars al sistema de potencia.

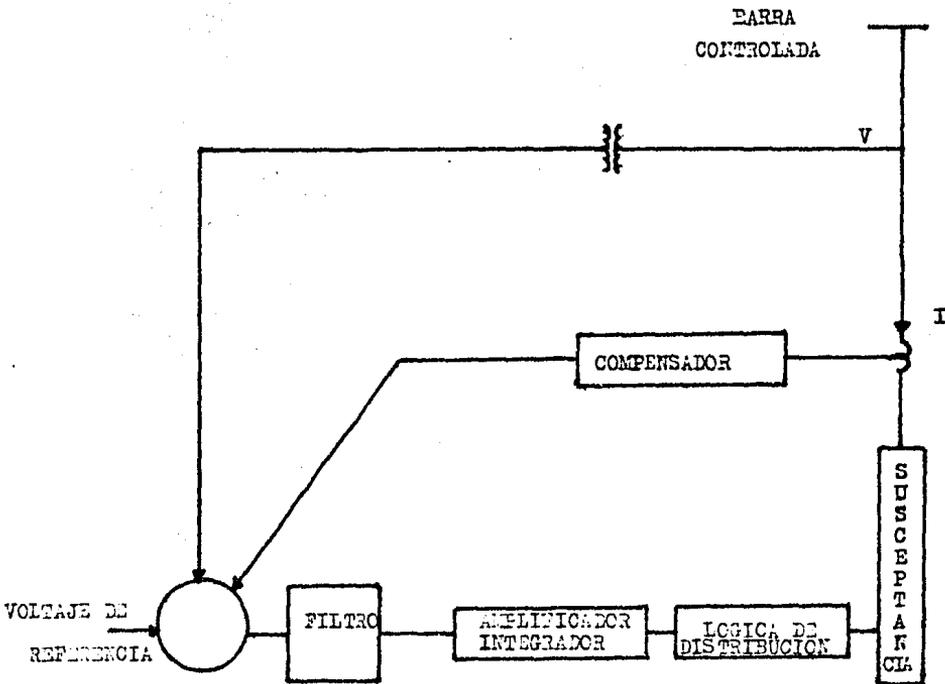


FIGURA N.º 4.

la logica de distribucion se encarga de realizar la asignacion de las susceptancias que se tendran en cada fase de las ramas capacitivas e inductivas , y el control de los angulos de disparo de los Tiristores , de acuerdo a la susceptancia de referencia que se obtiene del bloque Amplificador-Integrador.

En la aplicacion 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 . Es-

to se realiza con el bloque compensador mostrado en la figura 4 , cuyo efecto final es modificar el voltaje a controlar.

En la figura 5 se muestra un diagrama detallado del control estatico de Var \acute{s} . El voltaje $V_{\text{respuesta}}$ es la entrada principal al regulador automatico de voltaje (RAV) esta señal se obtiene de la siguiente manera;

Se toma la señal de una fase del bus a traves de los transformadores de potencial T.P y es llevada a una unidad de medicion (MD) donde los voltajes son convertidos a un voltaje bajo , de voltaje de DC (señal V) . El dispositivo de medicion , contiene basicamente un rectificador de señales , obteniendose de esta manera la señal $V_{\text{respuesta}}$ en una fase , esto se realiza en las tres fases, obteniendose de esta manera el $V_{\text{respuesta}}$ para cada una de las tres fases.

El CEV tiene la ventaja de que se puede controlar cada una de las fases, es decir se puede tener un CEV para cada fase , independiente uno del otro. Tomando en consideracion que en los sistemas electricos de potencia , los voltajes en las tres fases , en condiciones normales son balanceados , se puede obtener un control simultaneo de las tres fases , con lo que el costo del CEV disminuiria , esto se realiza --

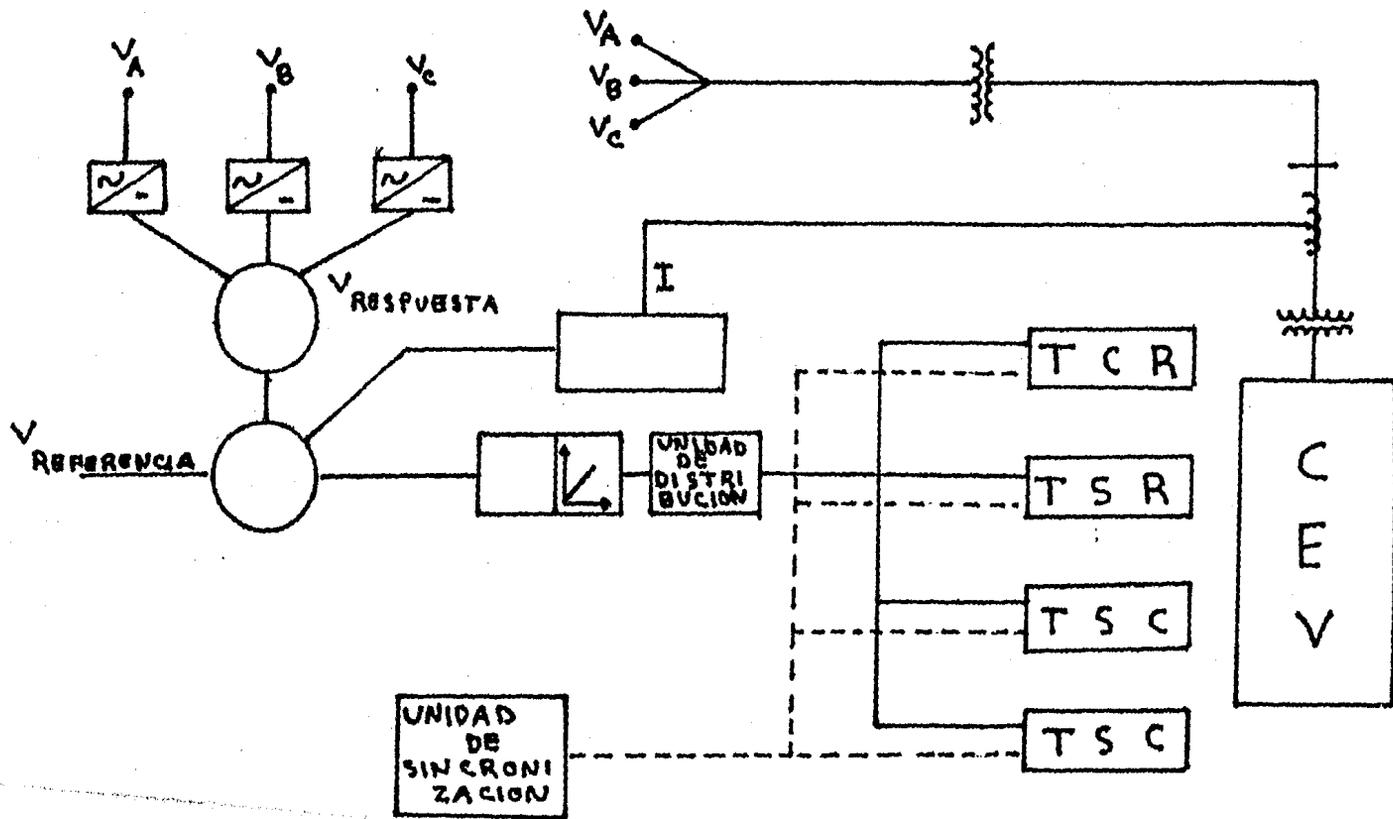


FIGURA N. 5.

de la siguiente manera: Se toman las señales de voltaje del-bus de las tres fases V_a , V_b , V_c con ayuda de los TP , las señales son llevadas a unos rectificadores donde son conver-tidos las señales a un voltaje de DC , las señales rectifica-das son llevadas a un sumador cuya suma es el $V_{respuesta}$.

Los siguientes pasos son los mismos tanto para un con--trol simultaneo de las tres fase , como para el control de - una sola fase.

La señal $V_{respuesta}$ junto con la señal $V_{referencia}$ son llevadas a un detector de error , la salida del detector de-errore sera la diferencia entre las dos señales (señal de --errore) , la señal de error solo sera cero , cuando ambas se-ñales sean iguales , la señal de error es llevada al amplifi-cador , el amplificador efectua la amplificacion de la poten-cia de la señal de error actuante (frecuentemente se usa un amplificador juntamente con algun circuito de realimentacion adecuado , para modificar la señal de error actuante amplifi-candola y a la vez integrandola para lograr una señal de con-trol mejor) , la salida del Amplificador-Integrador es una-susceptancia de referencia E_{ref} , para el Compensador Estati-co de Vars .

En algunas aplicaciones es deseable tener una cierta inclinación en las características de $V-I$, esta 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 es llevada a una unidad de medición donde la señal de corriente es convertida a un voltaje proporcional a la señal de entrada, esta señal es llevada al detector de error junto con las señales $V_{\text{respuesta}}$, y $V_{\text{referencia}}$.

La Unidad de Distribución tiene como entrada E_{ref} (susceptancia de referencia) y como salida las órdenes de apagado o encendido del CST y RST, además de la señal de control de los TCR, que en total nos dan $E_{\text{respuesta}}$ (susceptancia de respuesta).

La Susceptancia total de los CST, RST y RCT se puede controlar, desde una susceptancia atrasada, hasta una susceptancia adelantada, dependiendo de el valor de la susceptancia de referencia $E_{\text{referencia}}$, de la siguiente manera.

La señal $E_{\text{referencia}}$ es comparada con la señal E_{res} la cual es proporcional a la susceptancia de los CST y RST dependiendo si están encendidos o apagados. Si $E_{\text{respuesta}}$ es menor que $E_{\text{referencia}}$, se da una orden de incremento.

a la logica del selector de pasos , si $B_{\text{respuesta}}$ es mucho mayor que $B_{\text{referencia}}$ se da una orden de decremento a la logica del selector de pasos.

La diferencia entre $B_{\text{respuesta}}$ y $B_{\text{referencia}}$ despues - que se ha incrementado y decrementado queda fuera de la logica del selector de pasos y es proporcionada por el RCT, - dependiendo del signo de la diferencia entre $B_{\text{respuesta}}$ y $B_{\text{referencia}}$ es el signo de el control del RCT.

El incremento o decremento de la orden es transmitida a la logica del selector de pasos , justamente despues del tiempo correspondiente al valor pico del voltaje de la onda senoidal , lo cual es posible en el instante de suicheo de los CST y RST . la exacta regulacion es asegurada por la -- unidad de sincronizacion. $B_{\text{referencia}}$ es observada por un -- circuito de muestreo , el angulo de control del RCT es muestreado en el otro medio ciclo , en otro circuito de muestreo. Para el muestreo del angulo de control se realiza una vez cada medio ciclo , debera hacerse para las tres fases , un -- total de seis muestreos por cada ciclo , lo cual elimina -- la influencia de la sexta armónica en $B_{\text{referencia}}$, la cual se origina en la rectificaci3n del voltaje de respuesta.

La unidad de Distribucion se muestra en forma esquematizada en la figura 6.

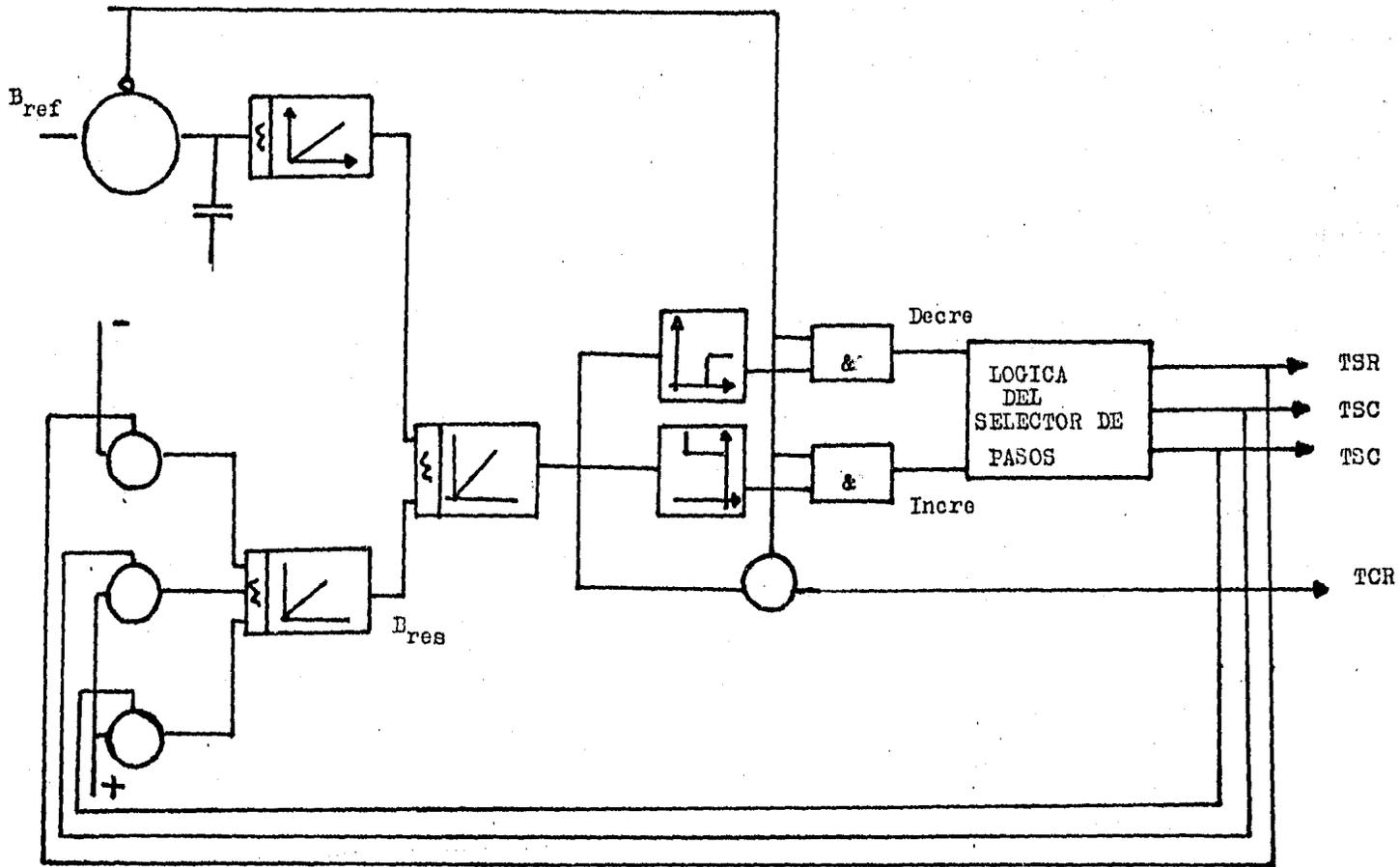


FIGURA N.º 6.

6.3 REPRESENTACION MATEMATICA

Al CEV (Compensador Estatico de Vars) se le puede representar por medio de funciones matematicas , es decir a los bloques del diagrama del CEV se les puede representar o sustituir por funciones matematicas , con el objeto de estudiar mejor su comportamiento desde el punto de vista de control.

Las Unidades de Medicion se pueden reemplazar por sus funciones matematicas equivalentes K_V , K_I , al filtro paso - bajas se le puede representar por la funcion de transferencia $\frac{1}{1 + ST_1}$, de igual forma al amplificador de Integracion se le sustituye por la representacion matematica $\frac{1}{ST_1}$. A la Unidad de Distribucion se le puede representar por la funcion de transferencia

Para una amplificacion moderada en el Amplificador de Integracion (el cual da un tiempo de respuesta moderado) -- la relacion entre $P_{\text{referencia}}$ y $B_{\text{respuesta}}$, puede considerarse como lineal y $G(S)$ puede reemplazarse por una constante- K_B , si la amplificacion es alta el tiempo de retraso involucra mas complicaciones y $G(S)$ no puede sustituirse por una constante.

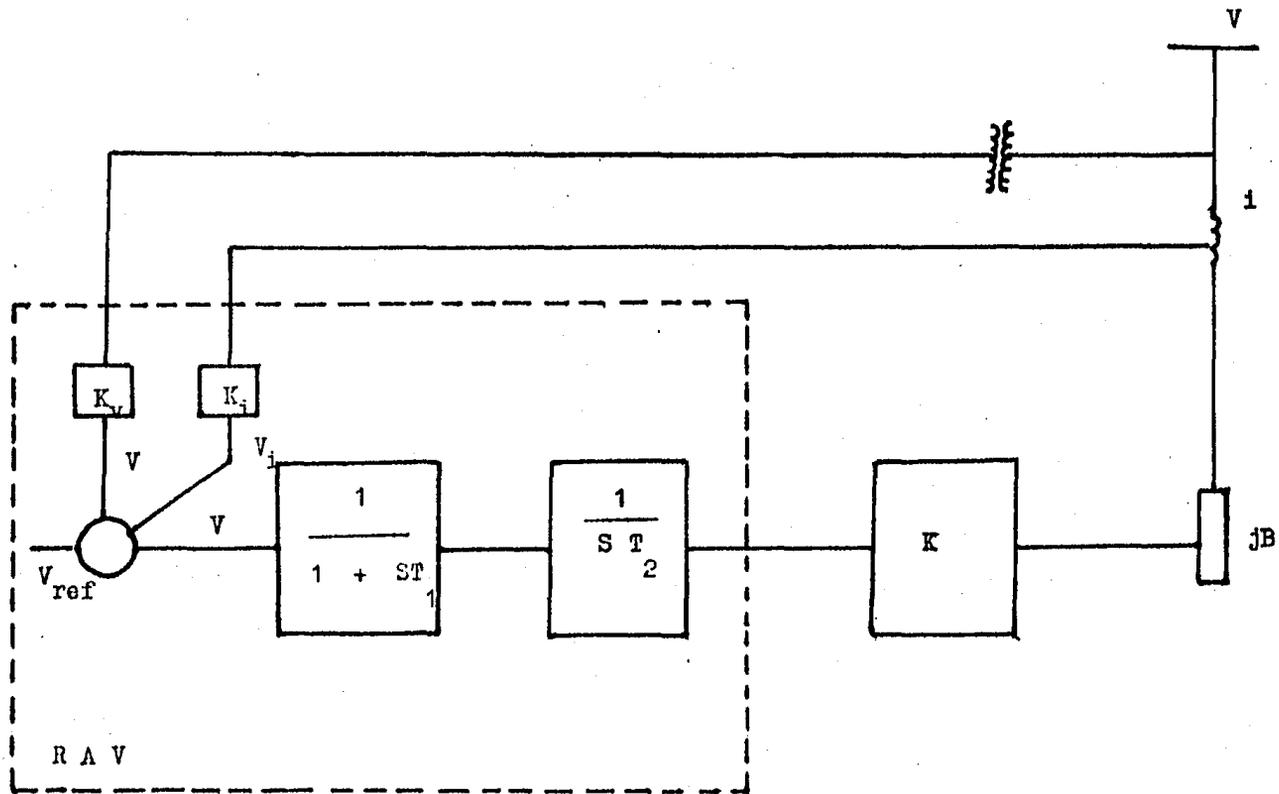


FIGURA N.º7.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

VII.- CONCLUSIONES

Una vez analizadas las ventajas que ofrecen los CEV'S tanto en el renglon tecnico 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 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 Electrico Nacional (SEN) se tienen en operación los siguientes tipos:

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

En la Subestacion de Puebla se tiene un CEV del tipo - CST , esta constituido por 4 ramas shunt capacitivas de 50 Mvar c/u , para una capacidad de 200 MVAR , que aplicado a la red de 230 KV , soporta el voltaje y controla los reactivos del area , en la figura N_o 1 se muestra el diagrama unifilar de este CEV.

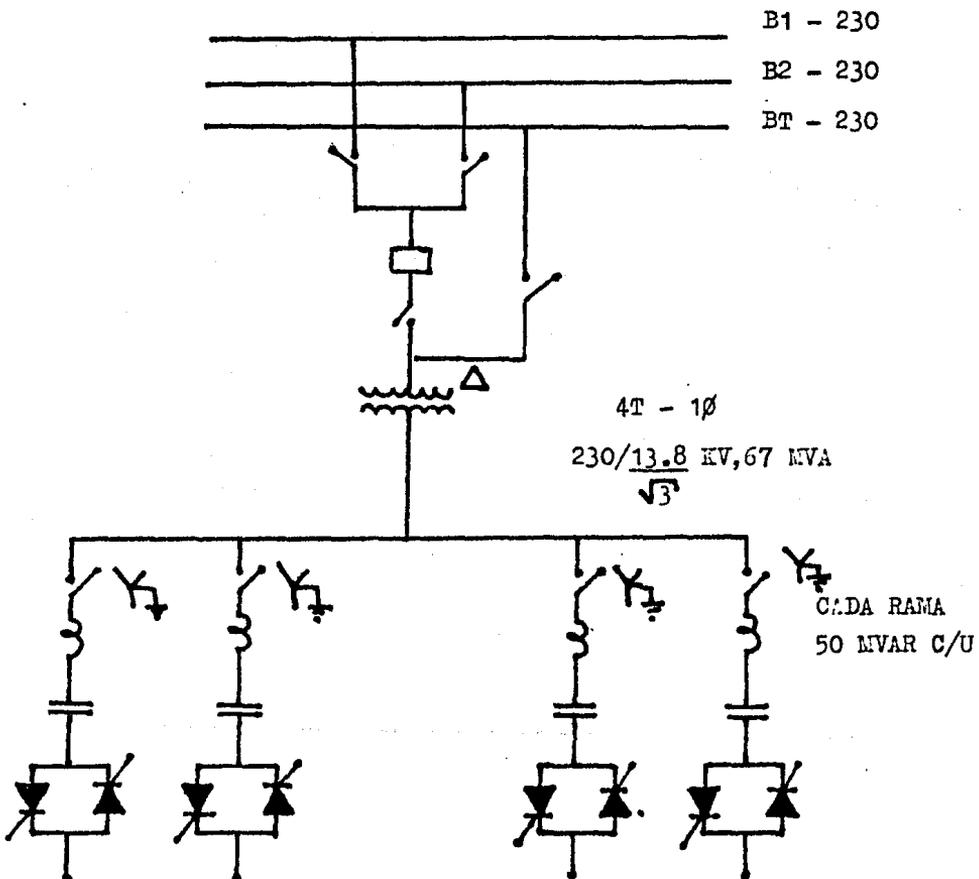


FIGURA N_o 1.

En Cananea se tiene un CEV del tipo CST, comprende - 4 ramas shunt capacitivas de 20 MVAR c/u , para un rango - de 0 a 80 MVAR capacitivos c/u , en la figura 2 se muestra el diagrama unifilar.

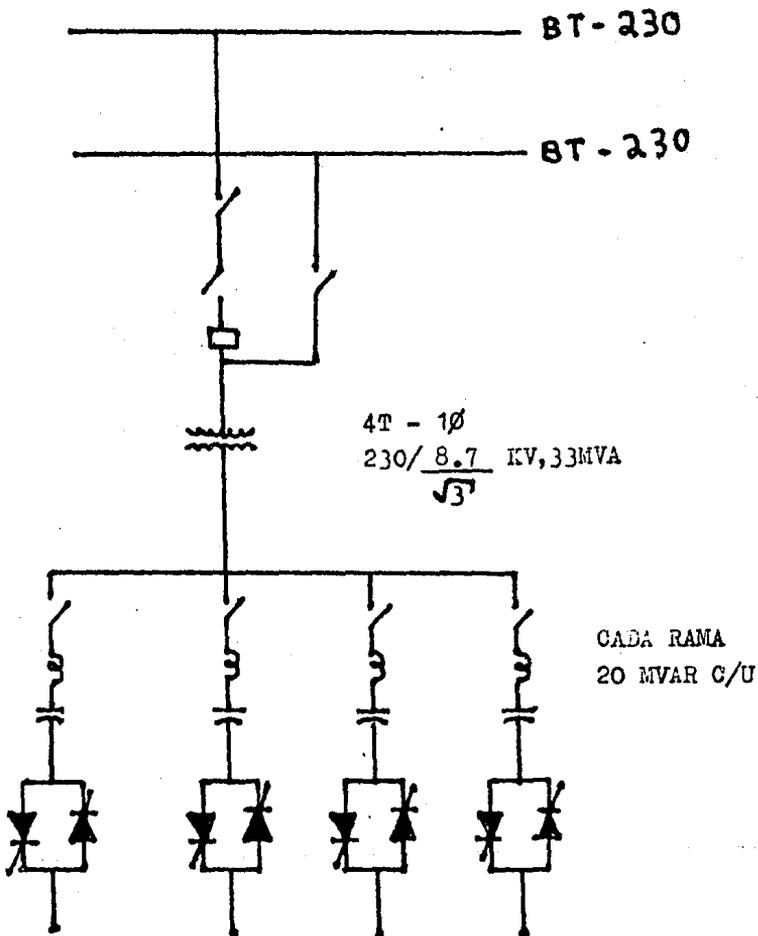


FIGURA N.º 2.

En Acatlan se tiene un CEV de 200 MVAR inductivos que con su actuacion permite la transferencia de potencia desde Manzanillo hasta la Ciudad de Guadalajara , conservando la estabilidad del sistema en caso de disturbio y -- permitiendo el control de potencia reactiva en el area -- occidental del sistema , e. la figura N. 3 se muestra el diagrama unifilar.

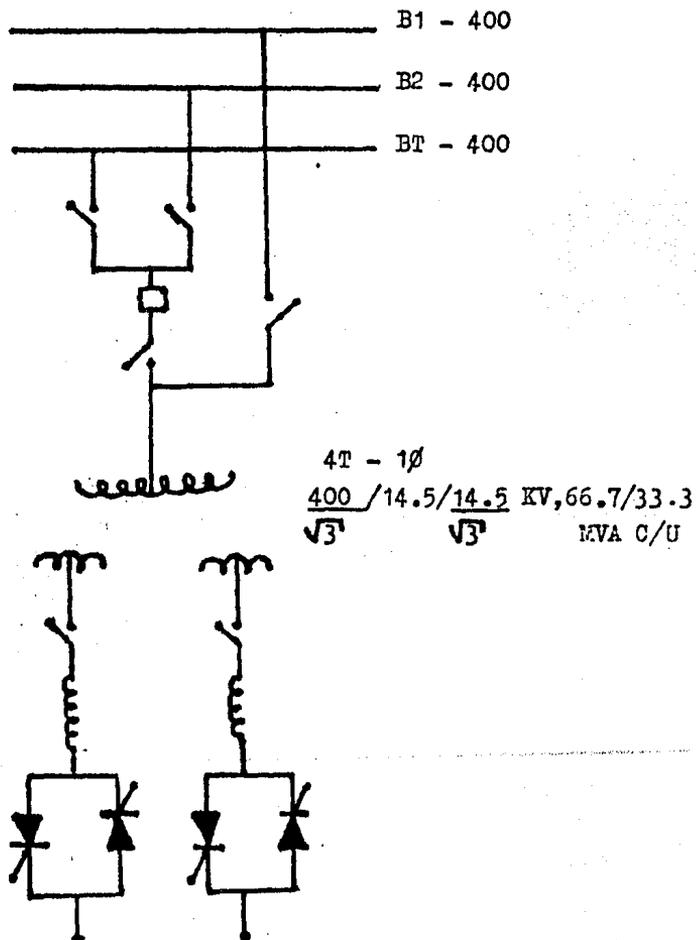


FIGURA No 3.

En temascal, actualmente la Subestacion más importante del SEN , se puso en servicio el CEV mas grande del mundo- que en 4 pasos de 75 MVAR capacitivos y 4 pasos de 75 MVAR inductivos , y con control sobre 9 reactores Suitcheables- a las lineas de 400 KV , define un rango desde 300 MVAR ca pacitivos 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 acep- table , este equipo esta en operación desde 1981 , en la - figura N. 4 se muestra el diagrama unifilar del CEV.

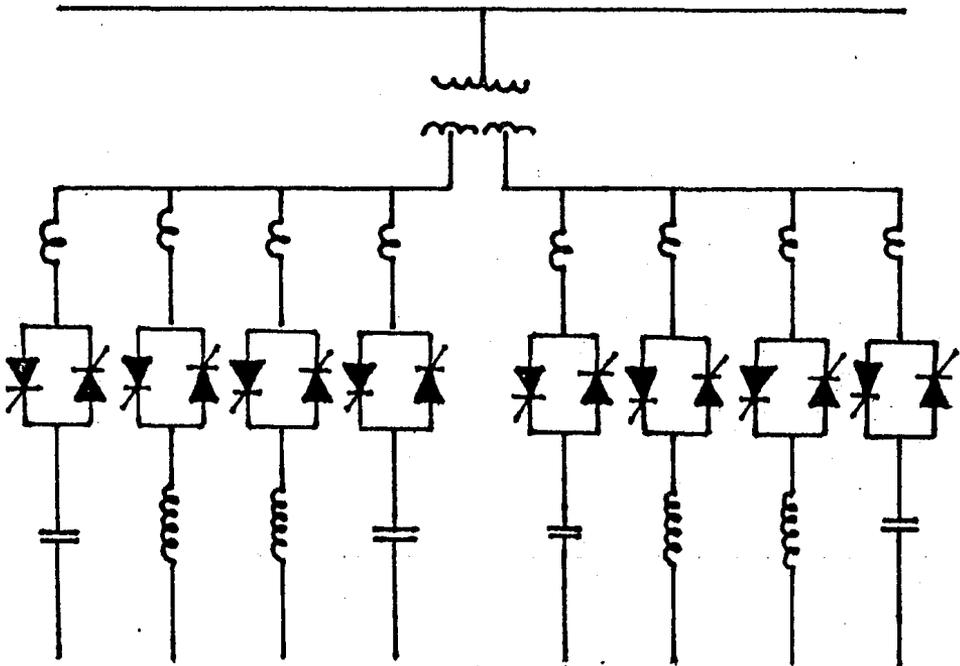


FIGURA No 4.

El CEV de Santa Ana es del tipo TCT , comprende un transformador especial con 3 devanados en conexion // , de un rango de 0 a 50 MVAR inductivos.

Siendo Santa Ana una Subestacion situada en un nodo - tal que soporta una demanda variable muy acentuada , se estudio y se decidio ampliar el rango del Compensador y se instalaron 4 ramas de 20 MVAR capacitivos.

En Ciudad Juarez se tiene un Reactor Saturable , que aplicado a la red de 69 KV esta resolviendo en forma muy -- satisfactoria los requerimientos de la red para el control de reactivos .

El Sistema Cutzamala cuenta con plantas de bombeo - de agua , con motores de hasta 20,000 HP aproximadamente , - por tal motivo requirio que en la Subestacion mas importante , se instalara un CEV para soportar permanentemente el - arranque de estos motores que provocan serias alteraciones al voltaje . Este CEV se forma de una parte conmutable con Thyristor y otra conmutable con Interruptor , la primera resuelve los requerimientos instantaneos de reactivos , durante el arranque y la otra el control de voltaje y reactivos - a la red de 115 KV .

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 Sincrono y -- las Truchas en Michoacan tiene en una planta instalado un-CEV , que compensan los transitorios provocados al sistema eléctrico para la operacion de los Hornos Eléctricos. .

En el mundo la aplicacion de estos CEV'S se ha hecho en forma creciente y si temporalmente se ha detenido , es por razones estrictamente económicas , caso similar ha sucedido en México donde existen proyectos pendientes de - aplicacion , obedeciendo esto a razones económicas.

La futura aplicacion de estos dispositivos y el-- inmenso campo de utilización del Thyristor en el area de-- los Sistemas Electricos de Potencia , esta requiriendo de-- un desarrollo mas fino , de una utilización mas formal , - para que esta tecnologia del mundo electronico que esta -- inrumpiendo en el sector del control de potencia eléctri- ca , se llegue a dominar e inclusive para que permita que- el industrial nacional pueda competir en el futuro en los- proyectos internos o inclusive en el exterior , si bien la fabricacion de Thyristores se ve poco justificable , la -

fabricacion de un CEV con sus controles , su sistema de enfriamiento , el equipo de capacitores y reactores se- ve con mayor probabilidad de fabricacion nacional.

B I B L I O G R A F I A

Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, Transmission and Distribution, Reference Book.

Cigre Working Group, Modeling of Static Shunt Var Systems for System Analysis, Electra N. 51, 1977.

Cigre Working Group, Static Shunt Devices for Reactive Power Control, Cigre Paper N. 31-08, 1974.

Departamento de Operacion y Despacho, Seminario Sobre Compensadores Estaticos de Vars (CEV'S).

G. Segui, Electronica de Potencia, Barcelona, Edit Gustavo Gili, 1979.

H. Frank, Landstrom, Power Factor Correction With Thyristor Controlled Capacitor, ASEA Journal, 1976.

K. Reichert, Controllable Reactor Compensator For More Extensive Utilization of High Voltage Transmission Systems, Cigre Paper 31-04, 1974

Mundo Electronico, Electronica y Automatica Industriales I, Edit Marcombo, 1980.

R Beauvillain, J. Laty, Electronica 2, Mexico, Edit Trillas --
1980.

RT Byerk, D.t Poznaniak, E.R Taylor, Compensacion Reactiva Es-
tatica Para Sistemas de Transmision de Potencia.

R.L. Hauth, R.J Moran, Basics of Applying Static Var Systems -
on HVAC Power Networks.

R.L Hauth, R.J Moran, Introduction to Static Var Systems For -
Voltage on Var Control

Stevenson, William D, Analisis de Sistemas Electricos de Poten-
cia, Edit McGraw-Hill.

T. Petersson, Simulation Models of Thyristor Switched Capaci--
tors in Transmission Applications, ASEA, 1975