

Introducción al

$\cos \phi$

Control de *Q-V*

*Potencia Reactiva
Voltaje*

*Francisco M. Gonzalez-Longatt
Enero 2004*

Control de Voltaje y Potencia Reactiva

Para una operación eficiente y confiable de los sistemas de potencia, el control del voltaje y la potencia reactiva debe satisfacer los siguientes objetivos:

- (a) Los voltajes en los terminales de todos los equipos en el sistema están dentro de límites aceptables. Tanto los equipos de la empresa eléctrica como del consumidos son diseñados para operar a un cierto voltaje nominal. La operación prolongada de los equipos a voltajes fuera de rango pueden causar efectos adversos en su desempeño y posiblemente causar daño.
- (b) La estabilidad del sistema es aumentada para maximizar la utilización del sistema de transmisión. Como se verá mas adelante, el control de la potencia reactiva y el voltaje tienen un impacto significativo en la estabilidad del sistema
- (c) El flujo de potencia reactiva es minimizado para reducir las perdidas I^2R y XI^2 a un mínimo practico. Esto asegura que el sistema de transmisión opera eficientemente, principalmente para la transferencia de potencia reactiva.

El problema de mantener los voltajes dentro de los límites requeridos es complicado por el hecho de que el sistema de potencia supe potencia a un vasto número de cargas y son alimentadas desde varias unidades de generación. Como las cargas varían, los requerimientos de potencia reactiva varían también. Debido a que la potencia reactiva no puede ser transmitida por grandes distancias, el control de voltaje ha de ser efectuado por el uso de dispositivos especiales dispersos a través del sistema. Este en contraste el control de la frecuencia el cual depende del balance completo de la potencia activa en el sistema. La selección y coordinación apropiada de equipos para control de potencia reactiva y voltaje son los mayores retos de ingeniería en los sistemas de potencia.

Producción y Absorción de Potencia Reactiva

Los *generadores sincrónicos* pueden generar o absorber potencia reactiva dependiendo de la excitación. Cuando son sobre excitados ellos supe potencia reactiva, y cuando son subexcitados ellos absorben potencia reactiva. La capacidad de continuamente suplir o absorber potencia reactiva es, sin embargo, limitado por la corriente de campo, la corriente de armadura, y la región de terminal de recalentamiento. Los generadores sincrónicos son normalmente equipados con un equipo con reguladores automáticos de voltaje los cuales continuamente ajustan la excitación así como el control de voltaje de armadura.

Las líneas de transmisión aéreas, dependiendo de la corriente de carga, ellas pueden absorber o entregar potencia reactiva. A cargas por debajo de la carga natural (impedancia surge), las líneas producen una potencia reactiva neta; a cargas por encima de la carga natural, las líneas absorben potencia reactiva.

Los cables subterráneos, debido a su alta capacitancia, poseen una alta carga natural. Ellos son siempre cargados por debajo de su carga natural, y entonces generan potencia reactiva bajo todas las condiciones de operación.

Los transformadores, siempre absorben potencia reactiva independientemente de su carga, sin carga, la reactancia magnetizante afecta predominantemente, y a plena carga la inductancia de acoplamiento serie afecta plenamente predominantemente.

Las cargas, normalmente absorben potencia reactiva. Una barra típica para un sistema de potencia esta compuesta de una gran numero de dispositivos. La composición cambia dependiendo del día, la estación, y las condiciones climáticas. Las características compuesta son normalmente tales que una barra de carga absorbe potencia reactiva. Tanto la potencia activa como la potencia reactiva de una carga compuesta varían como una función de la magnitud del voltaje. Cargas con factor de potencia bajo atrasado causa una excesiva caída de tensión en la red de transmisión y son ineconómicas de suplir. Los consumidores industriales son normalmente cargados de reactivos tanto como potencia activa, esto dado que ellos incentivan la mejora del factor de potencia con el uso de capacitares shunt.

Dispositivos de compensación son usualmente agregados para suplir o absorber potencia reactiva y de este modo controlar el balance de potencia reactiva en una manera deseada.

Métodos de Control de Voltaje

El control de los niveles de voltaje esta acompañado del control de la producción y absorción y flujo de potencia reactiva a todos los niveles en el sistema. La unidades de generación proveen los medios básicos de control de voltaje, los reguladores automáticos de voltaje controlan la excitación de campo para mantener el nivel de voltaje programado en los terminales del generador. Medios adicionales son usualmente requeridos para controlar el voltaje a través del sistema. Los dispositivos empleados para este propósito pueden ser clasificados en los siguientes:

- (a) Fuentes o sumideros de potencia reactiva, tales como capacitares shunt, reactores shunt, condensadores sincrónicos y compensadores estáticos de VAR (SVC).
- (b) Compensadores de reactancia de línea, tales como capacitares series.
- (c) Transformadores reguladores, tales como transformadores con cambiadores de tomas y *boosters*.

Los capacitares shunt y reactores, y los capacitares series proveen una compensación *pasiva*. Ellos pueden ser tanto permanentemente conectados al sistema de transmisión y distribución o suichados. Ellos contribuyen al control de voltaje por la modificación de las características de la red.

Los condensadores sincrónicos y los SVC proveen una compensación *activa*, la potencia activa absorbida/producida es entonces automáticamente ajustada para de este modo mantener el voltaje en las barras donde ellos son conectados. Todos juntos con las unidades de generación, establecen los voltajes en puntos específicos del sistema. Los voltajes en oras ubicaciones en el sistema son determinados por los flujos de potencia activa y reactiva a través de varios elementos del circuito, incluyendo los dispositivos de compensación pasiva.

Reactores Shunt

Los reactores shunt son usados para compensar los efectos de la capacitancia de la línea, particularmente para limitar el aumento de voltaje en circuito abierto o altas cargas.

Ellos son usualmente requeridos en líneas de transmisión de EHV de longitudes mayores a 200 Km. Una línea de transmisión aérea mas corta puede también requerir reactores shunt es la línea es alimentada desde una sistema débil (baja capacidad de cortocircuito) como se muestra en la Figura 1. Cuando la carga en el terminal mas lejano de la línea es abierta, la corriente capacitiva circulante por la línea viaja a través de una reactancia inductiva (X_S) causara un aumento en el voltaje Es en el terminal de envío de la línea. El efecto Ferranti causara un aumento mayor en el extremo de recepción.

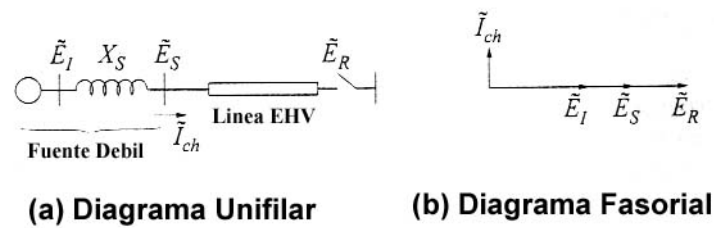
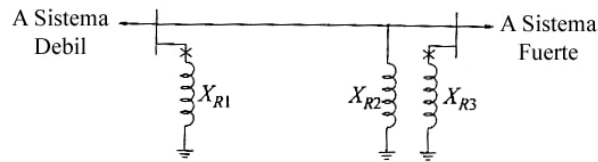


Figura 1. Línea EHV conectada a un sistema débil

Un reactor shunt de suficiente tamaño deberá estar permanentemente conectado a la línea para limitar las sobrevoltajes temporales de frecuencia fundamental a alrededor de 1.5 p.u para una duración de menos de un segundo. Tales reactores conectados a línea también sirven para limitar los sobrevoltajes de energización (transitorios de suicheo). Adicionales reactores shunt requeridos para mantener el voltaje normal bajo condiciones de carga ligeras pudiendo ser conectado a la barra EHV como se muestra en la Figura 2, o por el devanado terciario de transformadores adyacentes como se muestra en la Figura 3. Durante condiciones de cargas pesadas algunos de los reactores pueden tener que ser desconectados. Esto es logrado por el suicheo de los reactores usando interruptores.



X_{R2} : Reactor permanentemente conectado a la línea
 X_{R3}, X_{R1} : Reactores suichables conectados a la barra

Figura 2. Reactores de línea y barra EHV

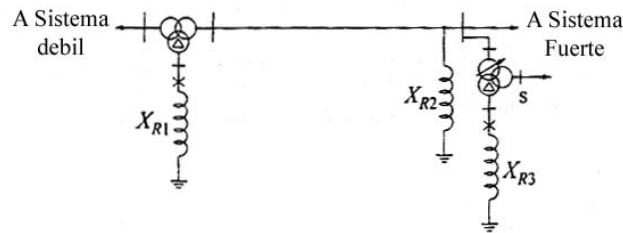


Figura 3. Reactores conectados por medio de Línea y transformador

Para mas constas líneas alimentadas por un sistema robusto, ellos pueden no necesitar reactores conectados a la línea permanentemente. En tales casos, todos los reactores usados pueden ser suichables, conectandos o por el terciario de transformadores o a la barra de EHV. En algunas aplicaciones, reactores con tomas con un sistema de control de voltaje de cambiador de toma bajo carga ha sido usado, como se muestra en la Figura 4, para permitir la variación del valor de la reactancia. Los reactores shunt son similares en construcción a un transformador, pero poseen un solo devanado (por fase) en un núcleo de hierro con entre hierro, e inmerso en aceite.

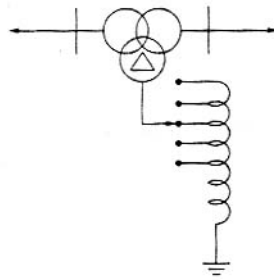


Figura 4. Reactor Shunt con derivaciones

Ellos pueden ser de construcción monofásicos o trifásico.

Capacitores Shunt

Los capacitares shunt suplen potencia reactiva y aumenta el voltaje local. Ellos son usados a través del sistema y son aplicados en un variado rango de tamaños.

Los primeros capacitares shunt fueron primero usados en mediados de la década de 1910 para la corrección del factor de potencia. Los primeros capacitares emplearon aceite como dieléctrico. Debido a que su tamaño, y su peso, y alto costo, su uso en ese tiempo fue limitado. En la década de 1930 la introducción de los materiales dieléctricos y otras mejoras en la construcción de capacitares permitió una considerable reducción en el peso y tamaño. El uso de capacitares shunt se ha incrementado fenomenalmente desde 1930. Hoy en día, estos son un medio muy económico de suplir potencia reactiva. La principal ventaja de los capacitares shunt son su bajo costo y su flexibilidad de instalación y

operación. Ellos son fácilmente aplicables en varios puntos en el sistema, así contribuye con la eficiencia de la transmisión y distribución de potencia. La principal desventaja de los capacitores shunt es que su valor de potencia es proporcional al cuadrado del voltaje. Consecuentemente, la potencia reactiva de salida es reducida a voltajes bajos cuando es deseable que se entreguen más.

Aplicación a Sistemas de Distribución

Los capacitores shunt son usados extensivamente en sistemas de distribución para la corrección del factor de potencia y control de voltaje de alimentadores. Los capacitores de distribución son usualmente suichados por medios automáticos respondiendo a un simple reloj, o a un relé que sensa voltaje o corriente.

El objetivo de *la corrección del factor de potencia* es proveer la potencia reactiva cerca del punto donde este va a ser consumido, mas que en los puntos de suministros lejanos. La mayoría de las cargas absorben potencia reactiva, que es, que poseen un factor de potencia en atraso. La tabla 1 muestra los factores de potencia típicos y las características de voltaje dependiente de algunos tipos comunes de carga.

Tabla 1. Características Típicas de Cargas Individuales

Tipo de Carga	Factor de Potencia (Atraso)	Dependencia de Voltaje	
		P	Q
Motores industriales grandes	0.89	$V^{0.05}$	$V^{0.5}$
Pequeños motores industriales	0.83	$V^{0.1}$	$V^{0.6}$
Refrigerador	0.84	$V^{0.8}$	$V^{2.5}$
Bomba de Calor (frio/caliente)	0.81/0.84	$V^{0.2}$	$V^{2.5}$
Lavadora de platos	0.99	$V^{1.8}$	$V^{3.5}$
Lavadora de ropa	0.65	$V^{0.08}$	$V^{1.6}$
Secadora de ropa	0.99	V^2	$V^{3.3}$
Televisor a color	0.77	V^2	V^5
Lámpara Fluorescente	0.90	V^1	$V^{3.0}$
Lámpara incandescente	1.0	$V^{1.55}$	-
Calentador	1.0	V^2	-

La corrección del factor de potencia es proveída por medios de capacitores shunt fijos (permanentemente conectados) y suichados a varios niveles de voltaje a través del sistema de distribución. Los bancos de bajo voltaje son usados para grandes consumidores y los bancos de medio voltaje son usados en subestaciones de suicheo intermedias. Para grandes plantas industriales como la mostrada en la Figura 5, la

corrección del factor de potencia es aplicada a diferentes niveles (i) motores individuales (ii) grupos de motores (iii) en toda la planta.

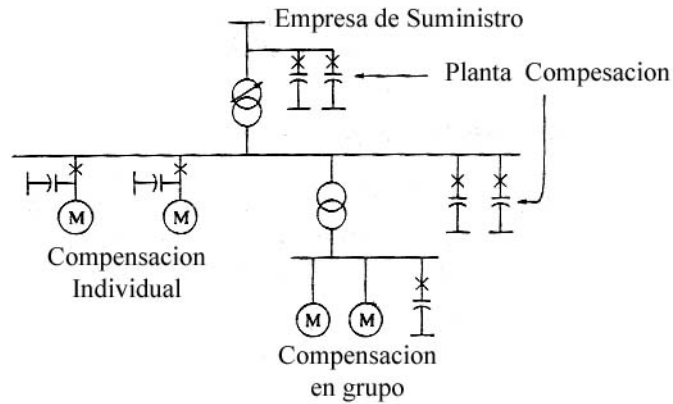
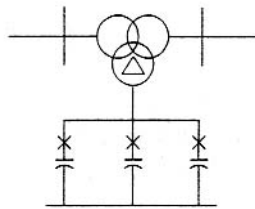


Figura 5. Corrección de Factor de Potencia en Plantas Industriales

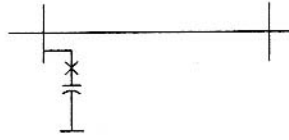
Los capacitares shunt son extensamente usados para el control del voltaje de alimentadores. Ellos son instalados en la localización apropiada a lo largo del alimentador para asegurar que los voltajes en todos los puntos se mantienen dentro de los límites máximos y mínimos permisibles cuando la carga varia.

Aplicaciones en sistemas de transmisión

Los capacitares shunt son usados para compensar las perdidas XI^2 en los sistemas de transmisión y para asegurar niveles de voltaje satisfactorios durante condiciones de alta carga. El banco de capacitares de apropiado tamaño son conectados o directamente a la barra de alto voltaje o al devando terciario de un transformador principal, como se muestra en la Figura 6.



(a) Banco de Capacitores conectados en el Terciario



(b) Banco de capacitores en HV

Figura 6. Conexiones de bancos de capacitores

Estos son suichados por interruptores ya sea automáticamente por un relé de voltaje o manualmente. Los suiches de los bancos de capacitores proveen un medio conveniente para controlar los voltajes del sistema de transmisión. Ellos están normalmente distribuidos a través del sistema de transmisión para minimizar las pérdidas y la caída de voltaje. Detallados estudios de flujo de carga son realizados para determinar el tamaño y la localización del banco de capacitores para lograr el criterio de diseño del sistema el cual especifica el máximo voltaje permitido siguiendo contingencias especificadas.

Capacitor Serie

Los capacitores series son conectados en serie con los conductores de líneas para compensar la reactancia inductiva de la línea. Este reduce la reactancia de transferencia entre las barras a las cuales la línea esta conectada, incrementando la máxima potencia que puede ser transferida, y reduce las pérdidas de potencia reactiva efectiva (XI^2). A través de los capacitores series no son normalmente instalados para control de voltaje, debido a que ellos contribuyen a mejorar el control de voltaje y el balance de potencia. La potencia reactiva producida por un capacitor serie se incrementa cuando se incrementa cuando la potencia transferida se incrementa; un capacitor serie es autoregulante en este aspecto.

Aplicación en Alimentadores de Distribución

Los capacitores series han sido aplicados para mejorar la regulación de voltaje de alimentadores de distribución e industriales desde la década de 1930. Welter y hornos son las típicas cargas con bajo factor de potencia e intermitente demanda. Un capacitor serie no solo reduce la caída de voltaje en régimen permanente, sino que este responde instantáneamente a los cambios en la corriente de carga. El capacitor serie, debido a que reduce la impedancia entre la fuente de potencia y la carga fluctuante, es efectiva para resolver los problemas de *flicker* de luz.

Hay un número de problemas asociados con la aplicación de capacitores series a los alimentadores industriales y que necesitan cuidadosa atención:

- La auto excitación de grandes motores de inducción y sincrónicos durante el arranque. El motor puede bloquearse en una fracción de la velocidad sincrónica (subsincronismo) debido a la condición de resonancia. El remedio más común es conectar durante el arranque, una resistencia adecuada en paralelo con el capacitor serie.

- La cabalgata de los motores sincrónicos (en algunos casos motores de inducción) a baja carga, debido a la alta relación X/R del alimentador.
- *Ferroresonancia* entre transformadores y capacitores series resultando en sobretensión armónica. Esto puede ocurrir cuando se energiza un transformador descargado i cuando se remueven rápidamente cargas.

Debido a los problemas ya mencionados y la dificultad en la protección de los capacitores de las corrientes de falla, los capacitores series no son ampliamente empleados en la actualidad en los sistemas de distribución. Son usados, sin embargo, en sistemas de subtransmisión para modificar la división de carga entre líneas paralelas y para mejorar la regulación.

Aplicaciones en Sistemas de Transmisión EHV

Debido a que los capacitores series permiten la carga económica de largas líneas de transmisión, su aplicación en sistemas de transmisión EHV ha crecido. Ellos han permitido ser usados para mejorar la estabilidad del sistema y para obtener la división de carga entre líneas paralelas.

La compensación completa de la línea nunca ha sido considerada. El 100% de la compensación, la reactancia efectiva de la línea debería ser cero, y la corriente de línea y el flujo de potencia debería ser extremadamente sensitiva a cambios en el ángulo relativo de los voltajes en terminales. Además, el circuito podría ser resonante en serie a la frecuencia fundamental. Altos niveles de compensación también incrementa la complejidad de los sistemas de protección y la probabilidad de resonancia subsinónica. Un limite practico alto al grado de compensación es de alrededor de 80%.

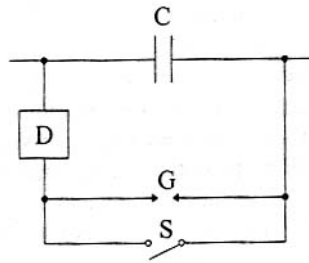
No es práctica distribuir la capacitancia en pequeñas unidades a lo largo de la línea. Pequeños capacitores son instalados en pocas localizaciones a lo largo de la línea. El uso de pequeños capacitores series resultan en un desigual perfil de voltaje.

Los capacitores series operan al potencial de línea, de aquí, que debe ser aislado de tierra. Una practica ampliamente empleada y aceptada es el montaje de los capacitores en plataformas aisladas de tierra. Alternativamente, los bancos de capacitores con base aterrada consisten de un capacitor que es colocado dentro de aislamiento líquido del tipo aceite en un tanque.

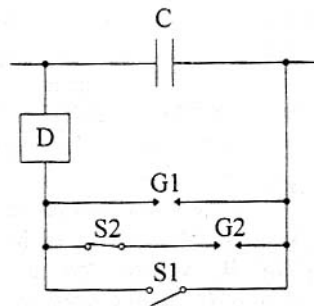
Los siguientes son algunas de las consideraciones de interés en la aplicación de bancos de capacitores serie:

- (a) *El aumento de la tensión debido a la corriente reactiva:* Los aumentos de voltaje en un lado del capacitor puede ser excesivo cuando la corriente reactiva que fluye es alta, como puede ocurrir durante oscilaciones de potencia o transferencia de grandes cargas. Esto puede imponer un esfuerzo inaceptable en el equipo en el lado que el equipo experimenta el alto voltaje. El diseño del sistema debe limitar el voltaje a niveles aceptables, o los equipos deben ser especificados para soportar los mas altos sobrevoltajes que pueden ocurrir.

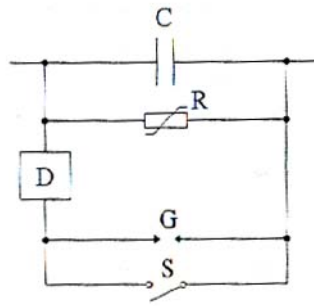
- (b) *Bypassing y reinmersión*: Los capacitores series son normalmente sujetos a un voltaje al cual esta en el origen de la regulación de la línea, así típicamente esta a un porcentaje muy pequeño de la tensión nominal de la línea. Si, como quiera que sea, la línea es cortocircuitada por una falla más allá del capacitor, un voltaje en el orden de la tensión de la línea aparecerá a través del capacitor. Esto puede ser no económico el diseño del capacitor para ese voltaje, debido a que tanto el tamaño como el costo del capacitor se incrementa con el cuadrado del voltaje. Entonces, la provisión es hecha por el *bypass* del capacitor durante fallas y la reinmersión luego que la falla es despejada. La velocidad de la reinserción puede ser un factor importante en el mantenimiento de la estabilidad transitoria. Tradicionalmente, el *pipas* fue proveído por cuernos de descarga (*spark gap*) a través del banco o cada modulo del banco. Sin embargo, la tendencia del presente es el uso de resistencias no lineales de oxido de zinc los cuales poseen una ventaja que la reinmersión es esencialmente instantánea. La Figura 7 muestra esquemas alternativos de *bypass*.



(a) Esquema protectivo de un simple gap



(b) Esquema protectivo de gap dual



(c) Esquema protector de Oxi de Zinc

C: Banco de Capacitores

D: Circuito de amortiguamiento

G: Spark Gap

S: Interruptor de Bypass

Figura 7. Esquemas protectivos de capacitor serie por bypass

El esquema mostrado en la Figura 7(a) consiste de un cuerno de descarga (G) el cual bypass el banco de capacitores cuando el voltaje del capacitor es excedido del valor ajustado, usualmente de tres a cuatro veces el voltaje nominal del capacitor. El circuito de amortiguamiento (D) limita la corriente de descarga y absorbe la energía del capacitor. A menor la detección de corriente en el gap, el interruptor de bypass (S) esta cerrado, desviando la corriente del gap. Cuando la corriente retorna al limite normal, la interruptor es abierto, entonces reinserta el capacitor a la línea. Este esquema es diseñado para proveer una inversión en un tiempo de 200 a 400 seg.

Un esquema de doble gap con tiempo reinmersión en el orden de 80 mseg es mostrado en la Figura 7(b). Este posee un cuerno de descarga adicional (G2) el cual es ajustado bajo de tal modo que disparara primero. El interruptor (S2) esta normalmente cerrado. En el evento de una falla, G2 bypass el banco de capacitores. El interruptor S2 abre inmediatamente luego que la línea fallada ha sido despejada y reinsertada el banco de capacitores en la línea. Como un resultado, la reinmersión no es demorada debido a debido al tiempo de desionización. El otro gap (G1) el cual esta ajustado mas alto, y el interruptor de bypass S1, sirve como protección de respaldo.

En el esquema mostrado en la figura 7(c), un resistor no lineal de oxi de zinc (ZnO) limita el voltaje a través del banco de capacitores durante una falla y reinserta el banco inmediatamente a la terminación de la corriente de falla. La energía es absorbida por el resistor de ZnO sin necesidad de que se cebe el arco en el cuerno de descarga (G). El cuerno de descarga esta proveyendo una protección de respaldo contra sobretensiones para el resistor. El banco de capacitores y el

resistor de ZnO mantienen el circuito durante la falla, con el resistor bypasando mas corriente; la reinmersión tiene lugar automáticamente sin retardo de tiempo cuando la falla es limpiada.

- (c) *Localización*. Un banco de capacitores serie puede teóricamente ser localizado en cualquier lugar a lo largo, de la línea. Los factores que influyen incluye costos, accesibilidad, nivel de falla, consideraciones de coordinación de protecciones, perfil de voltaje y efectividad en la mejora de la capacidad de transferencia de potencia.

Los siguientes son las consideraciones usuales de ubicación:

- En la mitad de la línea.
- Terminales de línea.
- 1/3 o 1/4 puntos de la línea.

En la práctica todos los arreglos antes mencionados han sido usados.

El punto medio de localización posee la ventaja que los requerimientos de la línea son menos complicado si la compensación es menor a 50%. En adición, las corrientes de cortocircuito son mas bajas. Sin embargo, este no es muy conveniente en términos de acceso de mantenimiento, monitoreo, seguridad, etc. Dividiendo la compensación en dos partes, el cual cada parte esta en los extremos de la línea, provee mas accesibilidad y disponibilidad de estación de servicio y otros dispositivos auxiliares. La desventaja son las altas corrientes de falla, los esquemas de protección demasiados complicados, el alto valor nominal de compensación.

La efectividad de los esquemas de compensación dependen de la localización de los capacitores series y los reactores shunt asociados.

La selección de la configuración del esquema de compensación para alguna aplicación particular requiere un estudio detallado con interés en todos los aspectos y en particular de economía y la confiabilidad del sistema. El estudio debe tomar en cuenta el perfil de voltajes, efectividad de la compensación, efecto en perdidas de transmisión, sobrevoltajes, y proximidad a la estación atendida.

Agregando un capacitor serie con la inductancia de una línea de transmisión forma un circuito resonante serie. La frecuencia natural del circuito resonante formado, para el rango usual de compensación (20 a 70% de la reactancia de la línea), esta por debajo de la frecuencia fundamental. La red de transmisión entonces posee una frecuencia natural en el rango subsincronico. Consecuentemente, las componentes de corriente transitorias de frecuencias subarmonicas son excitadas durante alguna perturbación y son superimpuesta a las corrientes de frecuencia fundamental. Las corrientes subarmonicas son usualmente, amortiguadas rápidamente dentro de unos pocos ciclos, debido a la resistencia de la línea y de algunos equipos conectados como cargas. Además el modo subarmónico natural introducido por el uso de capacitores series es raramente usado. Una notable excepción es la posible interacción con la frecuencia natural, del sistema de eje mecánico de las unidades d generación de turbinas a vapor cercanas. Esto puede desencadenar unas oscilaciones torsionales, que pueden ser espontáneas o posteriores a

las perturbaciones. Este fenómeno es conocido como resonancia subsíncrona (*subsynchronous resonante SSR*).

Condensadores Sincrónicos

Un condensador sincrónico es una máquina sincrónica que funciona sin un *pri-motor* o una carga mecánica. Mediante el control de la excitación de campo, este puede ser hecho para generar o absorber la potencia reactiva. Con un regulador de voltaje, este puede ajustar automáticamente la potencia reactiva de salida para mantener el voltaje en terminales constante. Este maneja un pequeño valor de potencia reactiva desde el sistema de potencia para suministrar las pérdidas.

Los condensadores sincrónicos han sido usados desde la década de 1930 para el control de potencia reactiva tanto a niveles de sistemas de transmisión como de subtransmisión. Ellos son frecuentemente conectados en el devanado terciario de transformadores. Ellos caen dentro de la categoría de *compensadores activos shunt*. Debido a que ellos poseen altos costos de adquisición y operativos, ellos han sido grandemente superados por los compensadores estáticos. Las recientes aplicaciones de los condensadores sincrónicos han sido mayormente orientadas a estaciones convertidoras HVDC conectadas a sistemas WEAK. Existen algunos viejos condensadores sincrónicos que aun se mantienen en operación, y ellos sirven como una forma excelente de dispositivos de control de potencia reactiva y voltaje.

Los compensadores sincrónicos poseen algunas ventajas sobre los compensadores estáticos. Los compensadores sincrónicos contribuyen a la capacidad de corriente de cortocircuito. Durante las oscilaciones de potencia (oscilaciones electromecánicas) hay un intercambio de energía cinética entre un condensador sincrónico y un sistema de potencia. Durante tales oscilaciones de potencia, un condensador sincrónico puede suplir un gran valor de potencia reactiva, que puede llegar hasta dos veces la capacidad nominal. Estos poseen una capacidad de sobrecarga de 10 a 20% de capacidad de sobrecarga hasta 30 minutos. A contrario que otras formas de compensación, este posee una fuente de voltaje interno y es mejor para habilitar con condiciones de bajo voltaje.

Algunas turbinas de combustión para cubrir picos pueden ser operadas como condensadores sincrónicos, si es requerido. Tales unidades son frecuentemente equipadas con *clutches* los cuales pueden ser usados para desconectar la turbina del generador cuando la potencia activa de ellas no es requerida.

Sistemas de Compensación Estática

Terminología

Los compensadores estáticos de VAR (SVC) son generadores o cargas estáticos conectados en forma *shunt* cuya salida es variada por el control específico de parámetros del sistema de potencia. El término estático, es usado para indicar que los SVC, al contrario que los compensadores sincrónicos no poseen partes móviles o componentes

primarios rotativos. Entonces un SVC consiste de un generador estático de VAR (SVG) o dispositivos de absorción y un dispositivo de control apropiado.

Un sistema de VAR estáticos, la agregación a los SVC y mecánicamente suichados capacitores (MSC) o reactores (MSR) cuya salida son coordinados.

Tipos de SVC

Los siguientes son los tipos básicos de elementos de control de potencia reactiva los cuales son o forman parte de un sistema de VAR estáticos:

- Reactores Saturados (*Saturated Reactors SR*)
- Reactores controlados por tiristores (*Thyristor controlled reactor TCR*)
- Capacitores suichados por tiristores (*Thyristor-switched capacitor TSC*)
- Reactores suichados por tiristores (*Thyristor-switched reactor TSR*)
- Transformadores controlador por tiristores (*Thyristor-controlled Transformer TCT*)
- Convertidores auto-conmutados o conmutados por la línea (*Self or Line Commutated Converter SCC/LCC*)

Un numero diferente de configuraciones de SVC hechas de la combinación de una o mas de los tipos básicos de SVC y bancos capacitores fijos (*Fixed Capacitors*) (por ejemplo, capacitores no suichados por vía control automático local) han sido usados en la practica para compensación de sistemas de transmisión.

Los sistemas de var estáticos son capaces de controlar los voltajes de fase individuales de las barras a las cuales han sido conectados. Ellos pueden ser usados también como control de desviación de los voltajes en secuencia positiva como negativa. Sin embargo, es esta interesado en el desempeño de tensiones balanceadas a frecuencia fundamental del sistema de potencia.

Comportamiento de un SVS a frecuencia fundamental

Características de un SVS ideal

Desde el punto de vista de sistemas de potencia, un SVC es equivalente a un capacitor shunt y n reactor shunt: ambos pueden ser ajustados para controlar el voltaje y la potencia reactiva en sus terminales (o en la cercanía de la barra) en una manera prescrita (ver Figura 8).

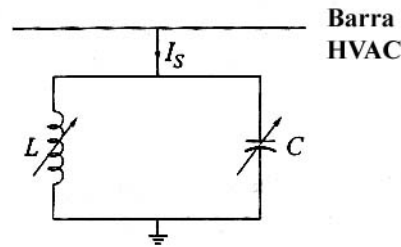


Figura 8. Sistema estático de VAR idealizado

Idealmente un SVS debería mantener constante el voltaje (asumiendo que este es el objetivo que se desea), procesando una capacidad ilimitada de generar o absorber VAR y sin pérdidas de potencia activa y reactiva y proveyendo una respuesta instantánea. El desempeño de el SVS puede ser visualizado en la grafica del voltaje AC controlado de la barra (V) dibujado en función de la corriente reactiva SVS (I_s). La característica V/I de un SVS ideal es mostrado en la Figura 11.40. Esta representa la característica de régimen permanente y de régimen cuasi-permanente del SVS.

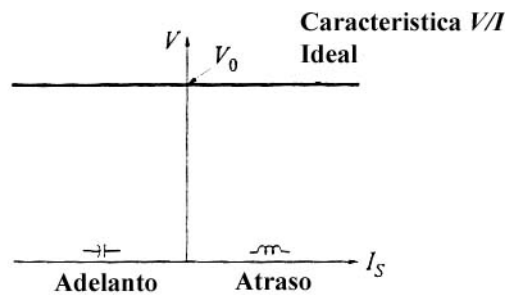


Figura 9. Característica V/I ideal de un compensador

Característica de un SVS real

Considere un SVS compuesto de un reactor controlable y un capacitor fijo. La característica resultante son suficientemente general y son aplicable para un amplio rango de configuraciones practicas de SVS.

La Figura 10 ilustra la derivación de la característica de un SVS consistente de un reactor controlable y un capacitor fijo. La característica compuesta, es derivada por la suma de las características individuales de los componentes. Las características son mostradas en la Figura 10(a) es representativa de las características de reactores controlables prácticos.

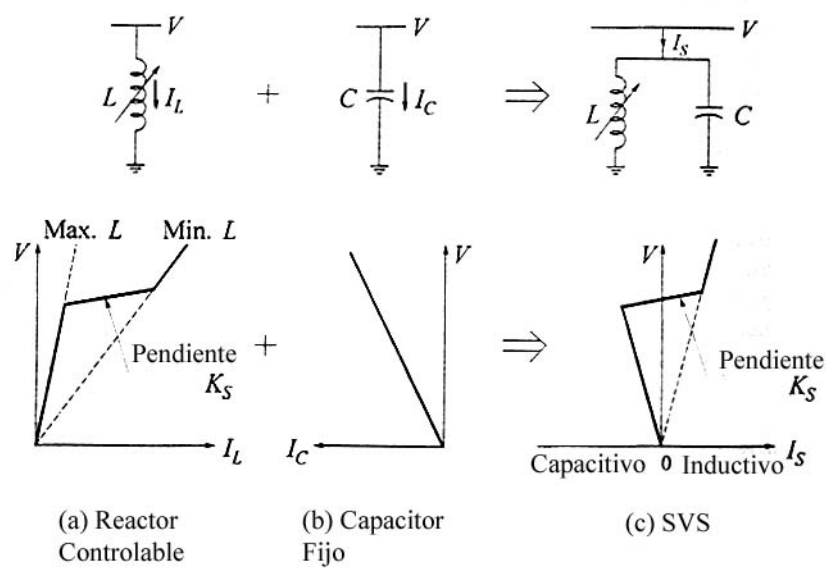
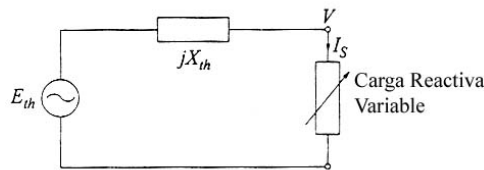


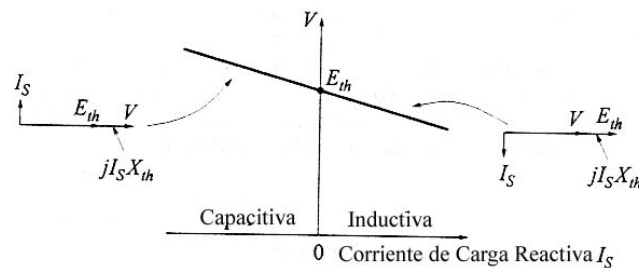
Figura 10. Características compuestas de un SVS

Característica del Sistema de Potencia

Con la intención de examinar como se comporta el SVS cuando es aplicado a un sistema de potencia. La característica de V/I puede ser determinada considerando el circuito equivalente de Thevenin visto desde la barra cuyo voltaje será regulado por el SVS. Esto es ilustrado en la Figura 11.



(a) Circuito equivalente de una red HVCA



(b) Características Voltaje-Corriente reactiva

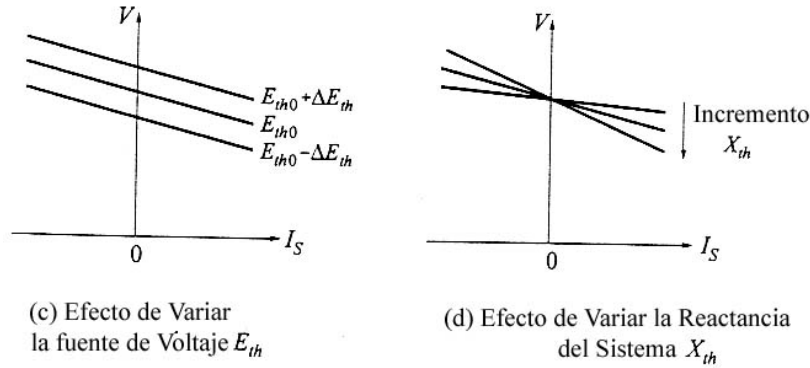


Figura 11. Característica de Voltaje de sistema de potencia versus corriente reactiva

La impedancia de Thevenin en la Figura 11(b) es predominantemente en reactancia inductiva. La curva característica de voltaje correspondiente versus la corriente inductiva es ilustrada en la Figura 11(b). El voltaje V se incrementa linealmente con la corriente de carga capacitiva y decrece linealmente con la corriente de carga inductiva.

Para cada condición de red, un circuito equivalente tal como el mostrado en la Figura 11(a) puede ser definido. Las Figuras 11(c) y (d) muestra como la característica de la red V/I es afectada por los cambios en el voltaje de la fuente E_{th} y la reactancia equivalente del sistema X_{th} , respectivamente.

Características Compuesta de SVS y sistema de potencia

La característica del sistema puede ser expresada como:

$$V = E_{th} - X_{th} I_S \quad (1)$$

La característica del SVS, dentro del rango de control definido por la reactancia pendiente X_{SL} es dado por:

$$V = V_0 + X_{SL} I_S \quad (2)$$

Para voltajes fuera del rango de control, la relación V/I_S es igual a la pendiente de dos segmentos extremos de la Figura 11(c). Estos son determinado de los valores nominales del inductor y el capacitor.

Las ecuaciones características de solución de SVS y el sistema de potencia son gráficamente ilustradas en la Figura 11.43. Tres sistemas característicos son considerados en la Figura, correspondientes a tres valores de las fuentes de voltaje. La característica del medio representa la condición nominal del sistemas, y es asumido que intercepta la característica del SVS en el punto A a $V = V_0$ e $I_S = 0$.

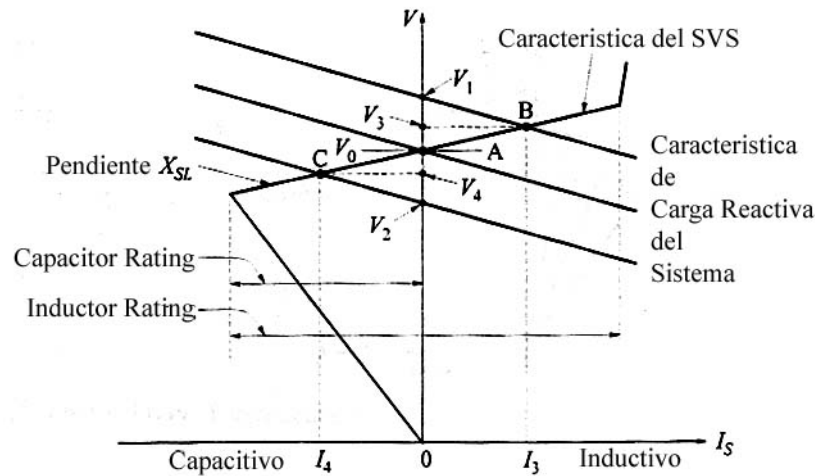


Figura 12. Solución gráfica de punto de operación SVS para una dada condición del sistema

Si el voltaje del sistema se incrementa por ΔE_{th} (por ejemplo, debido al decremento del nivel de carga del sistema, V se incrementaría a V_1 , sin un SVS. Con el SVS sin embargo, el punto de operación se mueve a B; por la absorción de corriente inductiva I_3 , el SVS mantiene el nivel de voltaje en V_3 . Similarmente, si la fuente de voltaje disminuye (por ejemplo debido a un incremento en el nivel de carga), el SVS mantiene el voltaje en V_4 , comparado con V_2 que es sin la acción del SVS. Si la pendiente K_S de la curva característica del SVS fuere cero, el voltaje podría haber sido mantenido a V_0 , en ambos casos considerados.

Efecto del Uso de Capacitores Suichados

En el ejemplo considerado en la Figura 12, el rango de control de SVS puede ser excedido por grandes variaciones en el sistema. El uso de bancos capacitores conmutados o suichados puede extender el rango continuo de control del SVS. Esto es ilustrado en la Figura 13, el cual considera tres bancos de capacitores, dos de los cuales son suichables. Tanto tiristores como suiches mecánicos pueden ser usados para conmutar los capacitores entrando y saliendo automáticamente por un control local de sensor. En la figura el capacitor no sicheado incluye un reactor para el filtrado de armónicos.

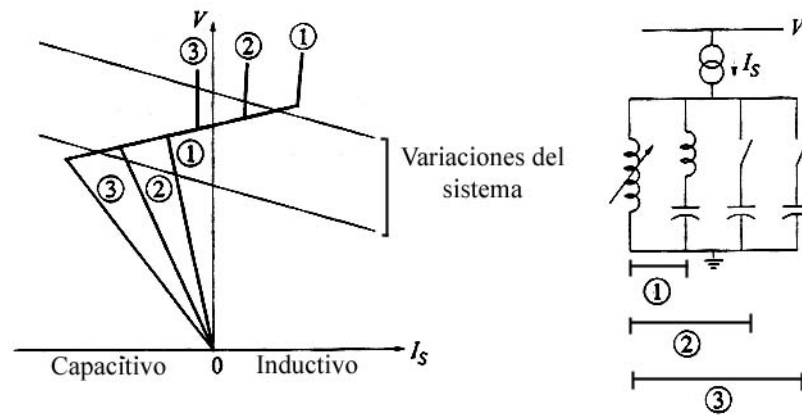


Figura 13. Uso de capacitores suichados para extender el rango de control continuo

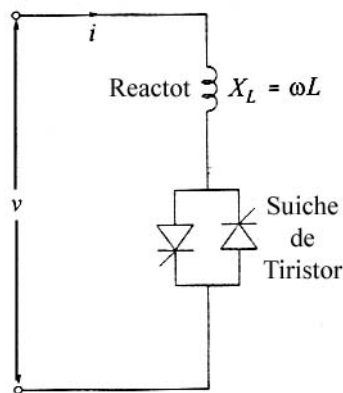
Se puede ver que un SVS no es una fuente de voltaje como un condensador sincrónico. Sino, que este altera el voltaje del sistema en el punto de conexión variando la corriente reactiva de carga la cual es ajustada para mantener el voltaje AC muy cerca de constante.

En general, los elementos de un SVS operan en el principio de susceptancia ajustable. La susceptancia es controlada tanto por el reactor como por un capacitor.

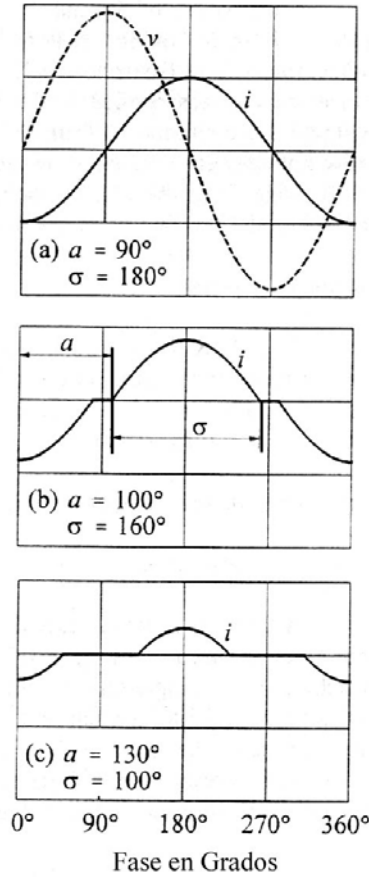
Reactor Controlado por Tiristores (TCR)

Principio de Operación

Los elementos básicos de un TCR son un reactor con un suiche de tiristor bidireccional como se muestra en le Figura 11.45(a).



(a) Elementos básicos



(b) Forma de onda de corriente

Figura 14. Reactor controlado por tiristor

Los tiristores conducen en alternados medios ciclos de la fuente de alimentación dependiendo del ángulo de disparo α , el cual es medido del cruce por cero de la tensión de alimentación. La conducción total es lograda con un ángulo de disparo de 90° . La corriente es esencialmente reactiva y sinusoidal. La conducción parcial es obtenida con ángulos de disparo entre 90 y 180° , como se muestra en la Figura 14(b). Los ángulos de disparo entre 0 y 90° no son permitidas que ellas produzcan corrientes asimétricas con una componente DC.

Sea σ el ángulo de conducción, relacionado con α por:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (3)$$

La corriente instantánea i es dada por:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L}(\cos \alpha - \cos(\omega t)) & \text{para } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \text{para } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (4)$$

El análisis de Fourier de la forma de onda de la corriente aporta que la componente fundamental de la corriente es:

$$I_1 = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \text{sen} \sigma}{\pi} \quad (5)$$

Donde I_1 y V son valores RMS, y X_L es la reactancia del reactor a la frecuencia fundamental.

El efecto de de incrementar α es (o decremento de σ) es reducir la componente fundamental I_1 . Esto es equivalente al incremento de la inductancia efectiva del reactor. En efecto, el TCR es un elemento de susceptancia controlable. La susceptancia efectiva es una función del ángulo de disparo:

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \text{sen} \sigma}{\pi X_L} = \frac{2(\pi - \alpha) + \text{sen} 2\alpha}{\pi X_L} \quad (6)$$

El máximo valor de la susceptancia efectiva es a plena conducción ($\alpha = 90^\circ, \sigma = 180^\circ$) y es igual a $1/X_L$, el máximo valor es cero, obtenido con $\alpha = 180^\circ, \sigma = 0^\circ$.

Este principio de control de susceptancia es conocido como *control de fase*. La susceptancia es suicheada en el sistema para una fracción controlable para cada medio ciclo. La variación de la susceptancia también hace que la corriente del TCR sea suave o continua.

El TCR requiere de un sistema de control el cual determine el instante de disparo (ángulo de disparo) medido desde el ultimo cruce por cero de voltaje (sincronización por ángulo de disparo). En algunos diseños el sistema de control responde a una señal que representa e valor de la susceptancia deseada. En otros, el control responde al error de señal tal cual la desviación de voltaje, señales auxiliares estabilizantes. El resultado es una característica de régimen permanente de V/I mostrada en la Figura 15, la cual puede ser descrita como:

$$V = V_{ref} + X_{SL} I_1 \quad (7)$$

Donde X_{SL} es la pendiente de reactancia determinada por la ganancia del sistema de control.

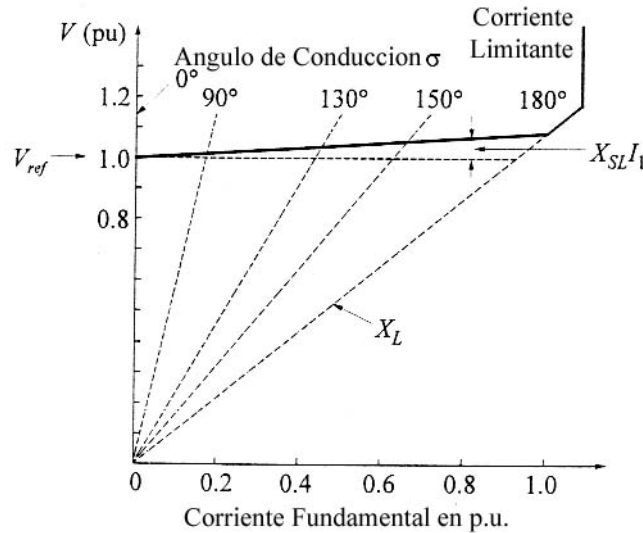
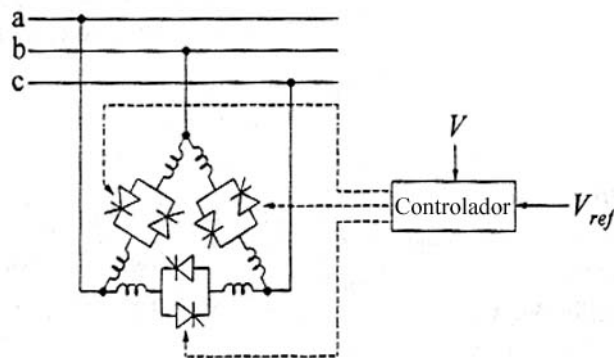


Figura 15. Característica de Voltaje fundamental- corriente para un TCR

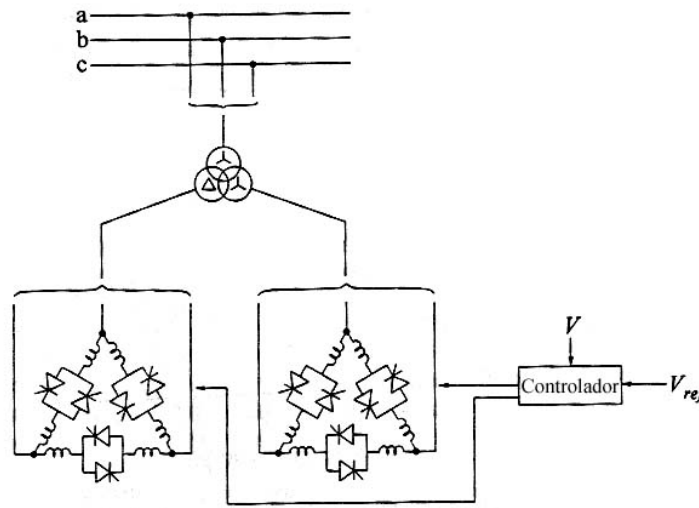
Como se ilustra en la Figura 13, la característica de control de voltaje TCR puede ser extendida en una región capacitiva por la adición en paralelo de un banco de capacitores fijos o bancos de capacitores suichados.

Armónicos

Como α es incrementado de 90 a 180°, la forma de onda de la corriente es menos sinusoidal, en otras palabras, el TCR genera armónicos. Para el dispositivo monofásico considerado antes, si el disparo de los tiristores es simétrico (igual para ambos tiristores), solo ODD armónicos son generador. Para un sistema trifásico, el arreglo preferido es que posee tres elementos monofásicos TCR conectados en delta (TCR de 6 pulsos) como se muestra en la figura 16(a). Para condiciones balanceadas, todos los armónicos triples (3,9, ...) circulan dentro de la delta cerrada y son entonces aislados de las corrientes de línea. Filtros son usados frecuentemente para remover las corrientes armónicas.



(a) TCR de seis pulsos



(b) TCR de 12 pulsos

Figura 16. Arreglos de TCR trifásicos

La eliminación del 5^{to} y 7^{mo}, armónico son logrados por el uso de dos TCR de seis pulsos de igual capacidad nominal, alimentados desde dos devanados secundarios de un transformador reductor, uno conectado en delta y el otro en estrella, como se muestra en la Figura 16(b). Debido a que los voltajes aplicados a los TCR poseen una diferencia de fase de 30°, los 5^{to} y 7^{mo} armónicos son eliminados del lado primario de las líneas. Esto es conocido como un arreglo de doce pulsos, debido a que hay doce disparos cada ciclo de la tensión de línea trifásica. Con el esquema de doce pulsos, los armónicos característicos son el 11^{vo} y el 13^{vo}. Estos pueden ser filtrados con un simple banco de capacitores.

Respuesta Dinámica

El TCR responde en cerca de 5 a 10 mseg, pero retardos son introducidos por los circuitos de medición y control. Para asegurar la estabilidad del lazo de control la rata de respuesta puede ser limitada. Por esta razón del tiempo de respuesta es típicamente alrededor de 1 a 5 ciclos de la frecuencia de alimentación.

Capacitor Suichado por Tiristor (TSC)

Principio de Operación

Un esquema de capacitores suichados por tiristores consiste de un banco de capacitores dividido en unidades de tamaño apropiado, cada una de las cuales es suichado encendido o apagado usando como suiches tiristores. Cada unidad monofásica consiste de un capacitor (C) en series con un tiristor bidireccional y un pequeño inductor (L) como se muestra en la Figura 17(a). El propósito del inductor es limitar el transitorio de maniobra,

amortiguar la corriente inrush, y prevenir la resonancia con la red. En aplicaciones trifásicas, la unidad básica son conectadas en delta como se muestra en la figura 17(b).

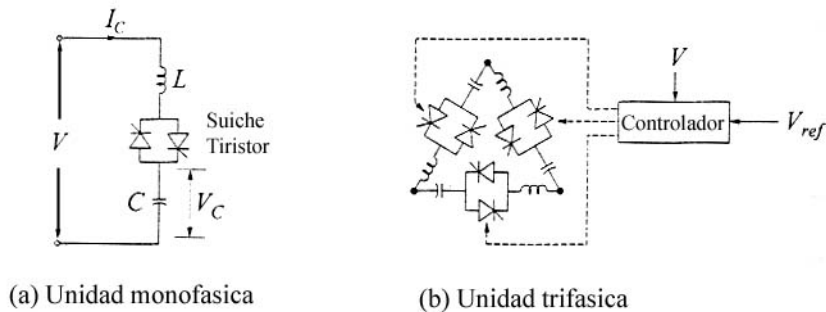


Figura 17. Capacitor suichado por tiristor (TSC)

El capacitor que se suichea excita transitorios que pueden ser grandes o pequeños dependiendo de la frecuencia de resonancia de los capacitores con un sistema externo. El sistema de control de disparo de los tiristores es diseñado para minimizar el transitorio de suicheo. Esto es logrado por la selección de instante cuando el voltaje a través del tiristor esta en su mínimo, idealmente cero. La Figura 18, ilustra el principio de operación. El instante de cierre (t_1) es elegido de modo que el voltaje de la barra V es a su máximo, y de la misma polaridad que el voltaje del capacitor, esto asegura un transitorio libre de suicheo. El instante de apagado del suiche (t_2) corresponde al cruce por cero. El capacitor entonces se mantendrá cargado a un pico de voltaje, tanto positivo como negativo, listo para la próxima operación de conmutación.

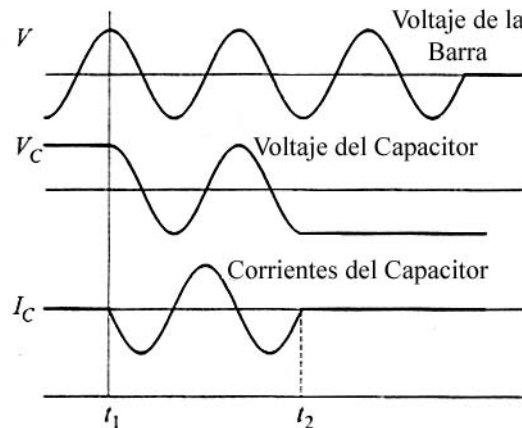


Figura 18. Operación de suicheo de un TSC

El principio de control de susceptancia usado por el TSC es conocido como *control de ciclo integral*; la susceptancia es suichada por un número integral de medio ciclo exacto. La susceptancia es dividida en algunas unidades paralelas, y la susceptancia es variada

controlando el número de unidades en operación. Una carga puede ser hecha cada medio ciclo. Esta forma de control no genera armónicos.

La Figura 19 muestra el esquema básico de un TSC consistente de elementos TCS conectados en delta paralela y un control. Cuando el voltaje de la barra se desvía del valor de referencia (V_{ref}) más allá de la banda muerta en cualquier dirección, el control del suicheo (entrada o salida) de uno o más bancos de capacitores hasta que el voltaje retorne dentro de la banda muerta, provee que no todos los bancos han sido suichados entrada (o salida).

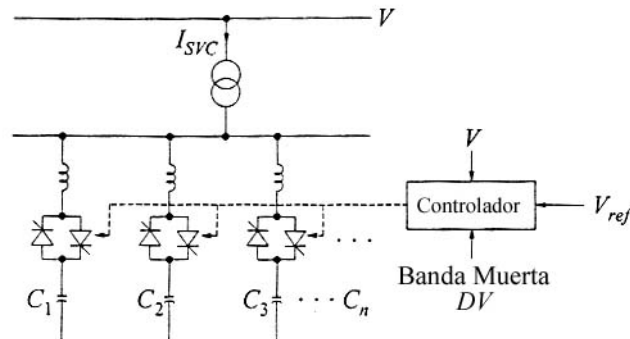


Figura 19. Esquema de TSC

Respuesta Dinámica

La característica V/I de un compensador TSC es mostrada en la Figura 20. Se puede ver que el control de voltaje es discontinuo o de pasos. Esto es determinado por la capacidad nominal y número de unidades conectadas en paralelo. En aplicaciones de alto voltaje, el número de bancos de capacitores shunt es limitado debido al alto costo de los tiristores.

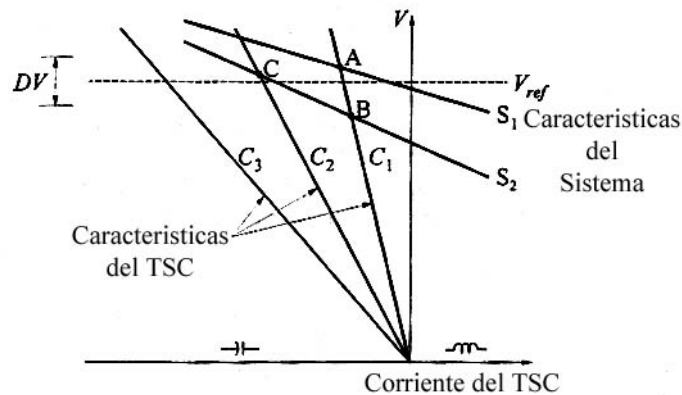


Figura 20. Característica V/I de un TSC y sistema de potencia

La característica V/I del sistema de potencia, como condiciones de cambio del sistema, interfiere las características TSC y V/I a un punto discreto. El voltaje de la barra V es

controlada dentro del rango $V_{ref} \pm DV/2$, donde DV es la banda muerta. Cuando el sistema esta operando al que esta característica es representada o la línea S_1 , entonces el capacitor C_1 será suichado para ser incorporado y el punto operativo A prevalece. Si la característica del sistema súbitamente cambia a S_2 , el voltaje de la barra cae inicialmente al valor representa por el punto de operación B. El sistema de control del TSC suichea en banco C_2 para cambiar el punto de operación a C, siendo el voltaje dentro del rango deseado. Entonces la corriente de compensador puede cambiar en pasos discretos. El tiempo tomado por ejecución de un comando desde el controlador posee un rango de medio ciclo a un ciclo.

Capacitores Suichados Mecánicamente (MSC)

Típicamente, un esquema MSC consiste de uno o más unidades de capacitores conectados al sistema de potencia por medio de un interruptor de potencia. Un pequeño reactor puede ser en serie con el capacitor para amortiguar los transitorios de energización y reducir los armónicos. Interruptores de preinversión y reinmersión han sido usados para prevenir los sobrevoltajes en el sistema debido a los transitorios de maniobra de los capacitores.

La característica V/I es lineal y similar a la de un TSC. La respuesta de tiempo es igual al tiempo de maniobra o suicheo del arreglo del interruptor el cual esta en el orden de 100 mseg siguientes a la iniciación de la instrucción de operación de maniobra. Las frecuentes maniobras no son posibles a menos que se disponga de un dispositivo de descarga.

Sistemas Prácticos de VAR Estáticos

Un esquema de Var estáticos de compensación con algún rango de control deseado puede ser formado usando combinaciones de elementos descritos antes. Algunas configuraciones de SVS han sido exitosamente para cumplir con requerimientos del sistema. La requerida velocidad de respuesta, el rango de tamaño, flexibilidad, perdidas, y costos son valores de importante consideración en la selección de una configuración para alguna aplicación particular.

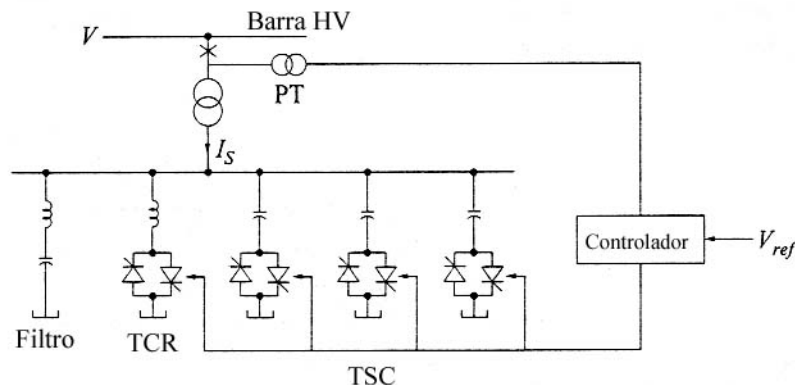
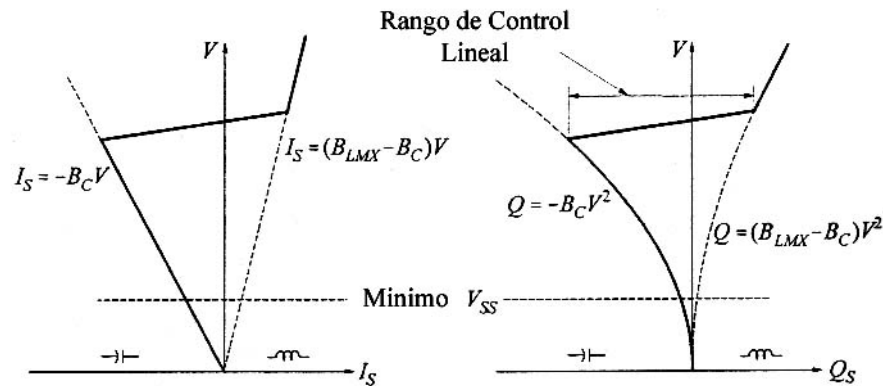


Figura 21. Un típico Sistema Estático de VAR

La Figura 21 muestra un esquema típico de SVS consistente de un TCR, una unidad triple TSC, un filtro de armónicos (para los armónicos generados por el TCR). A frecuencia de operación, los filtros son capacitivos, y producen potencia reactiva de 10 a 30% de la capacidad nominal de MVAR del TCR. Con el objetivo de asegurar una suave característica de control, la corriente nominal del TCR debe ser un poco más grande que la de una unidad TSC, en otro caso la banda muerta aumenta.

La característica V/I del SVS mostrada en la Figura 22(a), y la correspondiente característica V/Q es mostrada en la Figura 22(b). El rango de control lineal cae dentro de los límites determinado por la máxima susceptancia (B_{LMX}) del reactor, la susceptancia capacitiva total (B_C) determinada por el banco de capacitores en servicio y la capacitancia del filtro. Si el voltaje cae por debajo de un cierto nivel (típicamente 0.3 p.u) por un periodo extenso, el control de potencia y la energía de disparo de los tiristores puede ser perdido, requiriendo la salida de operación del SVS. El SVS puede reinsertarse en servicio una vez que el voltaje se recupera. Sin embargo, el voltaje puede caer a bajos valores por periodos cortos, tales como durante transitorios de fallas, sin causar el disparo y salida de servicio del SVS.

**Figura 22. Características de régimen permanente de SVS**

Dentro del rango de control lineal, el SVS es equivalente a una fuente de voltaje V_{ref} en serie con una reactancia X_{SL} . Como es evidente de la figura 11.43., la reactancia de la pendiente posee un significativo efecto en el desempeño del SVS. Un gran valor de X_{SL} hace que el SVS sea mas lento en la respuesta, por ejemplo, cambios en las condiciones del sistema causa una gran variación a la barra de alto voltaje del SVS. El valor de X_{SL} es determinado por la ganancia de régimen permanente del controlador (regulador de voltaje). Esto puede ser también afectado por una realimentación de corriente (con un controlador PI). Esta alternativa esta basada en un flujo de carga detallado y estudios de estabilidad. Típicamente, la pendiente se ajusta en el rango de 1 a 5% dependiendo de la fortaleza del sistema en AC.

Aplicación de los Compensadores estáticos de VAR

Debido a que su aplicación es de finales de la década de 1970, el uso de los SVC en sistemas de transmisión ha ido incrementándose lentamente. Debido a la virtud de ellos

de su habilidad de proveer un control rápido y continuo de la potencia reactiva y el voltaje, los SVC pueden mejorar algunos aspectos del desempeño de los sistemas de transmisión. Las aplicaciones a la fecha incluyen las siguientes:

- Control de sobretensiones Temporales (frecuencia industrial)
- Prevención del colapso de voltaje.
- Mejora de la estabilidad transitoria.
- Mejora del amortiguamiento de oscilaciones de potencia.

En los niveles de subtransmisión y distribución, los SVC son usados para balancear los sistemas trifásicos de sistemas que alimentan cargas desbalanceados. Ellos también son empleados para minimizar fluctuaciones en la fuente de voltaje, causados por el repetitivo impacto de cargas tales como plantas de minería, prensas, y hornos de arco.

Los hornos de arco son un caso especial de cargas de impacto. Ellas causan fluctuaciones de voltaje con frecuencia aleatorias que varían entre 2 y 10 Hz. Esto resulta en flicker en lámparas de filamento en las adyacencias de las cargas. Algunos equipos electrónicos y receptores de televisión pueden también ser afectados adversamente. El termino flicker de voltaje es usado para describir rápidas fluctuaciones de voltaje. Para minimizar los efectos adversos de las fluctuaciones de voltaje en las adyacencias de las cargas, debe ser mantenido por debajo del nivel mínimo aceptable (típicamente 0.3%). Los SVC proveen un medio efectivo y económico de eliminar los problemas y ha sido ampliamente usado para tales aplicaciones desde comienzo de la década de 1970.

Principios de Compensación de Sistemas de Transmisión

Una bien planeada y coordinada aplicación de los dispositivos de compensación es esencial para el diseño y operación confiable y económica de un sistema. Como la compensación de reactivos afecta el comportamiento de régimen permanente tanto como la de régimen dinámico del sistema, detallados estudios de flujo de carga y estabilidad son requeridos para establecer el esquema apropiado de compensación.

Además de las simulaciones detalladas, un entendimiento de los principios de compensación reactiva en sistemas de transmisión es invaluable para la apropiada selección y aplicación de los dispositivos de compensación.

Compensación Uniformemente distribuida fija serie y shunt

El desempeño de una línea de transmisión es determinado por el impedancia característica Z_C y la longitud eléctrica (también referida como el ángulo de la línea) θ . El objetivo de la compensación es modificar esos parámetros para que resulte en el voltaje deseado y las características de transferencia de potencia deseada.

Sin compensación, asumiendo la línea sin pérdidas, la expresión de esos dos parámetros son:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{x_L}{b_c}} = \sqrt{\frac{X_L}{B_c}} \quad (9)$$

$$\theta = \beta l \quad (10)$$

con la constante β dado por:

$$\beta = \omega\sqrt{LC} = \sqrt{x_L b_c} = \frac{\sqrt{X_L B_c}}{l} \quad (11)$$

Donde:

- L = inductancia serie en por unidad longitud.
- C = capacitancia shunt en por unidad longitud.
- x_L = reactancia inductiva serie por unidad de longitud.
- b_C = susceptancia capacitiva shunt por unidad de longitud.
- X_L = reactancia inductiva serie total.
- B_C = susceptancia capacitiva shunt total.
- l = longitud de la línea.

Designase de las cantidades correspondientes *con compensación* por el uso de un asterisco (*).

Con una confirmación uniformemente en shunt con una susceptancia b_{sh} , por unidad de longitud, la susceptancia capacitiva shunt es dada por:

$$b'_C = b_C - b_{sh} = b_C(1 - k_{sh}) \quad (12)$$

Donde k_{sh} es definido como el *grado de compensación shunt*, y que es definido por:

$$k_{sh} = \frac{b_{sh}}{b_C} \quad (13)$$

Este es positivo para compensación inductiva shunt y es negativa para compensación capacitiva shunt.

El valor efectivo de la impedancia característica y la constante de fase con la compensación shunt son relacionados con los valores no compensados como sigue:

$$Z'_C = \sqrt{\frac{x_L}{b'_C}} = \frac{Z_C}{\sqrt{1 - k_{sh}}} \quad (14)$$

$$\beta' = \beta\sqrt{1 - k_{sh}} \quad (15)$$

La compensación capacitiva shunt en efecto decrece la impedancia característica Z_C e incrementa β , mientras que la compensación inductiva hace todo lo contrario, es decir, incrementa Z_C , y decrece β .

Con una uniformemente distribuida compensación serie de C_{se} por unidad de longitud, la reactancia efectiva serie es:

$$x'_L = x_L - \frac{1}{\omega C_{se}} = x_L - x_{se} \quad (16)$$

$$x'_L = x_L (1 - k_{se}) \quad (17)$$

Donde k_{se} es el *grado de compensación serie capacitiva*, definido como:

$$k_{se} = \frac{x_{Cse}}{x_L} \quad (18)$$

Este es positivo para compensación serie.

El valor efectivo de la impedancia característica y la constante de fase con compensación serie es dado por:

$$Z'_C = \sqrt{\frac{x'_L}{b'_C}} = Z_C \sqrt{1 - k_{se}} \quad (19)$$

$$\beta' = \beta \sqrt{1 - k_{se}} \quad (20)$$

La compensación serie (capacitiva) decrece tanto Z_C como β .

Con *compensación serie y shunt* al mismo tiempo, el efecto combinado es el siguiente:

$$Z'_C = Z_C \sqrt{\frac{1 - k_{se}}{1 - k_{sh}}} \quad (20)$$

$$\beta' = \beta \sqrt{(1 - k_{se})(1 - k_{sh})} \quad (21)$$

El ángulo efectivo de la línea (θ') y la carga natural (P'_0) esta dado por:

$$\theta' = \theta \sqrt{(1 - k_{se})(1 - k_{sh})} \quad (22)$$

$$P'_0 = P_0 \sqrt{\frac{1 - k_{se}}{1 - k_{sh}}} \quad (23)$$

Efecto de la Compensación en el Voltaje de la Línea

Bajo condiciones de baja carga, un perfil de voltaje plano es logrado por la compensación inductiva shunt. Por ejemplo, con $k_{sh} = 1$ (compensación 100% inductiva), θ' y P'_0 son reducidas a cero, y Z'_C se incrementa a infinito, esto resulta en un voltaje plano a cero carga.

Bajo condiciones de gran carga, un voltaje plano puede ser logrado con la adición de compensación capacitiva shunt. Por ejemplo, con la idea de transmitir $1.4P_0$ con un perfil plano de voltaje, una compensación shunt capacitiva de $k_{sh} = -0.96$ es requerida.

La compensación serie puede, en teoría, se usado en lugar de la compensación shunt, para dar un perfil de voltaje plano, bajo condiciones de carga grande. Por ejemplo, un perfil plano de voltaje puede ser logrado a una carga de $1.4P_0$ con una compensación serie

distribuida de $k_{sh} = 0.49$. En la práctica, capacitores serie concentrados no son deseables para obtener un suave perfil de voltaje a lo largo de la línea. Obviamente, los cambios en pasos en el voltaje ocurre en puntos donde el capacitor serie es aplicado. Esto, se hace sin embargo, para mejorar la regulación de voltaje en un punto dado, por ejemplo los cambios de voltaje con carga son reducidos.

Efecto de la Compensación a Máxima Potencia

La potencia transferida por una línea, sin compensación es:

$$P_R = \frac{E_S E_R}{Z'_C \sin \theta'} \sin \delta \quad (24)$$

La máxima potencia (correspondiente a $\delta = 90^\circ$) puede ser incrementada, disminuyendo o Z'_C o θ' o ambos.

La impedancia característica Z'_C , puede ser disminuida con la compensación capacitiva serie, esto es acompañada de un incremento en el ángulo eléctrico θ' . Por el otro lado, la compensación shunt inductiva, decrece θ' , pero incrementa a Z'_C . Solo la compensación serie con capacitor contribuye a disminuir tanto Z'_C , como a θ' .

Se debe reconocer sin embargo, que la compensación no es requerida en todos los casos para satisfacer ambos objetivos: (i) incrementando P_0 , el nivel de potencia al cual el perfil de voltaje es plano, y (ii) decreciendo la longitud eléctrica con el fin de mejorar la estabilidad. Las líneas cortas pueden requerir soporte para el voltaje pudiendo ser esto logrado con capacitores shunt, proveído que θ' no se hace excesivo como resultado. Por otro lado, las líneas de alrededor de 500 Km. No pueden ser cargadas por encima de P_0 debido al excesivo θ , en esos casos, la reducción de θ' es la primera prioridad.

Ejemplo Ilustrativo

Para propósitos de ilustración, se considera una línea de 500kV sin pérdidas, que posee los siguientes parámetros:

$$\beta = 0.0013 \text{ rad/Km} \quad Z_C = 250\Omega \text{ (} P_0 = 1000 \text{ MW)}$$

$$x_L = 0.325 \Omega/\text{Km} \quad b_C = 5.2\mu\text{S/Km}$$

La línea es de 600 Km. de longitud, y transfiere potencia entre dos fuentes como se muestra en la Figura 23.

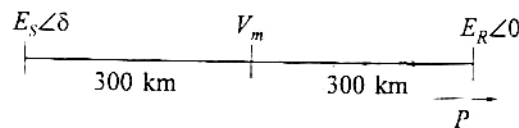


Figura 23.

Las magnitudes de las fuentes de voltaje son ajustados a 1.0 p.u. El objetivo es examinar el desempeño de la línea sin y con compensación. Se considerará compensaciones

capacitor shunt, capacitor serie elegidos para mantener 1.0 p.u como tensión en el punto intermedio, cuando la potencia transferida (P) es igual a $1.4P_0$.

(a) Con *ninguna compensación*, la relación potencia ángulo es:

$$P = \frac{E_S E_R}{Z_C \sin \theta} \sin \delta$$

Con E_S y E_R a valores nominales:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{\sin \theta} \sin \delta = \frac{1}{\sin(44.7^\circ)} \sin \delta = 1.42 \sin \delta$$

También considerando la mitad de una línea simétrica, P puede ser expresado en términos de V_m como

$$P = \frac{E_S V_m}{Z_C \sin(\theta/2)} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$
$$P = P_0 \frac{V_m}{\sin(44.7^\circ/2)} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

El valor de la tensión en el punto medio en por unidad como una función de P , queda dado por:

$$V_m = \frac{P}{P_0} \frac{0.38}{\sin(\delta/2)}$$

(b) Con *compensación uniformemente distribuida fija shunt*, para mantener V_m , a 1.0 p.u. cuando $P = 1.4P_0$, se tiene:

$$1.4P_0 = P'_0 = P'_0 \sqrt{1 - k_{sh}}$$

entonces, $k_{sh} = -0.96$. Esto de hecho, resulta en un voltaje de 1.0 p.u a través de la longitud de la línea a $P = 1.4P_0$. El correspondiente valor de Z'_C , y θ' son:

$$Z'_C = \frac{Z_C}{\sqrt{1 - k_{sh}}} = \frac{250}{\sqrt{1 + 0.96}} = 178.57 \Omega$$
$$\theta' = \theta \sqrt{(1 - k_{sh})} = 10.92 \text{ rad} = 62.57^\circ$$

La potencia transferida es dada por:

$$P = \frac{E_S E_R}{Z'_C \sin \theta'} \sin \delta$$

De aquí:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{Z_C \sin \delta}{Z'_C \sin \theta'} = 1.58 \sin \delta$$

El voltaje en el punto medio queda dado por:

$$V_m = \frac{P}{P_0} \frac{Z'_C \sin(\theta'/2)}{Z_C \sin(\delta/2)} = \frac{P}{P_0} \frac{0.371}{\sin(\delta/2)}$$

(c) Con *compensación serie fija uniformemente distribuida*, para mantener a 1.0 p.u V_m , cuando $P = 1.4P_0$, se tiene:

$$1.4P_0 = P'_0 = \frac{P_0}{\sqrt{1-k_{se}}}$$

Entonces $k_{se} = 0.49$. Los parámetros de la línea cambian a:

$$Z'_C = Z_C \sqrt{1-k_{sh}} = 250 \sqrt{1-0.49} = 178.57 \Omega$$

$$\theta' = \theta \sqrt{(1-k_{sh})} = 0.557 \text{ rad} = 31.92^\circ$$

La transferencia de potencia y el voltaje en el punto medio resultan:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{Z_C \sin \delta}{Z'_C \sin \theta'} = 2.65 \sin \delta$$

Y

$$V_m = \frac{P}{P_0} \frac{Z'_C \sin(\theta'/2)}{Z_C \sin(\delta/2)} = \frac{P}{P_0} \frac{0.1964}{\sin(\delta/2)}$$

Se considera el rendimiento del capacitor shunt y el capacitor serie en la compensación. Con compensación global, la expresión para $P - \delta$ y $V_m - P$ no pueden ser obtenidas por una simple modificación de las ecuaciones correspondientes a una línea no compensada. Entonces se debe emplear un programa de flujo de potencia para analizar el comportamiento de la línea compensada.

- (d) Con *compensación global shunt en el punto medio*, un banco de capacitores de 412 MVAR es requerido para mantener V_m a 1.0 p.u, cuando la potencia trasferida es de $P = 1.4P_0$.

Una compensación shunt distribuida de -0.96 representa un total de MVAR de 749. Esto es cerca de dos veces los MVAR nominales requeridos por la compensación global shunt. Las dos fuentes en los terminales de la línea proveen alrededor de la mitad de la potencia reactiva requerida cuando la compensación global es usada.

- (e) Cuando *compensación serie global*, es dividida en cuatro unidades (dos a los extremos y dos a la mitad de la línea), como se muestra en la Figura 24, el grado de compensación requerido k_{se} es 0.505 para mantener V_m a 1.0 p.u, cuando la potencia trasferida es de $P = 1.4P_0$.

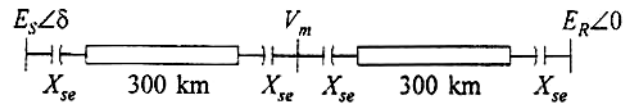
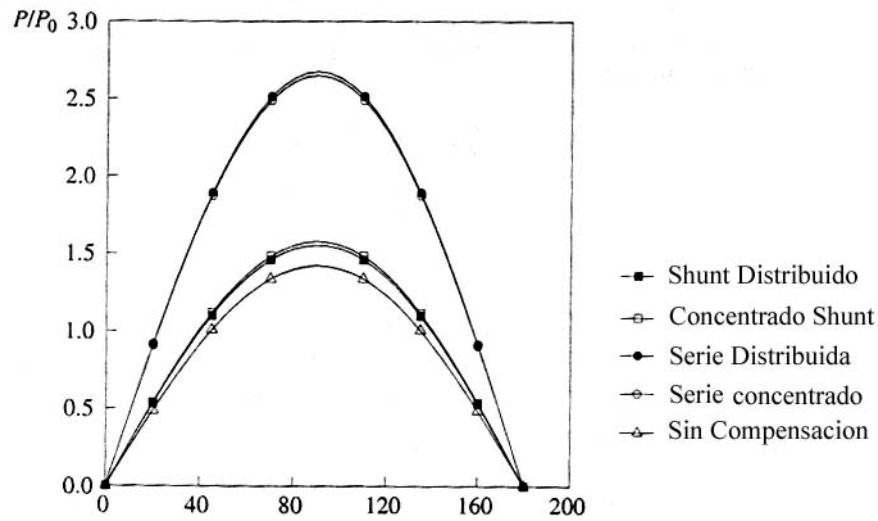
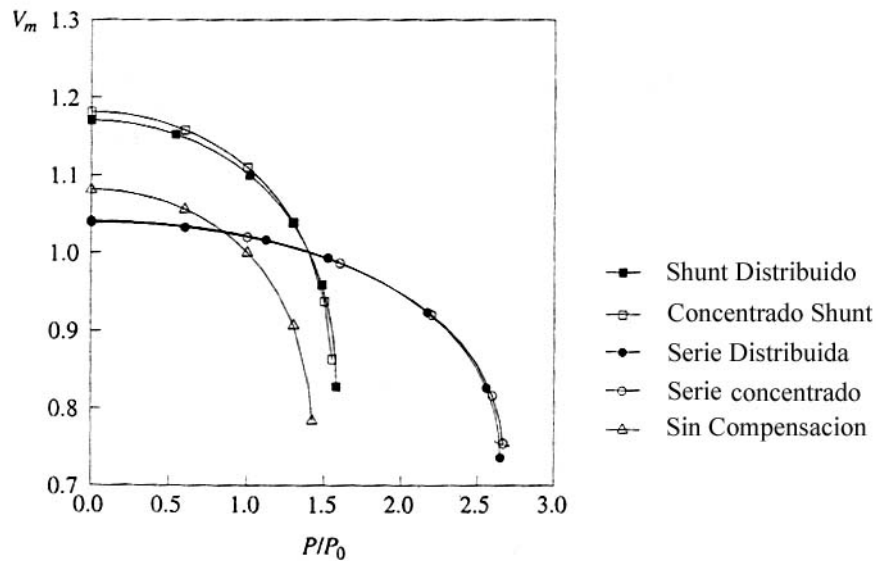


Figura 24. Compensación serie global

La figura 25(c) muestra el grafico de la potencia transferida como una función del ángulo de transmisión δ para todos los casos que se ha indicado: (a) sin compensación, (b) compensación distribuida shunt, (c) compensación serie distribuida (d) compensación shunt global (e) compensación serie global.



(a) Potencia transferida como una función del ángulo de transmisión



(b) Voltaje de punto medio como función de la potencia transferida

Figura 25. Comportamiento de línea de 600 Km. con y sin compensación

Gráficos de voltaje en el punto medio como una función de la potencia transferida para los cinco casos son mostrados en la figura 25(b). Se ha considerado aquí una línea de transmisión de 500 kV. Con la pérdidas despreciadas y la potencia expresada en por unidad de la potencia natural (P_0) el único parámetro que posee

impacto en el rendimiento de la línea es β . Es importante recordar que el parámetro β , es el mismo para líneas de todos los voltajes. De ahí, que los resultados presentados sena generalmente aplicables para una línea de 600 Km., de cualquier nivel de tensión.

Las características $P - \delta$ y $V_m - P$, con cada tipo de compensación global, para el sistema considerado, son prácticamente idénticas a las características calculadas con la compensación uniformemente distribuida.

Para los resultados presentados en la figura 25, se pueden hacer algunas observaciones generales:

1. La compensación shunt con capacitor (elegido para mantener la tensión en el punto medio a 1.0 p.u. cuando $P = 1.4P_0$) incrementa la capacidad máxima de potencia a 1.58 de la potencia natural. Esto representa un aumento de 0.16 p.u sobre el límite de 1.42 p.u. del caso de la línea no compensada. Mientras la compensación shunt ha ayudado a mantener el voltaje en el punto medio a el valor nominal cuando P es igual a 1.4 p.u, la magnitud del voltaje es muy sensitiva a las variaciones del nivel de potencia transferido. Por ejemplo, cuando la línea compensada shunt esta operando cerca de la carga efectiva natural ($1.4P_0$), un pequeño cambio en la potencia cambia significativamente la magnitud del voltaje. También se ve que, cuando esta operando a un nivel de transferencia de potencia correspondiente a V_m de 1.0 p.u, la línea compensada shunt esta mas cerca del limite de estabilidad que la línea no compensada. Entonces, la compensación shunt incrementa la carga natural efectiva a expensas del margen de estabilidad y la regulación de voltaje.
2. La compensación con capacitor serie (elegido para mantener la tensión en el punto medio a 1.0 p.u. cuando $P = 1.4P_0$) incrementa la capacidad de transferencia de máxima potencia a 2.65 p.u. Además de que casi duplica el limite de estabilidad la regulación de voltaje es significativamente mejorada, por ejemplo a $P = 1.4P_0$, una gran variación de P causará un muy pequeño cambio en V_m .

Compensación Uniformemente Distribuido Shunt Regulado

Considere una compensación shunt en la cual k_{sh} es continuamente *regulado* tal que la carga efectiva natural (P'_0) es igual a la potencia transmitida (P) todo el tiempo. Se tiene:

$$P = \frac{P_0}{\sin \theta'} \sin \delta$$

Por lo tanto, cuando una línea esta operando a la carga natural, el ángulo de transmisión es igual al ángulo de la línea. Como resultado, con una compensación shunt regulada continuamente, $\theta' = \delta$ todo el tiempo. De ahí:

$$\frac{P}{\delta} = \frac{P'_0}{\theta'} = \frac{P_0 \sqrt{1 - k_{sh}}}{\theta \sqrt{1 - k_{sh}}} = \frac{P_0}{\theta} = \text{constante}$$

Se tiene una relación lineal entre P y δ , en cambio de la relación sinusoidal con compensación fija o sin compensación. Esto significa que la estabilidad de pequeña señal (régimen permanente) con la compensación regulada es infinita. Con V_0 denota el voltaje nominal de la línea, la pendiente de la característica $P - \delta$ es dada por:

$$\frac{P_0}{\theta} = \frac{V_0^2}{Z_C \theta} = \frac{V_0^2}{X_L}$$

Esto es igual al pico de la característica sinusoidal de $P - \delta$ con compensación shunt inductiva de 100% ($k_{sh} = 100\%$).

Considere la línea de 500 kV, 600 Km., para ilustración. De la ecuación con δ y θ es expresado en radianes:

$$\frac{P/P_0}{\delta} = \frac{1}{\theta'} = \frac{1}{0.78} = 1.282 \text{ pu/rad}$$

Esto es ilustrado en la Figura 26, la cual muestra las características $P - \delta$ con compensación uniformemente distribuida y regulada y con compensación fija distribuida shunt de $k_{sh} = 1.0$.

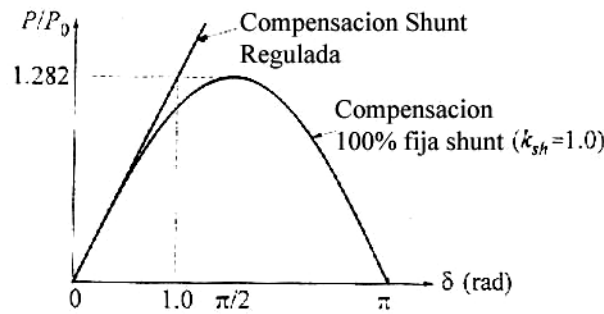


Figura 26. Característica potencia ángulo de una línea de 600 Km. Con regulación y compensación shunt inductiva

La compensación regulada efectivamente cambia k_{sh} continuamente para que $P'_0 = P$. Para cada valor de k_{sh} , hay una característica sinusoidal $P - \delta$. Como la potencia transmitida cambia, el regulador efectivamente ajusta k_{sh} tal que el punto operativo salta de una curva a otra en tal forma, el mecanismo de hacerlo es una línea recta con pendiente positiva. Para la operación satisfactoria a altos niveles de potencia transferida, el regulador debe rápidamente y continuamente prevenir el movimiento a lo largo de la curva sinusoidal, correspondiendo al valor de corriente de k_{sh} antes del movimiento a la nueva característica.

En la practica, esta forma de compensación puede ser muy cercanamente lograda por la colocación de compensadores activos, tales como condensadores sincrónicos o sistemas de VAR estáticos, a intervalos discretos a lo largo de la línea. Los compensadores pueden mantener el voltaje constante e igual a V_0 , a muchos puntos a lo largo de la línea para

todos los niveles de carga; esto es cercano a satisfacer los requerimientos de la carga natural efectiva (P'_0) sea igual al valor de real de potencia (P) a ser transmitida.

Los reguladores deben, sin embargo, poseer suficiente capacidad para satisfacer los requerimientos de potencia reactiva para mantener constante el voltaje a todos los niveles de carga. Para el caso ideal, la potencia reactiva total, suministrada o absorbida por el regular de voltaje constante es:

$$Q_V = (V^2 \omega C - I^2 \omega L)$$

$$Q_V = P_0 \theta \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \right]$$

Para P mayor a P_0 , la potencia reactiva requerida es capacitiva. La potencia reactiva se incrementa con el cuadrado de la potencia transmitida.

Desempeño satisfactorio de tal esquema depende de la posibilidad de todos los reguladores de mantener constante el voltaje a lo largo de la línea. Si un regulador falla o si esta alcanza su límite de potencia reactiva, la estabilidad de todo el sistema puede ser afectada.

El sistema de Hydro Québec en James Bay, emplea esta forma de compensación. Esta es una historia interesante para notar que el concepto de transmisión de larga distancia AC usando compensación shunt regulada, distribuida fue desarrollado por F. G. Baum al comienzo de 1921. El imagino un la línea de transmisión de 220 kV que posee su voltaje mantenido por condensadores sincrónicos a intervalos de alrededor de 100 millas. El mostró que es igual el voltaje (dentro de 3%) en todas las estaciones de compensadores, y demostró que virtualmente no hay límites en la distancia de transmisión.

Compensación regulada a intervalos discretos

Ahora se puede examinar como la compensación regulada es aplicada a intervalos discretos aproxima el desempeño de compensación uniformemente distribuida. Considere inicialmente un compensador en el punto medio como se muestra en la Figura 27, y entonces se extiende el análisis de un número arbitrario de compensadores.

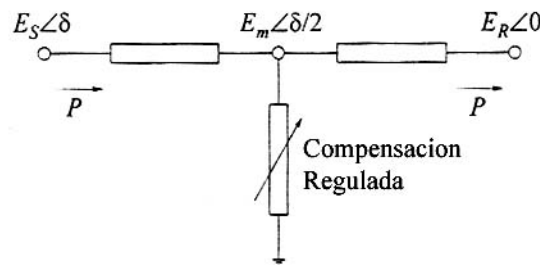


Figura 27. Línea con compensación regulada a punto medio

Compensación regulada a punto medio:

La susceptancia compensante es continuamente variada tal que E_m , es constante. Por simplicidad, se asumirá que $E_S = E_R = E_m = E$. La línea puede ser considerada que es hecha en dos *secciones independientes*, cada sección posee un ángulo de línea de $\theta/2$, donde θ es el ángulo de la línea entera. Por la aplicación de la ecuación de potencia a cada sección, la expresión de la potencia transmitida es:

$$P = \frac{E^2}{Z_c \text{sen}(\theta/2)} \text{sen}(\delta/2)$$

Si E es igual al voltaje nominal, la expresión para P puede ser expresada en términos de la potencia natural P_0 de la línea no compensada es:

$$P = \frac{P_0}{\text{sen}(\theta/2)} \text{sen}(\delta/2)$$

Para líneas no compensadas, la potencia transmitida es dada por:

$$P = \frac{P_0}{\text{sen}(\theta)} \text{sen}(\delta)$$

La relación de potencia máxima que puede ser transmitida con y sin compensación regulada en el punto medio es:

$$\frac{P'_{\max}}{P_{\max}} = \frac{\text{sen}(\theta)}{\text{sen}(\theta/2)}$$

La Tabla 2 muestra los valores de la relación anterior para diferentes longitudes de línea, (asumiendo $\beta = 0.0013 \text{ rad / Km}$).

Tabla 2.

Longitud de la línea l (Km)	Angulo de la línea θ (en grados)	$P'_{\max} / P_{\max}$
200	14.9	1.98
400	29.8	1.93
600	44.7	1.85
800	59.6	1.73
1000	74.5	1.59
1200	89.4	1.42

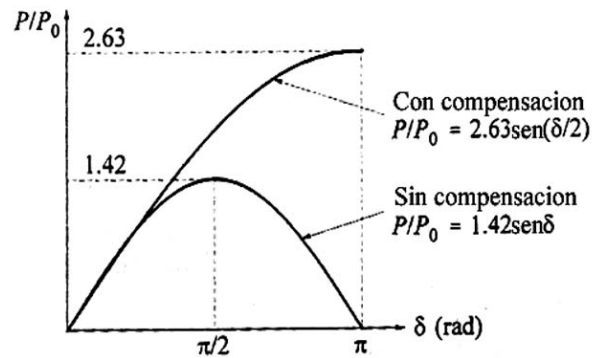


Figura 28. Relación potencia ángulo con y sin compensación regulada en el punto medio

La Figura 28 muestra las graficas de las características potencia versus ángulo con y sin compensación regulada en el punto medio para una línea de transmisión 600 Km. de longitud ($\theta = 44.7^\circ$).

Si la compensación regulada posee una ilimitada capacidad de potencia reactiva, se mantendrá el voltaje de punto medio a cualquier nivel de carga como se ve arriba. Por otro lado, si esta posee un tamaño finito, esta puede regular solo hasta su máximo de salida capacitiva. Su comportamiento más allá de ese límite depende del tipo de dispositivo.

Como un ejemplo, considere un SVS aplicado en el punto medio de la línea de 600 Km. Considerada arriba. El SVS se comporta como una compensación regulada hasta que su límite de potencia reactiva es alcanzado. Si el SVS posee una capacidad ilimitada, la característica $P - \delta$ es mostrada como la curva 1 de la Figura 29. Si el SVS posee un máximo capacitivo de 750 MVAR a tensión nominal, cuando el límite capacitivo es alcanzado el SVS se transforma en un simple capacitor. Entonces el punto A de la Figura 29 representa la transmisión desde una operación de susceptancia variable para control de voltaje a una operación B_{sh} representada por la curva 2.

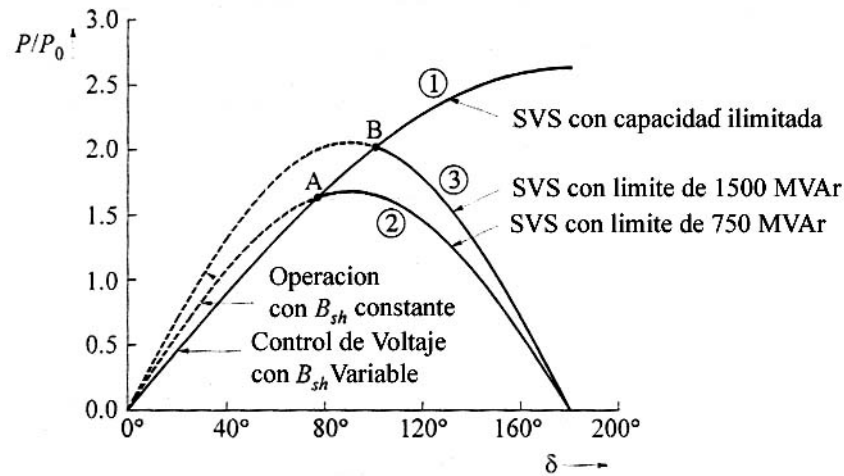


Figura 29. Comportamiento de una línea de 600 Km. Con un SVS regulando el voltaje en punto medio

Si el límite capacitivo del SVS es 1500 MVAR, la característica correspondiente a B_{sh} es representada por la curva 3. En este caso, el punto de transmisión (B) está en la parte inestable (más allá de $\delta = 90^\circ$) de la curva de potencia ángulo. La operación debe ser inestable inmediatamente siguiente a la transición desde el modo de susceptancia variable a el modo de capacitor fijo.

Con un SVS de capacidad ilimitada, la máxima potencia que puede ser transmitida es $2.63P_0$. Sin embargo, esto es logrado por el SVS supliendo un muy gran valor de potencia reactiva a altos valores de P . La Figura 30 muestra una gráfica de la potencia reactiva (Q) suplida (o absorbida) por el SVS para mantener el voltaje de punto medio a 1.0 p.u. tal que la potencia transmitida P es variada. El SVS absorbe Q cuando P es menor que $1.4P_0$. Más allá de cierto límite, no puede ser económico para proveer un SVS con la capacidad de potencia reactiva requerida, esto puede ser difícil lograr la capacidad de transmisión deseada por medios alternativos.

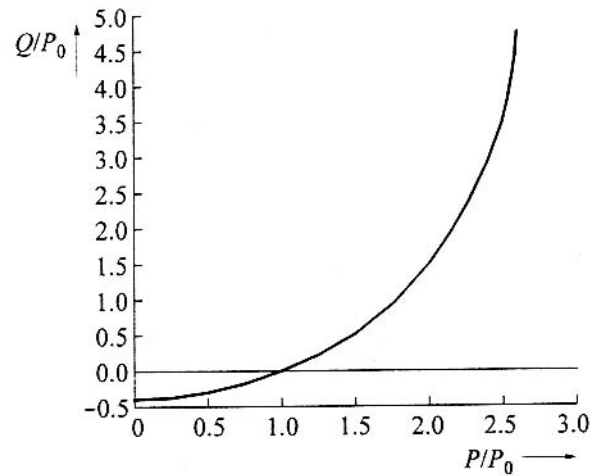


Figura 30. Potencia Reactiva suministrada por el SVS como función de la potencia transmitida

En este análisis, se ha despreciado el efecto de la característica descendente del SVS, que es, se ha asumido una pendiente de reactancia X_{SL} igual a cero. El efecto de una X_{SL} infinita es reducir el máximo de potencia y los requerimientos de potencia reactiva.

Numero arbitrario de compensadores regulados:

El caso general de $n-1$ compensadores regulados que son aplicados a la línea a intervalos regulares tal que la línea es dividida en n secciones independientes. La potencia transmitida ahora es:

$$P = \frac{P_0}{\text{sen}(\theta/n)} \text{sen}(\delta/n)$$

La relación de la máxima potencia que puede ser transmitida con y sin compensación es:

$$\frac{P'_{\max}}{P_{\max}} = \frac{\text{sen}(\theta)}{\text{sen}(\theta/n)}$$

La Tabla 3 lista la relación anterior para diferentes valores de n para una longitud de línea de 600 km (asumiendo $\beta = 0.0013 \text{ rad / Km}$).

Tabla 3.

n	θ/n (en grados)	$P'_{\max} / P_{\max}$
1	44.70	1.00
2	22.35	1.82
3	14.90	2.74
4	11.17	3.63
6	7.45	5.42
8	5.59	7.22
10	4.47	9.03

La Figura 31 muestra las graficas de $P - \delta$ para diferentes valores de n .

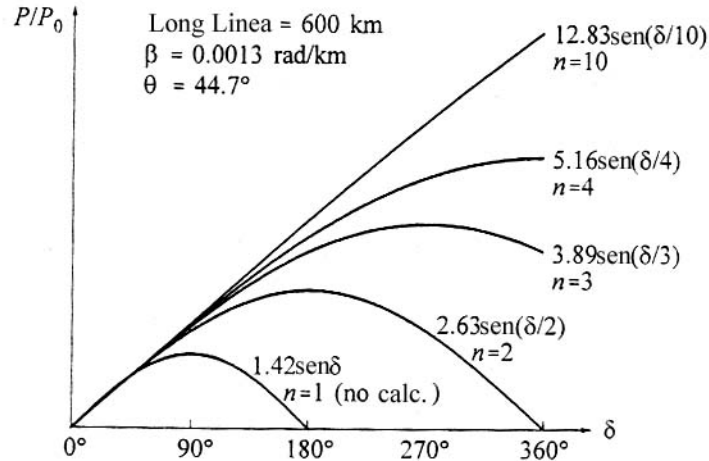


Figura 31. Relaciones potencia ángulo con compensación regulada a intervalos discretos dividiendo la línea en n secciones independientes

Resumen Comparativo de Formas Alternativas de Compensación

1. La compensación shunt con capacitores suichados generalmente provee la más económica fuente de potencia reactiva para el control de voltaje. Este es ideal para compensar líneas de transmisión si la reducción de la impedancia característica (Z'_C) mas que la reducción del ángulo efectivo de la línea es la consideración primaria. Sin embargo, el uso fuerte de compensación shunt puede llevar a una reducción de la estabilidad de pequeña señal (régimen permanente) y una pobre regulación de voltaje.
2. La compensación serie con capacitores autorregulados, por ejemplo su salida de potencia se incrementa con la carga de la línea. Estos son ideales para la aplicación donde la reducción del ángulo efectivo de la línea (θ') es la consideración primaria. Estos incrementan la carga natural efectiva también el límite de estabilidad de pequeña señal y este mejora la regulación de voltaje. Esta son normalmente usados para mejorar la estabilidad del sistema y para obtener la división de carga deseada en líneas en paralelo. La compensación de capacitores series pueden cuasar problemas de resonancia subsinronica requiriendo de medidas especiales para su solución. Además, la protección de líneas de transmisión con capacitores series requieren atención especial.
3. Una combinación de capacitores series y shunt puede proveer una forma ideal de compensación en algunos casos. Esto permite control independiente de la impedancia característica y del ángulo de carga δ . Un ejemplo de tal aplicación, es una línea larga requiriendo compensación la cual, además incrementa el SIL

- efectivo, causa un ángulo de fase a través de la línea para tomar un valor deseado tal que no es adversamente afectado el efecto de carga repartida en líneas paralelas.
4. Un sistema de VAR estáticos es idealmente para aplicaciones que requieren un control directo y rápido de voltaje. Estos poseen una ventaja distinta sobre los capacitores series donde la compensación es requerida para prevenir los *sag* de voltaje en una barra que involucra múltiples líneas, el costo total de la compensación shunt regulada puede ser substancialmente menor que para la compensación serie de cada línea. Cuando un SVS es usado para permitir una alta transferencia de potencia sobre grandes distancias, la posibilidad de inestabilidad cuando es SVS es llevado a sus límites debe ser reconocida. Cuando operan a su límite capacitivo, el SVS se hace un simple capacitor; este no ofrece control de voltaje y su potencia reactiva cae con el cuadrado del voltaje. Sistemas altamente dependientes en la compensación shunt pueden experimentar un colapso instantáneo cuando la carga se excede de los niveles para el cual el SVS es dimensionado. La capacidad nominal del SVS debe ser basada en muy cuidadosos estudios los cuales definen su capacidad total de MVAR y el suicheo y porciones dinámicamente controladas. Un SVS posee una capacidad limitada de sobrecarga y más altas pérdidas que la compensación serie.

Modelación de Dispositivos de Compensación Reactiva

En los estudios de estabilidad y flujo de carga los dispositivos de compensación pasiva (capacitores shunt, reactores shunt, y capacitores series) son modelados como elementos de admitancias de valor fijo. Ellos son incluidos en la matriz admitancia de la red, a lo largo con la otra red de transmisión de elementos pasivos.

Los condensadores sincrónicos son modelados como los generadores sincrónicos pero sin potencia activa de régimen permanente de salida. Excepto por el hecho de que estos no poseen un primotor, la representación de un condensador sincrónico y el sistema de excitación asociado es similar a los de un generador sincrónico.

Sin embargo, modelos especiales son requeridos para representar los compensadores estáticos de VAR.

Modelación de un Sistema de VAR Estáticos

La Figura 11.63 muestra un diagrama esquemático de un típico SVS. Este consiste de un TCR y un capacitor conmutado (mecánico o tiristores), y posee las características de régimen permanente mostrada en la Figura 33. Las características y modelación de SVS con diferentes configuraciones compensando otros tipos de SVC son conceptualmente los mismos.

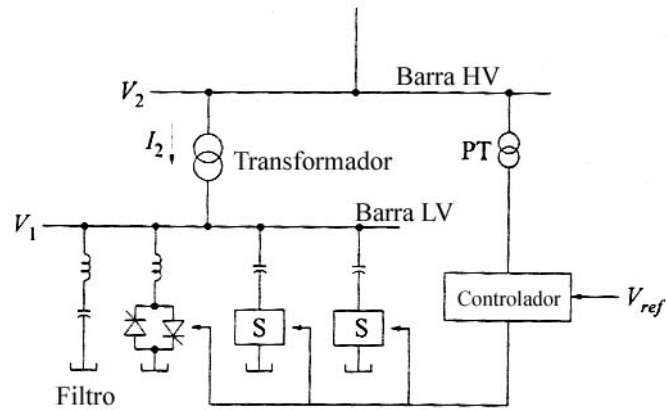


Figura 32. Esquema de un SVS típico

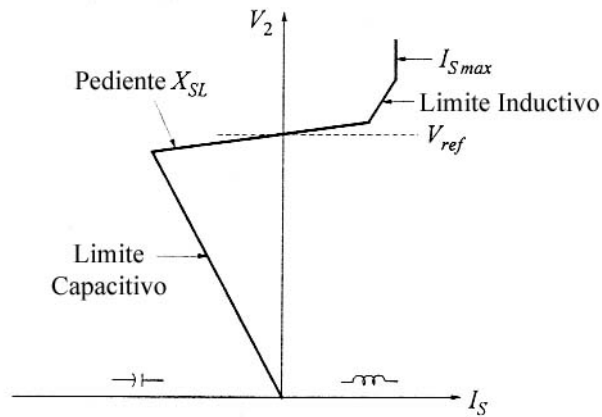


Figura 33. Características V/I de régimen permanente

Representaciones de SVS en estudios de Flujo de Carga:

De la Figura 33. se puede ver que el SVS posee tres posibles modos de operación. El correspondiente a circuitos equivalentes del SVS son vistos desde la barra HV son mostrada en la Figura 34.

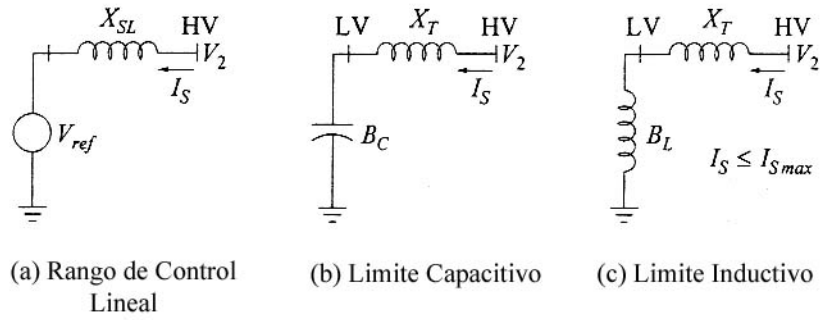


Figura 34. Circuito equivalente de un SVS en régimen permanente

El modo normal de operación está en el rango de control lineal. En este modo, el SVS como es visto desde la barra de alta tensión es equivalente a una fuente de voltaje V_{ref} en serie con la reactancia de pendiente X_{SL} . Cuando la operación del SVS alcanza el límite capacitivo, este se hace una susceptancia (B_C) conectada en la barra de baja tensión. La reactancia entre la barra de baja y alta tensión es la reactancia del transformador X_T . Similarmente, cuando la operación del SVS llega al límite inductivo, este se hace una susceptancia (B_L) cuyo valor neto es inductivo. El máximo valor de la corriente del SVS está limitada por I_{Smax} .

Para el análisis de flujo de carga, la configuración de la red es mostrada en la Figura 35 puede ser usada para representar el SVS. La reactancia del transformador X_T es dividida en X_{SL} y $X_T - X_{SL}$, creando una barra fantasma (M). Esto permite la apropiada representación del SVS mientras la operación es en el modo lineal, incluyendo el efecto de la reactancia de pendiente. En este modo, el SVS es representado como una barra PV (con $P = 0$) remotamente controlada por el voltaje de la barra M igual a V_{ref} .

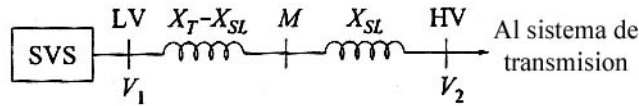


Figura 35. Representación de un SVS para estudios de flujo de carga

Cuando alguno de los límites de reactivos es alcanzado, el SVS se transforma en una simple susceptancia de valor fijo conectada a la barra de bajo voltaje, el voltaje de la barra M no es controlado. La corriente del SVS es limitada por I_{Smax} .

La representación anterior toma en consideración el desempeño del SVS en sus tres modos. Además, este mantiene la identidad de la barra de baja tensión en la cual el SVS es conectado.

Representación en Estudios de Estabilidad:

Los sistemas de VAR estáticos son usualmente configurados para encontrarse requerimientos individuales del sistema. Las técnicas de control varían dependiendo de los fabricantes y la antigüedad de los equipos. Por todo esto, modelos para estabilidad estándar capaces de representar en detalle el amplio rango de SVS en uso no ha sido desarrollado. Sin embargo, modelos básicos apropiados para estudios de propósito general han sido recomendados por CIGRE. Un nuevo conjunto de modelos básicos que cubre los recientes desarrollos han sido preparados por el IEEE. Tales modelos son adecuados para estudios de propósito general en los cuales las especiales características específicas para instalaciones individuales no afectan el análisis de estabilidad. Estos modelos pueden también ser usados para estudios preliminares que involucran nuevas instalaciones. Para detallados estudios, sin embargo, modelos mas precisos que reflejan los controles reales pueden ser necesarios.

Aquí se describirá la aproximación general para un modelo de SVS del tipo mostrado en la Figura 32. Un diagrama de bloque funcional representa el SVS es el mostrado en la Figura 36. El modelo de estabilidad puede ser desarrollado por la identificación de modelo matemático de cada diagrama funcional.

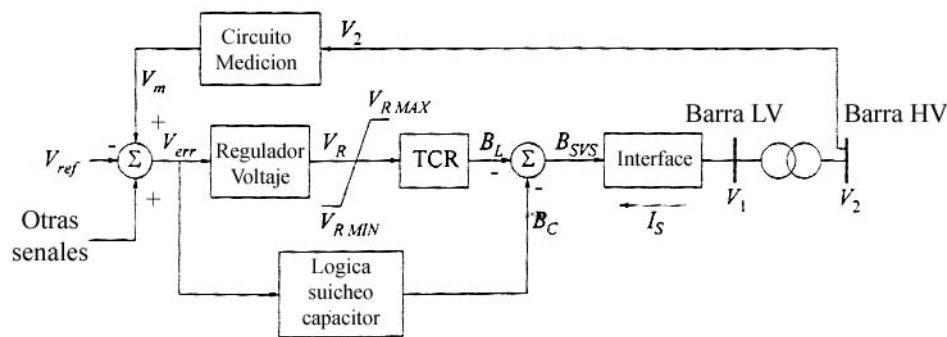


Figura 36. Diagrama Funcional del SVS

El bloque del *reactor controlado por tiristor* (TCR) representa las variaciones de la susceptancia de reactor como una función del ángulo de disparo, el circuito de disparo de tiristor, los circuitos linealizantes usados para compensar la relación no lineal entre la susceptancia B_L y el ángulo de conducción σ . La figura 37 muestra un modelo del bloque TCR con los parámetros expresados en por unidad usando como bases la potencia MVA nominal (Q_{TCR}) y la tensión nominal del TCR. El ángulo de conducción σ esta en por unidad en la base de 180 grados.

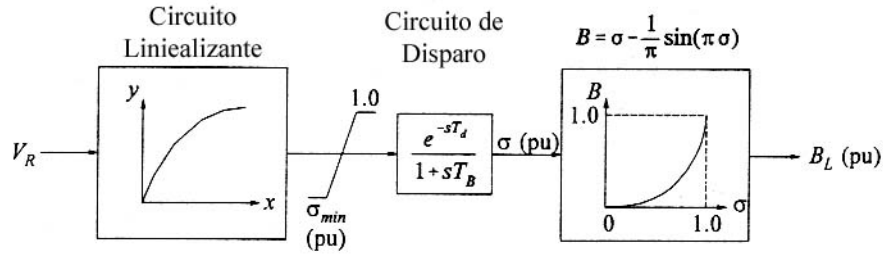


Figura 37. Modelo del Bloque TCR

Los límites mostrados en el bloque del circuito de disparo representa el límite en el ángulo de conducción, el que a su turno determina los valores limitantes de B_L . En por unidad, el máximo valor de B_L es 1.0 p.u.. Típicamente, el mínimo valor de B_L para un TCR es 0.02 p.u.; esto puede ser asumido que es cero. El parámetro T_d es el retardo de transporte de puerta; este posee un valor de alrededor de 1mseg y es normalmente despreciado, haciendo $e^{-sT_d} \approx 1.0$. La constante de tiempo T_B asociada con el control de secuencia de disparo del tiristor posee un valor de alrededor de 5mseg, este puede ser despreciado en la mayoría de los estudios.

Si la relación no lineal entre σ y B_L es asumida que es perfectamente compensada T_d y T_B son despreciado, el bloque del TCR puede ser representado por una ganancia unitaria con límites como se muestra en la Figura 38.

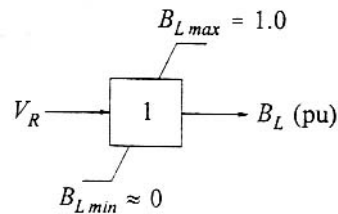


Figura 38. Bloque del Modelo de un TCR simplificado.

La estructura de el bloque del *regulador de voltaje* en la Figura 36 es muy dependiente de la aplicación particular como este provee u medio de optimizar el comportamiento dinámico del SVS. La Figura 39 muestra los modelos de dos comúnmente usadas formas de reguladores.

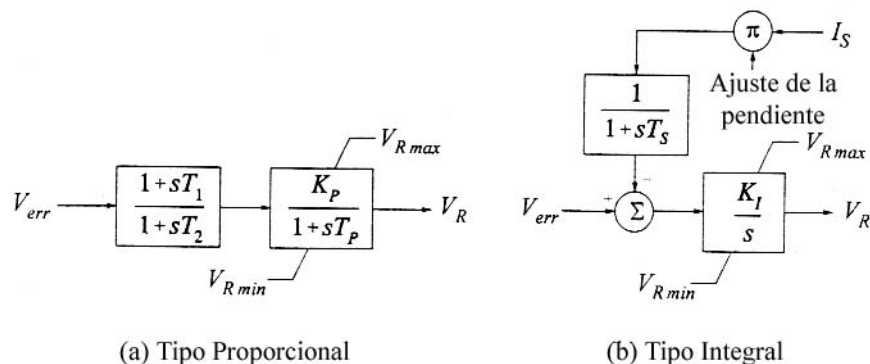


Figura 39. Modelos de reguladores de voltajes.

Con el tipo regulador proporcional mostrado en la Figura 39(a), la ganancia K_p es el recíproco de la característica descendente, por ejemplo la reactancia de pendiente X_{SL} . La constante de tiempo T_p está usualmente en el rango de 50 mseg a 100 mseg. La Figura 39(b) muestra un regulador tipo integral. La característica descendente es obtenida a través de la realimentación de la corriente del SVS, Los límites asociados con ambas formas de reguladores son del tipo sin ventana.

El bloque del *circuito de medición* en la Figura 36 incluye los transformadores de medición, los convertidores A/D, y rectificadores. Estos contienen un retardo de transporte y constantes de tiempo las cuales son muy pequeñas. Consecuentemente, el circuito de medición puede ser representado por una simple constante de tiempo en el orden de 5 mseg o como una ganancia constante.

La *lógica de suicheo de capacitores* puede ser representado por una secuencia de suicheo dependiendo del medio de suicheo, por ejemplo suiches mecánicos o por tiristores. La inteligencia usada para el suicheo depende de los requerimientos de la aplicación particular.

La Figura 40 muestra un modelo conveniente para representar un capacitor suichado por tiristores (TSC) con parámetros expresados en por unidad sobre las bases de la potencia MVA nominal (Q_{TSC}) y la tensión nominal del TSC. En el modelo T_C es la constante de tiempo asociado con la secuencia de control de tiristor.

En el modelo mostrado, N_T es el número total de unidades de bancos de capacitores suichados (asumidos que deben ser de igual tamaño), N_C es el número de unidades suichados en algún tiempo dado, y T_C es la constante de tiempo asociado con el control de secuencia de disparo de tiristor. La señal de control V_C intenta mantener V_2 dentro de una delgada banda, con la acción de control coordinada con ese del TCR.

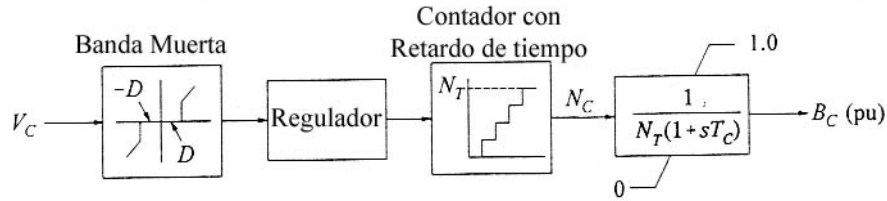


Figura 40. Modelo de TSC

La Figura 41 muestra la representación por unidad de un sistema combinado de TCR y TSC. El TCR y TSC son cada uno modelados usando el sistema por unidad con sus respectivas bases en los MVA nominales de cada uno. Las susceptancias B_L y B_C son convertidos al sistema por unidad común (usualmente con 1000 MVA de base) usado para modelar el sistema de potencia entero. En la Figura 41, la susceptancia neta B_{SVS} y corriente total del SVS son expresadas en el sistema por unidad común. La susceptancia neta B_{SVS} es inductiva si es positiva, y es capacitiva si es negativa. La corriente en el SVS representado por I_{SVS} es positiva cuando es inductiva (convención de carga). Esto es consistente con la convención comúnmente usada para la representación de la característica V/I del SVS (Figura 36).

Para la mayoría de los estudios, no es necesario representar un TSC explícitamente como se muestra en la Figura 41. La respuesta del TSC puede ser asumida que es instantánea y el SVS es representado o un TCR y un FC con la capacidad de MVAR apropiadamente seleccionada.

Con un capacitor fijo sin lógica de suicheo, la susceptancia B_C posee un valor fijo. La Figura 42 muestra un modelo simplificado de un SVS consistente de un TCR y un capacitor fijo. El TCR es asumido que posee un regulador de tipo proporcional. Los parámetros están en por unidad con los valores bases en los valores nominales del TCR.

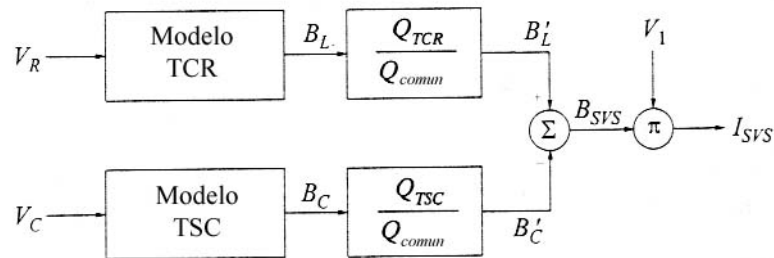


Figura 41. Representación combinado de un TCR y un TSC

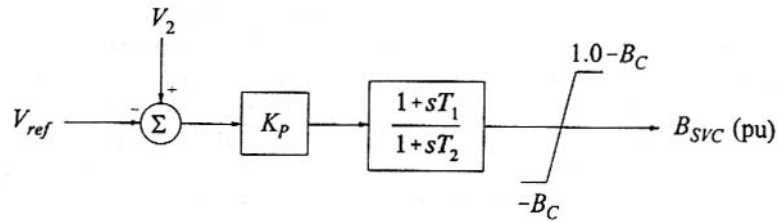


Figura 42. Modelo simplificado de un SVC comprendido de un TCR y un FC.

Además de la realimentación del voltaje de la barra de alta tensión al control del SVS, señales adicionales pueden ser usadas para realzar la estabilidad del sistema.

Aplicación de Transformadores con Cambiador de tomas en Sistemas de Transmisión

Los transformadores con la facilidad de cambiadores de tomas constituyen un medio importante de controlar el voltaje a través del sistema a todos los niveles de voltaje.

Los autotransformadores son usados para cambiar el voltaje en una subestación desde un subsistema a otros (por ejemplo de 500 kV a 230 kV) son frecuentemente son equipados con cambiadores de toma bajo carga (ULTC *Under-load tap-changing*). Estos pueden ser controlados ya se en forma automática o manual. Usualmente hay mucho de tales transformadores a través del sistema interconectando sistemas de transmisión de diferentes niveles. Las tomas de esos transformadores proveen un medio conveniente de controlar el flujo de potencia reactiva entre los subsistemas. Estos pueden ser ajustados para controlar el perfil de voltajes, y minimizar las pérdidas de potencia activa y reactiva.

El control de un solo transformador pueden cambiar el voltaje en sus terminales. Además. Este influencia el flujo de potencia reactiva a través del transformador. El efecto resultante en los voltajes en las otras barras dependerá de la configuración de la red y la distribución de la generación/carga. El control coordinado de los cambiadores de tomas de todos los transformadores interconectando los subsistemas es requerido si el nivel general de voltaje es para ser cambiado.

Durante condiciones de lata carga del sistema, os voltajes de la red son mantenidos a los niveles mas altos prácticos para minimizar los requerimientos de la potencia reactiva e incrementar la efectividad de los capacitores shunt y la carga de las líneas. El mas alto nivel de voltaje operativo permitido de un equipo no debe ser excedido, tomando en consideración las posibles operación de maniobra y condiciones de salida de servicio. Durante baja carga, es usualmente requerido un mas bajo voltaje de red para reducir la carga de las líneas y prevenir una operación subexcitada de los generadores.

Los transformadores con dispositivos de cambiador de tomas sin carga, pueden también ayudar a mantener un satisfactorio perfil de voltajes. Mientras que los transformadores

con ULTC pueden ser usados para tomar en cuenta las variaciones del sistema diario, horaria, minuto a minuto, el ajuste de los transformadores con cambiadores de toma sin carga deben ser cuidadosamente elegido dependiendo de las variaciones de largo termino debido a las expansiones del sistema, crecimiento de la carga, cambios estacionales. Un análisis de flujo de carga optimo provee un conveniente método de determinar el ajuste apropiado de las tomas con cualquier tipo de cambiador de tomas.

Las prácticas de las empresas eléctricas con respecto a la aplicación de los transformadores con ULTC para sistemas de transmisión varían ampliamente. Por ejemplo, la practica de Ontario Hydro's es proveer la facilidad de ULTC en la mayoría de los autotransformadores 500/230kV, y en todas las transformadores del área de suministro disminuyendo de 230 kV a 115kV a 44 kV, 27.6 kV o 13.8 kV. Todos los autotransformadores 230/115 kV y transformadores elevadores de generadores son proveídos con dispositivos de cambiador de tomas sin carga. La Figura 43 muestra un arreglo general.

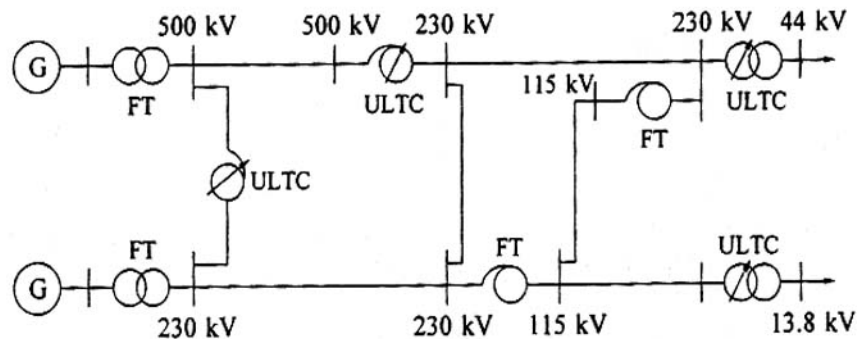


Figura 43. Diagrama unificar de una red de transmisión con dispositivos de cambiador de tomas.

Como un ejemplo adicional, la práctica en el Reino Unido es proveer ULTC en todos los transformadores elevadores en generadores y en autotransformadores a 400 kV y 275 kV en la red supermallada a 132 y 66 kV de la red secundaria. Los autotransformadores conectados a 400 kV y 275 kV poseen relaciones fijas.

Muchas empresas eléctricas, por otra parte, no proveen ULTC para los transformadores de la red de transmisión.

Regulación de Voltaje en Sistemas de Distribución

La regulación automática de voltaje de sistemas de distribución están proveídos por el uso de uno o mas de los siguientes métodos:

- Regulación de Barras en la subestación.
- Regulación de alimentadores individuales en la subestación.

- Regulación suplementaria a lo largo de los alimentadores.

Regulación de Barras de Subestación

Un transformador de subestación de distribución esta usualmente equipado con un equipo de ULTC que automáticamente controla el voltaje secundario. Alternativamente, la subestación puede tener un regulador de voltaje separado que regula el voltaje de la barra secundaria.

La regulación de barra emplea generalmente unidades trifásicas, aunque de reguladores monofásicos pueden ser usados in aplicaciones donde los voltajes de fase poseen un significativo desbalance.

Regulación de Alimentadores

Los reguladores de voltaje de alimentadores controlan el voltaje de cada alimentador. Entre unidades monofásicas o trifásicas pueden ser usadas, para formar una común. Los reguladores monofásicos son necesarios cuando las fases en forma individual sirven diversas formas de cargas. Los reguladores trifásicos pueden proveer la misma alta calidad de desempeño que los reguladores monofásicos, cuando las fases son similarmente cargadas, y cuando el voltaje de alimentación es balanceado.

Si hay algunos alimentadores alimentados por una subestación, los alimentadores con similares características pueden ser agrupados y un regulador común puede ser usado para el control del voltaje del grupo de alimentadores.

En aplicaciones donde los alimentadores son muy largos, reguladores adicionales y capacitores shunt localizados en puntos seleccionados en el alimentador proveen regulación suplementaria.

Los reguladores de alimentadores son también algunas veces referidos como transformadores *booster*. Un transformador convencional con ULTC logra dos funciones: transformación de voltaje y control de voltaje. Los reguladores de voltaje de alimentadores solo logran la última función, que es la variación del voltaje sin cambiar el nivel de voltaje básico.