

### OPERACIÓN DEL CEV EN ESTADO ESTACIONARIO

Los compensadores estáticos de VAR's son dispositivos estáticos conectados en derivación que pueden proporcionar y/o absorber potencia reactiva, cuyas salidas son variadas para poder así controlar parámetros específicos de los SEP's. El término "estático" es usado para indicar que el CEV, a diferencia del compensador síncrono, no tiene componentes rotatorios o que se muevan. Por lo que un CEV consiste de un generador estático de VAR's (SVG por sus siglas en inglés) o de dispositivos que absorben y un dispositivo de control apropiado. Un sistema estático de VAR's (SVS por sus siglas en inglés) es una agregación de un compensador estático de VAR's (CEV's) y capacitores con interruptor mecánico (MSC's) o reactores (MSR's) cuyas salidas están coordinadas [5].

#### *4.1 Tipos de CEV's*

Se enlistan los tipos básicos de elementos de control de potencia reactiva que constituyen una parte o todo el sistema estático de VAR's:

1. Reactor saturado (SR)
2. Reactor controlado con tiristores (TCR)
3. Capacitor conmutado con tiristores (TSC)
4. Reactor conmutado con tiristores (TSR)
5. Transformador controlado con tiristores (TCT)
6. Convertidor conmutado a sí mismo o a una línea (SCC/LCC)

Un número de diferentes configuraciones SVS son hechos de la combinación de uno o más tipos básicos de CEV's y bancos de capacitores fijos y han sido usados en la práctica para la compensación de sistemas de transmisión.

Los SVS's son capaces de controlar los voltajes individuales de fase de los buses a los cuales están conectados. Además de que pueden ser usados para el control de secuencia negativa así como para desviaciones de voltaje de secuencia positiva.

#### 4.1.1 Frecuencia fundamental de un sistema estático de VAR's

### CARACTERÍSTICA DE UN SISTEMA ESTÁTICO DE VAR'S (SVS) IDEAL

Desde el punto de vista de operación de un sistema de potencia, un SVS es equivalente a un capacitor en derivación y a un inductor en derivación, los cuales se pueden ajustar para controlar el voltaje y la potencia reactiva en sus terminales (o a un bus cercano) de una manera prescrita, ver Figura 4.1 [5].

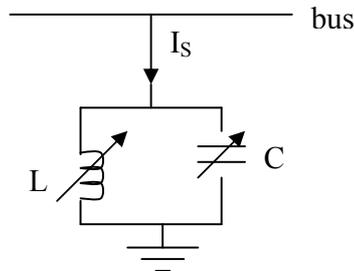


Fig. 4.1 Sistema Estático de VAR's ideal

Idealmente, un SVS podría mantener constante el valor del voltaje (asumiendo que este es su objetivo), posee una capacidad ilimitada de generación/absorción de VAR's sin pérdidas de potencia activa y reactiva y proporciona una respuesta instantánea. El funcionamiento de un SVS puede ser visualizado en un gráfico de control de voltaje de AC de un bus (V) respecto a la corriente reactiva del SVS ( $I_s$ ). La característica V/I de un SVS ideal se muestra en la Figura 4.2, donde se representa su característica en estado estable y en estado casi-estable.

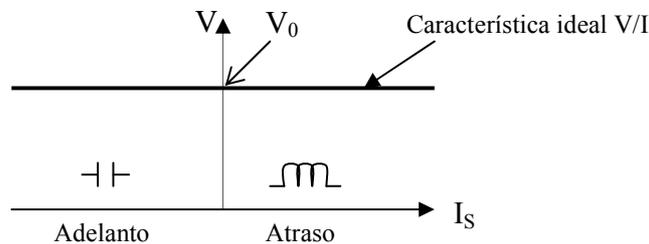
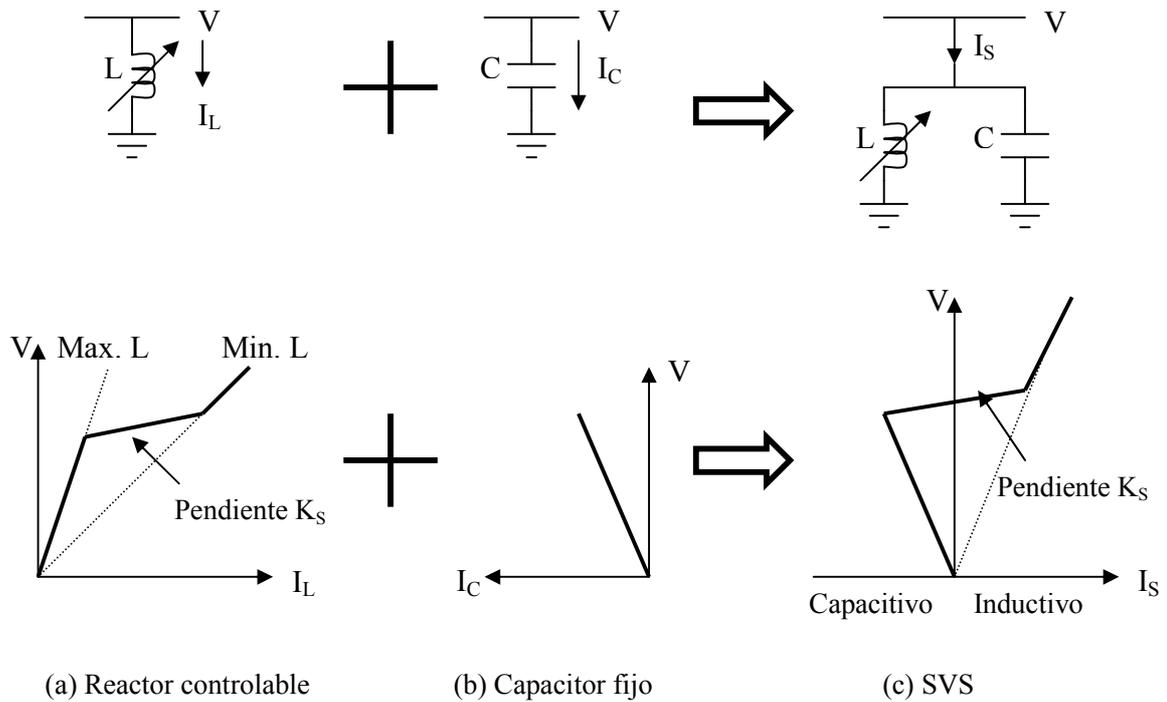


Fig. 4.2 Característica V/I de un compensador ideal

## CARACTERÍSTICA DE UN SVS REAL

Si se considera un SVS compuesto de un reactor controlable y un capacitor fijo las características resultantes son suficientemente generales y aplicables a un amplio rango de configuraciones SVS prácticos. La Figura 4.3 ilustra la derivación de la característica de un reactor práctico controlable.



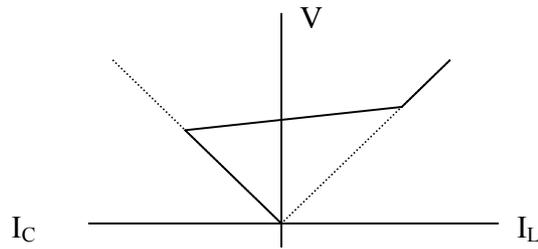
*Fig. 4.3 Características compuestas de un SVS*

### **4.1.2 Interacción del CEV con el sistema eléctrico**

Para examinar el funcionamiento del CEV cuando es aplicado a un sistema de potencia, se necesitan examinar juntos a la característica del CEV y la del sistema de potencia [3] y [5]. La característica  $V/I$  del sistema puede ser determinado considerando el circuito equivalente de Thévenin visto desde el bus en el que está siendo regulado por el CEV.

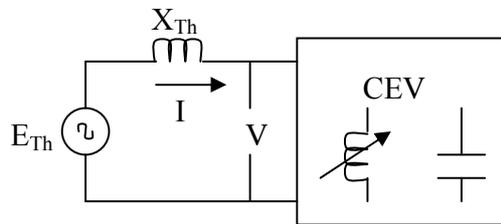
La parte controlable del CEV es una característica plana, sin embargo, es deseable que esta característica tenga una cierta pendiente como se muestra en la Figura 4.4.

La pendiente de la Figura 4.4 se logra con la retroalimentación de la corriente en el circuito de control de lazo cerrado del CEV.



**Fig. 4.4** Característica V-I con pendiente  $> 0$  para CEV tipo TCR / TSC

En la Figura 4.5 se muestra un CEV conectado a un Sistema Eléctrico que ha sido representado por su equivalente de Thévenin, cuya impedancia se ha considerado como una reactancia para simplificar el análisis.

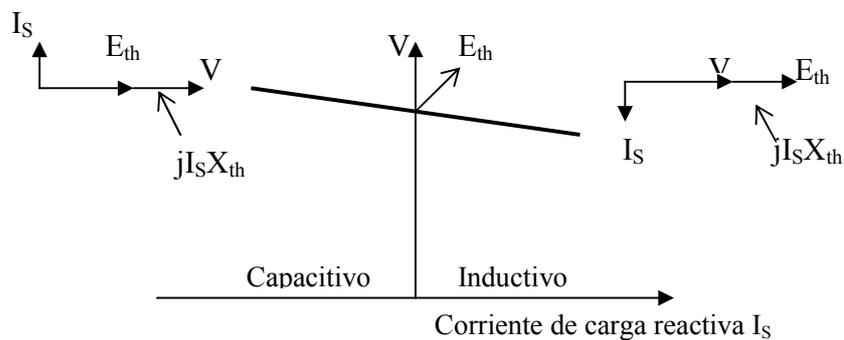


**Fig. 4.5** Diagrama mostrando la interacción CEV-SEP

De la Figura 4.5:

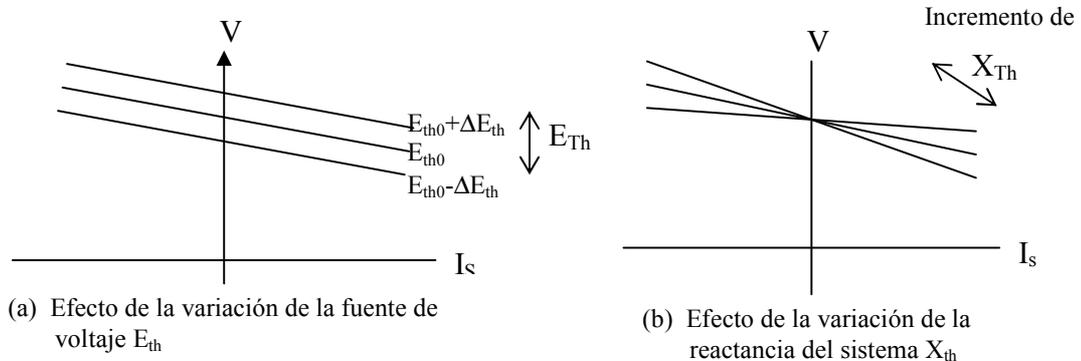
$$V = -X_{Th}I + E_{Th} \tag{4.1}$$

La ecuación (4.1) puede graficarse como se muestra en la Figura 4.6. El voltaje V incrementa linealmente con la corriente de carga capacitiva y decrece linealmente con la corriente de carga inductiva.



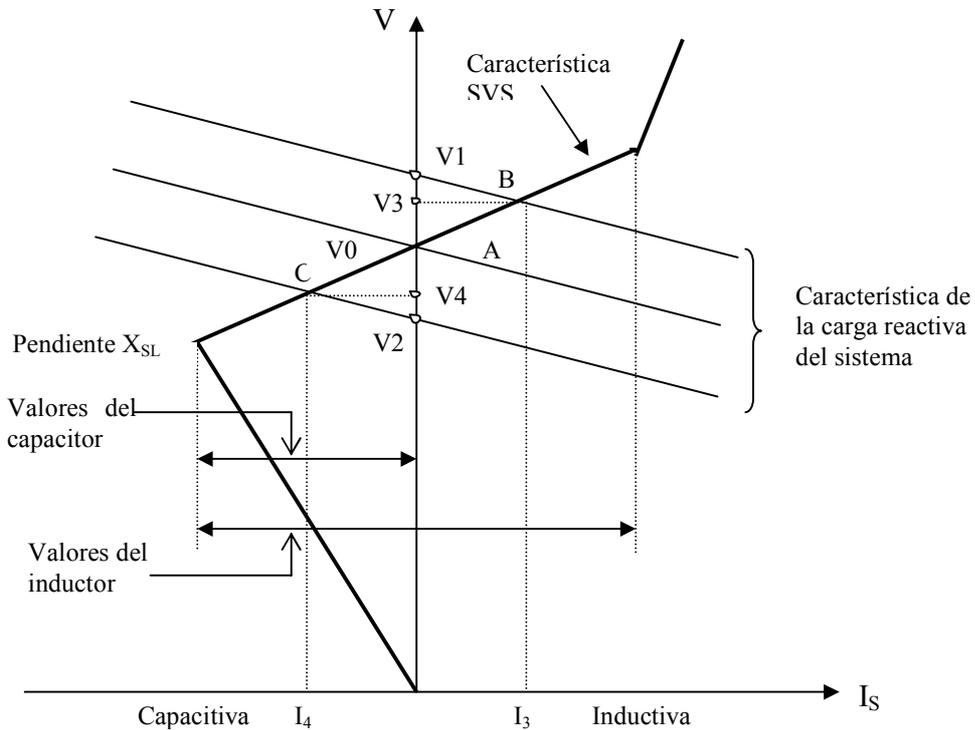
**Fig. 4.6** Característica del SEP para cambios de corrientes nodales. Característica de Voltaje-Corriente reactiva

En la Figura 4.7 se muestra como se afecta esta característica  $V/I$  por los cambios en el voltaje de la fuente  $E_{th}$  y en la reactancia equivalente del sistema  $X_{th}$  respectivamente.



**Fig. 4.7** Voltaje del Sistema de potencia respecto a la característica de la corriente reactiva  
 a) Variación de las características del SEP por condiciones de operación  
 b) Características de SEP para distintos niveles de falla

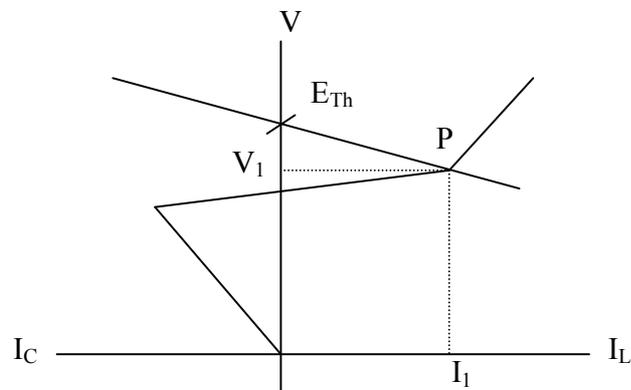
El valor de  $X_{Th}$  depende del valor de corto circuito trifásico en el nodo del CEV y  $E_{Th}$  es el voltaje que existiría sin el CEV en el nodo debido a las condiciones de operación del sistema.



**Fig. 4.8** Solución gráfica del punto de operación de CEV para una condición dada del sistema

La solución del CEV y las ecuaciones características del sistema de potencia se pueden graficar como se muestra en la Figura 4.8. Las tres características del sistema son consideradas en la figura, correspondientes a los tres valores del voltaje de la fuente. La característica de en medio representa las condiciones nominales del sistema, y se asume que interseca la característica del CEV en el punto  $A$  donde  $V = V_0$  e  $I_S = 0$ .

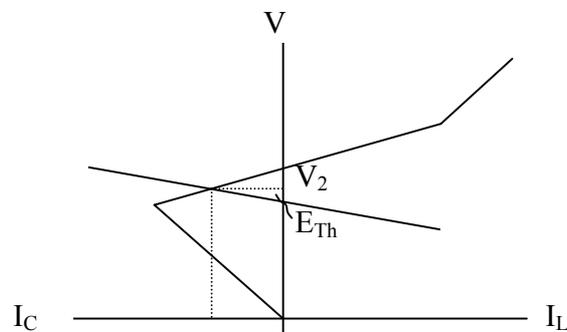
Si el voltaje del sistema incrementa  $\Delta E_{th}$  (por ejemplo, debido al incremento en el nivel de carga del sistema),  $V$  incrementará a  $V_1$ , sin un CEV. Con el CEV, sin embargo, el punto de operación se mueve hacia  $B$ ; por la absorción de la corriente inductiva  $I_3$ , el CEV mantiene el voltaje en  $V_3$ . De manera similar, si la fuente de voltaje decreciente (debido al incremento en el nivel de carga del sistema), el CEV mantiene el voltaje en  $V_4$ , en lugar de  $V_2$  sin el CEV. Si la pendiente  $K_S$  de la característica CEV fuera cero, el voltaje podría haberse mantenido en  $V_0$  para ambos casos considerados.



**Fig. 4.9 Interacción V-I en régimen permanente de CEV-SEP. Carga Baja**

En la Figura 4.9 se muestra el punto de operación P del CEV, el cual tiene una corriente inductiva  $I$ .  $E_{Th}$  sería el voltaje sin el CEV y  $V_1$  es el voltaje corregido por la acción del CEV.

En la Figura 4.10 se muestra la acción de la parte capacitiva del CEV para corregir un voltaje bajo.



**Fig. 4.10 Interacción V-I en régimen permanente de CEV-SEP. Carga Alta**

### 4.1.3 Efecto del uso de capacitores conmutados

En el ejemplo considerado en la Figura 4.8, el rango de control del CEV se podría exceder para grandes variaciones en las condiciones del sistema. El uso de los bancos de capacitores conmutados podría extender el rango de control continuo del CEV. Esto se ilustra en la Figura 4.11, en donde se consideran tres bancos de capacitores, dos de los cuales son conmutables.

Tanto los tiristores o interruptores mecánicos podrían ser utilizados para la conmutación de capacitores que puede hacerse de manera automática o por medio de controles locales de sensibilidad de voltaje. En la figura, el capacitor sin interruptor incluye un reactor para la filtración de armónicas.

Podemos ver que un CEV no es una fuente de voltaje como lo es un condensador síncrono. En cambio, este altera el voltaje del sistema en el punto de conexión por la variación de la corriente reactiva absorbida o suministrada al sistema. En efecto, el CEV actúa como una carga reactiva variable la cual es ajustada para mantener constante lo mayor posible al voltaje AC [5].

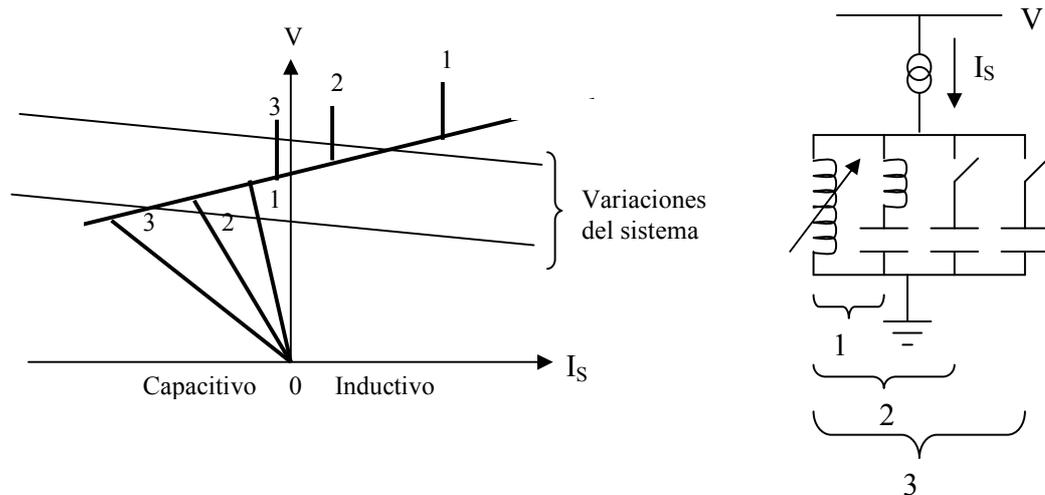
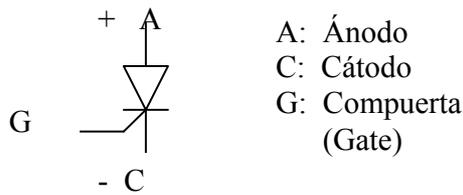


Fig. 4.11 Uso de capacitores conmutados para ampliar el rango de control continuo

En general, los elementos de un CEV operan en un principio para ajustar la susceptancia. La susceptancia controlada se obtiene tanto del reactor como del capacitor.

### VÁLVULA DE TIRISTORES

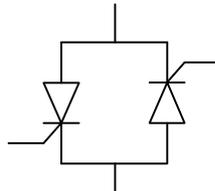
Una válvula de tiristores está formada por elementos semiconductores SCR (Silicon Controlled Rectifier) en conexión antiparalelo. Figura 4.12.



**Fig. 4.12** Circuito de un tiristor

El tiristor se vuelve conductor aplicándole una diferencia de voltaje positiva ante A y C y una señal de voltaje en G. Se distingue del diodo por la compuerta. Una vez que el tiristor empieza a conducir, el retiro del voltaje de la terminal G, no cambia su estado de conducción de éste, y la corriente que circula por él solo se interrumpirá por otras causas, como puede ser un cruce por cero, si se trata de corriente alterna.

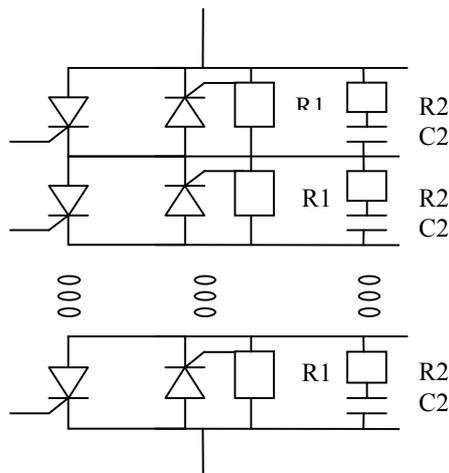
Si se quiere tener conducción en ambas polaridades de una señal de corriente alterna, es necesario usar la conexión antiparalelo.



**Fig. 4.13** Conexión antiparalelo de dos tiristores

Con esta conexión se puede tener conducción de corriente en las dos polaridades con el encendido alternado de los tiristores.

En la figura 4.13 se muestra una válvula de tiristores en su forma más simple; en la realidad, una válvula está formada por una cadena de estas válvulas simples, con el fin de soportar el voltaje que se aplica en sus terminales. En la Figura 4.14 se muestra una válvula con estas características, se le ha agregado una cadena de resistores R1 para tener una distribución uniforme del voltaje aplicado en cada tiristor.



**Fig. 4.14** Válvula real de tiristores

#### 4.1.4 LOS SISTEMAS ESTÁTICOS DE VAR'S PRÁCTICOS

Un esquema del compensador estático de VAR's con algún rango de control deseado puede ser formado usando una combinación de los elementos descritos anteriormente [5]. Algunas configuraciones del CEV pueden ser satisfactoriamente aplicadas conociendo los diferentes requerimientos del sistema. La respuesta de velocidad requerida, el rango del tamaño, flexibilidad, pérdidas y costos entre otras consideraciones importantes son necesarias para seleccionar alguna configuración para cualquier aplicación particular.

En la Figura 4.15 se muestra un típico esquema del CEV consistente de un TCR, tres unidades TSC y filtros para armónicas (para filtrar las armónicas generadas por el TCR). A una frecuencia de la potencia, los filtros son capacitivos y producen potencia reactiva entre un 10% y un 30 % del valor del TCR en MVAR. Para asegurar una característica de control uniforme, el valor de la corriente del TCR debe ser ligeramente superior que la de una unidad TSC; de lo contrario las bandas muertas se elevan.

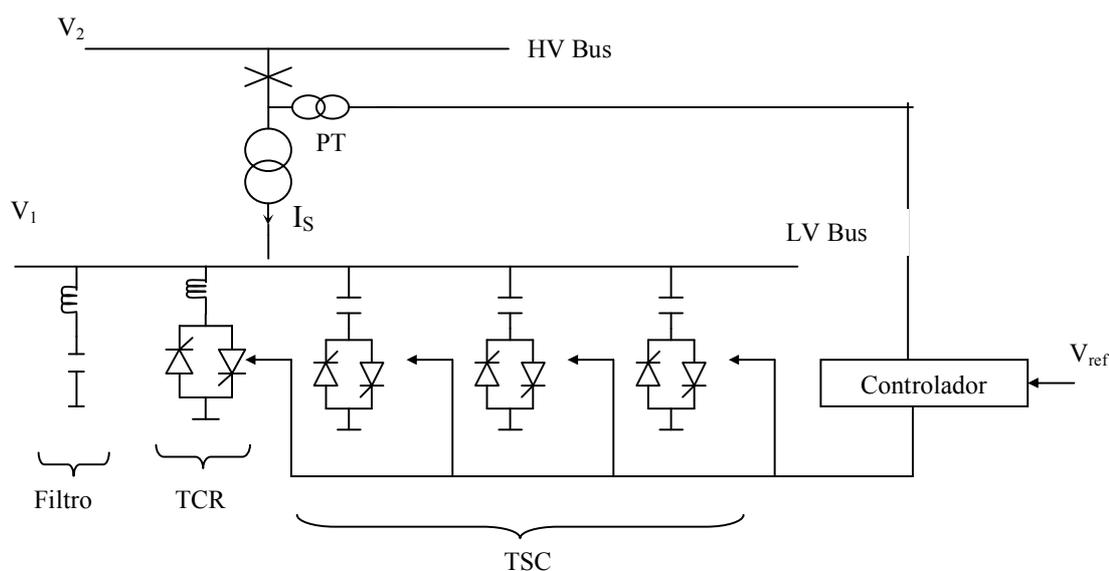


Fig. 4.15 Típico sistema estático de VAR's

La característica  $V/I$  de un CEV en estado estable se muestra en la Figura 4.16a, y su característica correspondiente  $V/Q$  en la Figura 4.16b. El rango del control lineal queda dentro de los límites determinados por la susceptancia máxima ( $B_C$ ) que está determinada por los bancos de los capacitores en el reactor, la susceptancia capacitiva total está determinada por el banco del capacitor en servicio y la capacitancia del filtro. Si el voltaje decae por debajo de un cierto nivel (típicamente 0.3 pu) por un periodo largo, el control de la potencia y la energía del GATE del tiristor se pueden perder, requiriendo un cierre del CEV. El CEV puede restaurarse tan pronto como se recobre el voltaje. Sin embargo, el voltaje podría descender a un valor bajo por periodos cortos, tal como durante una falla transitoria, sin provocar la falla del CEV.

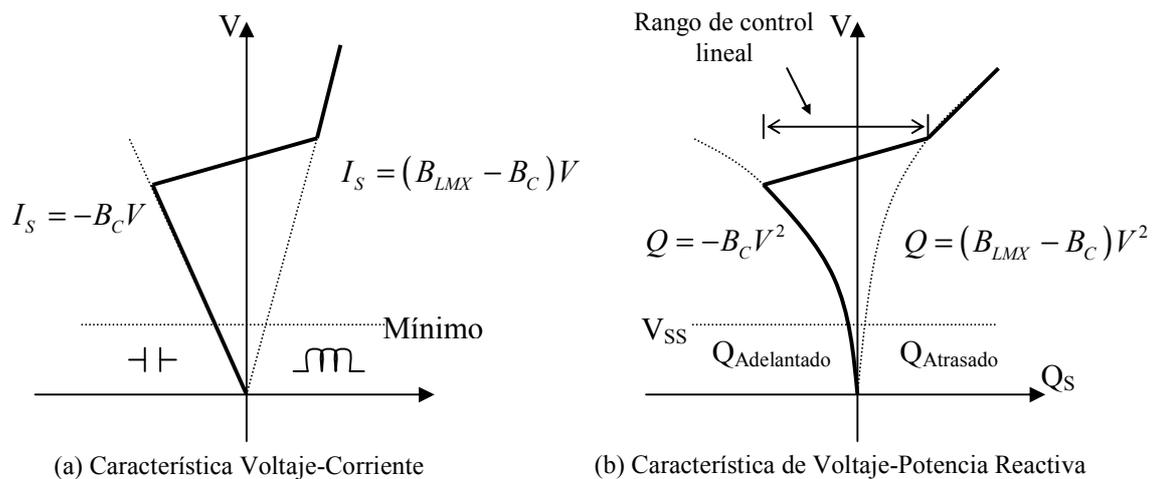


Fig. 4.16 Características del SVS en estado estable

Dentro del rango del control lineal, el CEV es equivalente a una fuente de voltaje  $V_{ref}$  en serie con una reactancia  $X_{SL}$ . Como es evidente, de la Figura 4.8, la reactancia  $X_{SL}$  de la pendiente tiene un efecto significativo en el diseño del CEV. Un valor grande de  $X_{SL}$  hace al CEV menos sensible; por ejemplo, cambios en las condiciones del sistema provocan grandes variaciones de voltaje en el bus de alto voltaje del CEV. El valor de  $X_{SL}$  está determinado por la ganancia en estado estable del controlador (regulador de voltaje). Esto también puede efectuarse por una realimentación de corriente (con controlador PI). Este cambio podría estar basado en estudios detallados de flujos de potencia. Típicamente, la pendiente está dentro de un rango del 1 al 5%, dependiendo de la fortaleza del sistema de CA.

#### 4.1.5 Aplicación de los compensadores estáticos de VAR's

Desde sus primeras aplicaciones a finales de 1970, el uso de los CEV's en los sistemas de transmisión se ha ido incrementando constantemente. Debido a su habilidad para proporcionar un control continuo y rápido de la potencia reactiva y el voltaje, el CEV puede mejorar algunos aspectos del desempeño del sistema de transmisión. Las aplicaciones hasta la fecha incluyen [5]:

- Control de sobrevoltajes temporales (frecuencia de la potencia)
- Prevención de colapso de voltaje
- Mejoramiento de la estabilidad transitoria
- Mejoramiento del amortiguamiento de las oscilaciones del sistema

En los niveles de los sistemas de subtransmisión y distribución, el CEV es usado para el balanceo de las tres fases de los sistemas proporcionando cargas desbalanceadas. Son también utilizados para minimizar las fluctuaciones en el voltaje de abastecimiento

provocado por el impacto repetitivo de las cargas como lo son cargas de plantas mineras, molinos giratorios y hornos de arco eléctrico.

Los hornos de arco eléctrico son un caso especial de las cargas de impacto. Estas provocan oscilaciones de voltaje con frecuencias aleatorias que varían entre 2 y 10 Hz. Esto da como resultado el parpadeo en el filamento de las lámparas en las áreas de carga adyacentes. Algunos equipos eléctricos y los receptores de los televisores pueden también ser afectados. El término “voltage flicker” es usado para describir semejantes fluctuaciones rápidas en el voltaje.

Para minimizar los efectos adversos en las áreas adyacentes de carga, las fluctuaciones de voltaje deben mantenerse por debajo del nivel mínimo aceptable (generalmente del 0.3%). El CEV proporciona un principio efectivo y económico para la eliminación de los problemas de fluctuaciones de voltaje.

## 4.2 Formas alternativas de compensación

En la Tabla 4.1 se resumen los dispositivos que se usan para el control de la potencia reactiva, indicándose los beneficios que se obtienen con cada uno de ellos [3].

DISPOSITIVO	BENEFICIOS
Capacitor en derivación	- Control del voltaje en estado estable
Reactor en derivación	- Control del voltaje en estado estable - Protección ante transitorios
Condensador síncrono	- Control del voltaje, tanto en régimen permanente como dinámico - Aumento de la capacidad de transmisión y estabilización de oscilaciones de potencia
Compensador estático de VAR (CEV)	- Control del voltaje, tanto en condiciones de estado estable como dinámicas - Aumento de la capacidad de transmisión y estabilización de oscilaciones de potencia

**Tabla 4.1 Dispositivos utilizados para el control de la Potencia Reactiva**

Los capacitores serie aumentan la capacidad de transmisión y estabilizan las oscilaciones de potencia; sin embargo logran esto con la modificación de la reactancia inductiva de las líneas y no con el control de la potencia reactiva.

El CEV es un dispositivo que está integrado por capacitores, reactores y válvulas de tiristores.

1. La compensación con capacitor en derivación conmutado generalmente proporciona la fuente de potencia reactiva más económica para el control de voltaje. Está idealmente preparado para la compensación de líneas de transmisión con la reducción de la

impedancia característica efectiva ( $Z'_C$ ), en lugar de la reducción del ángulo de la línea efectiva ( $\theta'$ ) que es la consideración primaria. Sin embargo, el uso fuerte de la compensación con capacitor en derivación podría conducir a la reducción del margen de estabilidad de señal pequeña (estado estable) y a regulación de voltaje pobre.

2. La compensación con capacitor serie es una regulación propia, por ejemplo, su salida de potencia reactiva incrementa con la carga de la línea. Esto está idealmente preparado para aplicaciones donde la reducción del ángulo de la línea efectiva ( $\theta'$ ) es la consideración primaria. Incrementa la carga natural efectiva así como el límite de estabilidad de señal pequeña y mejora la regulación de voltaje. Es normalmente usado para mejorar la estabilidad del sistema y para obtener la división de carga en medio de líneas paralelas.

La compensación con capacitor serie podría provocar problemas de resonancia subsíncrona requiriendo medidas de solución especial. Además, la protección de líneas con capacitores serie requieren atención especial.

3. Una combinación de capacitores en serie y en derivación puede proporcionar la forma ideal de compensación en algunos casos. Esto permite el control independiente de la impedancia característica efectiva y el ángulo de carga  $\delta$ .
4. Un sistema estático de VAR's es idealmente usado en aplicaciones que requieran un control directo y rápido de voltaje. Tiene una ventaja diferente sobre los capacitores en serie donde la compensación es requerida para prevenir la caída de voltaje en el bus involucrando varias líneas. Desde que la compensación en derivación está conectada al bus y no a líneas particulares, el costo total de la compensación en derivación regulada puede ser sustancialmente menos que la compensación en serie de cada una de las líneas.

Cuando un SVS es usado para permitir una transferencia de alta potencia a una gran distancia, la posibilidad de inestabilidad cuando el SVS es puesto en su límite debe ser reconocido. Cuando opera en su límite capacitivo, el SVS se convierte en un simple capacitor; este no ofrece control de voltaje y su potencia reactiva decae con el cuadrado del voltaje. Sistemas muy dependientes de la compensación en derivación pueden experimentar un colapso casi instantáneo cuando las cargas exceden los niveles para los cuales el SVS es fabricado. La clasificación del SVS podría estar basada en estudios minuciosos en los cuales se definan sus MVAR totales y sus porciones dinámicamente controladas. Un SVS tiene limitada su capacidad de sobrecarga y tiene mayores pérdidas que la compensación con capacitor serie.

### 4.3 Principio de compensación en el sistema de transmisión

Una buena planeación y coordinación de estos dispositivos son esenciales para un diseño económico y una operación confiable del sistema. Como la compensación reactiva afecta el estado estable y el desempeño dinámico del sistema, se requieren estudios detallados de flujos de potencia y de estabilidad para establecer un esquema de compensación apropiado.

#### 4.3.1 Compensación serie fija distribuida uniformemente y compensación en derivación

El diseño de la línea está determinado por la impedancia característica  $Z_C$  y la distancia eléctrica (también llamado el ángulo de la línea)  $\theta$ . El objetivo de la compensación es el modificar estos parámetros con el fin de obtener el voltaje deseado y las características de transferencia de potencia.

Sin compensación, suponiendo una línea sin pérdidas, las expresiones para los dos parámetros de la línea son:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{x_L}{b_C}} = \sqrt{\frac{X_L}{B_C}} \quad (4.2)$$

$$\theta = \beta l \quad (4.3)$$

donde la fase constante  $\beta$  está dada por:

$$\beta = \omega \sqrt{LC} = \sqrt{x_L b_C} = \frac{\sqrt{X_L B_C}}{l} \quad (4.4)$$

donde:

L: Inductancia en serie por la longitud en p. u.

C: Capacitancia en derivación por la longitud en p. u.

$x_L$ : Reactancia inductiva en serie por la longitud en p. u.

$b_C$ : Susceptancia capacitiva en derivación por la longitud en p. u.

$X_L$ : Reactancia inductiva en serie total

$B_C$ : Susceptancia en derivación total

l: Longitud de la línea

Para designar las cantidades correspondientes con compensación se utilizará ( $\cdot$ ).

Con una distribución uniforme la compensación en derivación tiene una susceptancia  $b_{sh}$  por la longitud en p. u., la susceptancia en derivación efectiva está dada por:

$$b'_C = b_C - b_{sh} = b_C (1 - k_{sh}) \quad (4.5)$$

donde  $k_{sh}$  es el grado de compensación en derivación y se define como:

$$k_{sh} = \frac{b_{sh}}{b_C} \quad (4.6)$$

el cual es positivo para una compensación en derivación inductiva y es negativo para una compensación en derivación capacitiva.

Los valores efectivos de la impedancia característica y la fase constante con compensación en derivación son relacionados para valores descompensados con la siguiente relación:

$$Z'_C = \sqrt{\frac{x_L}{b'_C}} = \frac{Z_C}{\sqrt{1 - k_{sh}}} \quad (4.7)$$

y

$$\beta' = \beta \sqrt{1 - k_{sh}} \quad (4.8)$$

La compensación capacitiva en derivación, en efecto, decrementa a  $Z_C$  e incrementa a  $\beta$ , mientras que la compensación inductiva en derivación incrementa a  $Z_C$  y decrementa a  $\beta$ .

Con una distribución uniforme de la compensación capacitiva serie de  $C_{se}$  en p. u. por la longitud, la reactancia serie efectiva es:

$$x'_L = x_L - \frac{1}{\omega C_{se}} = x_L - x_{C_{se}} = x_L (1 - k_{se}) \quad (4.9)$$

donde  $k_{se}$  es el grado de compensación capacitiva serie definida como:

$$k_{se} = \frac{x_{C_{se}}}{x_L} \quad (4.10)$$

el cual es positivo para compensación serie capacitiva.

Los valores efectivos de la impedancia característica y la fase constante con compensaciones serie están dados por:

$$Z'_C = \sqrt{\frac{x'_L}{b_C}} = Z_C \sqrt{1 - k_{se}} \quad (4.11)$$

y

$$\beta' = \beta \sqrt{1 - k_{se}} \quad (4.12)$$

La compensación serie (capacitiva) decrementa tanto a  $Z_C$  como a  $\beta$ .

Con la compensación en derivación y la compensación serie, los efectos combinados son:

$$Z'_C = Z_C \sqrt{\frac{1 - k_{se}}{1 - k_{sh}}} \quad (4.13)$$

$$\beta' = \beta \sqrt{(1 - k_{sh})(1 - k_{se})} \quad (4.14)$$

El ángulo de la línea efectivo ( $\theta'$ ) y la carga natural ( $P_o'$ ) están dados por:

$$\theta' = \theta \sqrt{(1 - k_{sh})(1 - k_{se})} \quad (4.15)$$

$$P_o' = P_o \sqrt{\frac{1 - k_{sh}}{1 - k_{se}}} \quad (4.16)$$

### 4.3.2 Efecto de la compensación en el voltaje de la línea

En condiciones de baja carga (demanda mínima), un perfil de voltaje uniforme se obtiene por compensación en derivación inductiva. Por ejemplo, con  $k_{sh}=1$  (100% compensación inductiva),  $\theta'$  y  $P_o'$  son reducidos a cero y  $Z_C'$  se incrementa a infinito; esto resulta en un voltaje uniforme y en cero carga.

Bajo condiciones de alta carga (demanda máxima), un voltaje uniforme puede ser alcanzado agregando compensación capacitiva en derivación. Por ejemplo, para transmitir  $1.4P_o$  con un perfil de voltaje uniforme, se requiere una compensación capacitiva en derivación de  $k_{sh} = -0.96$ .

La compensación capacitiva serie puede, en teoría, ser usada en lugar de compensación en derivación para obtener un perfil de voltaje uniforme, bajo alta carga. Por ejemplo, un perfil de voltaje uniforme puede permitir una carga de  $1.4P_o$  con una compensación serie distribuida de  $k_{se} = 0.49$ . En la práctica, los capacitores serie amontonados no son apropiados para obtener un perfil de voltaje uniforme a través de la línea. Obviamente, los cambios de escalón en el voltaje ocurren en un punto donde los capacitores serie son aplicados. Esto hace, sin embargo, que mejore la regulación de voltaje en cualquier punto dado, por ejemplo, cambios en el voltaje con carga reducida.

### 4.3.3 Efectos de la compensación en potencia máxima

La expresión para la transferencia de potencia por una línea con compensación es:

$$P_R = \frac{E_S E_R}{Z_C' \text{sen}\theta'} \text{sen}\delta \quad (4.17)$$

La potencia máxima (correspondiente a  $\delta = 90^\circ$ ) puede ser incrementada por el decremento ya sea de  $Z_C'$  o de  $\theta'$ , o de ambos.

La impedancia característica  $Z_C'$ , puede ser disminuida con compensación capacitiva en derivación, pero esto está acompañado por un incremento en la distancia eléctrica  $\theta'$ . Por otro lado, la compensación en derivación inductiva decrece a  $\theta'$ , pero incrementa a  $Z_C'$ .

Sólo la compensación de capacitor serie contribuye al decremento tanto de  $Z_C'$  como de  $\theta'$ . Podríamos, sin embargo, reconocer que la compensación no sea requerida en todos los casos para satisfacer ambos objetivos:

- a) Incrementar  $P_o'$ , el nivel de potencia en el cual el valor de voltaje sea uniforme.
- b) Decrementar la distancia eléctrica para mejorar la estabilidad.

En líneas pequeñas se puede requerir soporte de voltaje, por ejemplo, un incremento en  $P_o'$ , aunque la longitud eléctrica inherente es pequeña. Esto podría ser alcanzado por capacitores en derivación, proporcionando que  $\theta'$  no se vuelva excesivo como resultado. Por otro lado, las líneas largas de alrededor de 500 Km no pueden ser cargadas a  $P_o$  debido a un  $\theta$  excesivo.

### 4.3.4 Compensación en derivación regulada distribuida uniformemente

Considerando una compensación en derivación en el cual  $k_{sh}$  es continuamente regulada tal que la carga natural efectiva ( $P_o'$ ) es igual a la potencia transmitida ( $P$ ) en todo el tiempo:

$$P = \frac{P_o'}{\text{sen}\theta'} \text{sen}\delta \quad (4.18)$$

Además, cuando una línea está operando con una carga natural, el ángulo de transmisión es igual al ángulo de la línea. Como resultado, con compensación en derivación regulado continuamente,  $\theta' = \delta$  en todo el tiempo. De esto:

$$\frac{P}{\delta} = \frac{P_o'}{\theta'} = \frac{P_o \sqrt{1-k_{sh}}}{\theta \sqrt{1-k_{sh}}} = \frac{P_o}{\theta} = \text{constante} \quad (4.19)$$

Se tiene una relación lineal entre P y  $\delta$ , en lugar de la relación sinusoidal con compensación fija o sin compensación. Esto significa que el límite de estabilidad de señal pequeña (estado estable) con la compensación regulada es infinito. Con  $V_o$  que denota el voltaje de la línea valuado, la pendiente de la característica P- $\delta$  está dada por:

$$\frac{P_o}{\theta} = \frac{V_o^2}{Z_c \theta} = \frac{V_o^2}{X_L} \quad (4.20)$$

Esto es igual al pico de la onda sinusoidal de la característica P- $\delta$  con un 100% de compensación inductiva en derivación ( $k_{sh} = 1$ ).

La compensación en derivación regulada efectivamente cambia a  $k_{sh}$  continuamente por lo que  $P_o' = P$ . Para cada valor de  $k_{sh}$ , hay una sinusoidal característica P- $\delta$ . Como la potencia transmitida P cambia el regulador efectivamente ajusta a  $k_{sh}$  así que el punto de operación cambia de una curva a otra de tal forma que quedan en una línea recta con una pendiente positiva. Para una operación satisfactoria en un nivel de transferencia de alta potencia, el regulador debe ser rápido y continuo para prevenir el desplazamiento a lo largo de la característica sinusoidal correspondiente al valor de la corriente de  $k_{sh}$  antes de que se mueva a una nueva característica.

En la práctica, esta forma de compensación puede ser casi alcanzado por los compensadores activos colocados, tales como el condensador síncrono o sistemas estáticos de VAR's, a intervalos discretos a lo largo de la línea. Los compensadores podrían mantener el voltaje constante igual a  $V_o$  en algunos puntos a lo largo de la línea para todos los niveles de carga. Esto casi satisface los requerimientos de la carga natural efectiva ( $P_o'$ ) para ser igual al valor de la corriente de potencia (P) que está siendo transmitida.

Estos reguladores deben, sin embargo, tener suficiente capacidad para satisfacer los requerimientos de la potencia reactiva y mantener el voltaje constante en todos los posibles niveles de carga. Para el caso ideal, la potencia reactiva total proporcionada o absorbida por los reguladores de voltaje constante está dada por:

$$Q_v = (V^2 \omega C - I^2 \omega L) l = P_o \theta \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_o} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

Para  $P > P_o$  la potencia reactiva requerida es capacitiva. La potencia reactiva incrementa como el cuadrado de la potencia transmitida.

El funcionamiento satisfactorio de tal esquema depende de la capacidad de todos los reguladores para mantener el voltaje constante a través de la línea. Si un regulador falla o si alcanzara un límite la potencia reactiva, la estabilidad de todo el sistema se podría afectar.

### 4.3.5 Compensación regulada a intervalos discretos

La compensación regulada aplicada en intervalos discretos se aproxima al diseño de la compensación distribuida uniformemente. Considerando un compensador en medio de una línea, tal y como se muestra en la Figura 4.17, y se extenderá el estudio a un número arbitrario de compensadores.

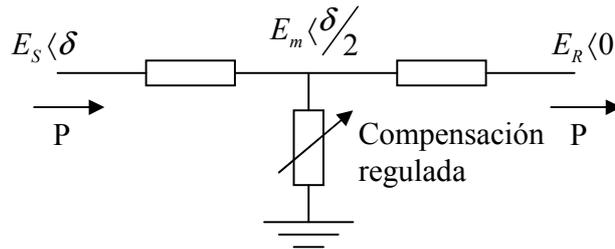


Fig. 4.17 Línea con compensación regulada en medio

### 4.3.6 Compensación regulada en medio

La susceptancia de compensación es continuamente variada tal que  $E_m$  es constante. Por simplicidad, se va a asumir que  $E_S = E_R = E_m = E$ . La línea puede ser considerada que está hecha para dos secciones independientes, y cada sección tiene un ángulo de línea de  $\theta/2$ , donde  $\theta$  es el ángulo de la línea total. Aplicando la ecuación (4.17) para cada sección, la expresión de la potencia transmitida es:

$$P = \frac{E^2}{Z_c \text{sen}(\theta/2)} \text{sen}(\delta/2) \quad (4.22)$$

Si  $E$  es igual al valor del voltaje, la expresión para  $P$  puede ser expresada en términos de la potencia natural  $P_o$  de la línea sin compensación, de la siguiente forma:

$$P = \frac{P_o}{\text{sen}(\theta/2)} \text{sen}(\delta/2) \quad (4.23)$$

Para una línea sin compensación, la potencia transmitida está dada por:

$$P = \frac{P_o}{\text{sen}\theta} \text{sen}\delta \quad (4.24)$$

La razón de potencia máxima que puede ser transmitida con o sin compensación regulada en medio es:

$$\frac{P'_{\max}}{P_{\max}} = \frac{\text{sen}\theta}{\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4.25)$$