FACTS “Flexible Alternating Current Transmission Systems”

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Vigo

Índice

1. FACTS Definition
2. FACTS Technology
3. FACTS Classification
4. FACTS Technical benefits
5. FACTS Installing
6. VSC (Voltage-Sourced Converter)
7. SVC (Static Var Compensator)
8. TCSC (Thyristor Controlled Series Compensators)
9. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)
10. DVR (Dynamic Voltage Regulator)
11. STATCOM (Static Synchronous Compensator)
12. DSTATCOM (Distribution Static Compensator)
13. UPFC (Unified Power Flow Controller)
14. HPFC (Hybrid Power Flow Controller)
15. UPQC (Unified Power Quality Conditioner)
16. HVDC (High-Voltage Direct Current Transmission)
17. MV distribution grid with FACTs devices
18. VFT (Variable Frequency Transformer)
19. FACTS Equipment. Installations
20. Conclusions

VIGO (Spain)

Definición de FACTS

- Flexible Alternating Current Transmission System **(FACTS),** es un equipamiento estático usado, entre otras aplicaciones, para la mejora del transporte de energía eléctrica de corriente alterna (CA) y la calidad de potencia. Estos dispositivos permiten reforzar el control e incrementar la capacidad de transferencia de potencia. Se trata, generalmente, de dispositivos basados en la electrónica de potencia.

- **FACTS** se define por IEEE como: “un sistema basado en la electrónica de potencia y otro equipamiento estático, que proporciona el control de uno o más sistemas de transporte de CA e incrementa la capacidad de transferencia de potencia”.

Definición de FACTS

- Los FACTS son sistemas que se incorporan a la red de transporte de corriente alterna que están compuestos por controladores basados en la electrónica de potencia y otros controladores estáticos con la finalidad de mejorar su funcionamiento.

Definición de FACTS

Hoy día, el concepto de FACTS incluye no solo controladores basados en tiristores sino todos los basados en la electrónica de potencia y otros controladores estáticos. Algunas definiciones, se pueden ver a continuación:

Flexibilidad del Sistema Eléctrico de Transporte:
Capacidad para adaptarse a las modificaciones en el propio sistema eléctrico de transporte o a las condiciones de operación, manteniendo unos margenes suficientes de estado permanente y transitorio.

Flexible AC Transmission System (FACTS):
Sistema de transporte de corriente alterna que incorpora dispositivos basados en la electrónica de potencia y otros controladores estáticos para reforzar la capacidad de control e incrementar la capacidad de transferencia de potencia.

Controlador FACTS:
Un sistema basado en la electrónica de potencia y otro equipamiento estático que proporciona el control de uno o más parámetros del sistema de transporte de CA.
N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "*Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System*", IEEE Press, 1999

FACTS ¿Para qué?

- Los sistemas eléctricos actuales son en su mayoría controlados electromecánicamente lo cual hace poco flexible el cambio de parámetros ante modificaciones en la configuración de la red.

- Por otra parte, las redes eléctricas están en expansión pero existen restricciones para la instalación de nuevas líneas de transporte.

- La tecnología FACTS es hoy una opción para incrementar la potencia transmitida y mejorar el control de los parámetros que gobiernan la operación modificandolos de manera flexible

- La tecnología FACTS no consiste de un solo controlador electrónico para varias aplicaciones sino un conjunto de controladores que proporcionan un universo de soluciones, algunas en aplicación hoy en día y otras en estudio

Tecnología FACTS

- La tecnología **FACTS** contiene una colección de controladores, que se pueden usar individualmente o de forma coordinada con otros controles instalados en la red, permitiendo así un mayor aprovechamiento de las características de control de la misma.

- El potencial de la tecnología **FACTS** se basa en la posibilidad de controlar la ruta del flujo de potencia y la posibilidad de conectar redes que no se encuentran adecuadamente interconectadas, facilitando el transvase (comercio) de energía entre agentes distantes.

Tecnología FACTS

Las siguientes características, resumen las principales ventajas de los dispositivos FACTS:

- Permiten un mayor control sobre el flujo de potencia, dirigiendolo a través de rutas predeterminadas.
- Hacen posible el funcionamiento a niveles de carga seguros (sin sobrecargas) cerca de los límites térmicos de las líneas de transporte.
- Proporcionan una mayor capacidad de transporte de potencia entre áreas controladas, reduciendo así, de forma considerable, el margen de reserva.
- Posibilitan el incremento de la seguridad del sistema al incrementar el límite de estabilidad transitoria.
- Consiguen amortiguar las oscilaciones del sistema que dañan el equipo y limitan la capacidad disponible.
- Dan respuesta a los cambios en las condiciones de fase de la red y controlan en tiempo real el flujo de potencia.
- Proporcionan la suficiente flexibilidad a red para instalar nuevas plantas generadoras.
- Proporcionan seguridad en las conexiones a través de lineas de unión entre empresas y áreas vecinas.
- Proporcionan gran flexibilidad en los tres estados de funcionamiento trifásico del sistema: pre-falta, falta y post-falta y capacidad para controlar el estado transitorio y el impacto de fase en el estado de post-falta.

FACTORES QUE LIMITAN LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE

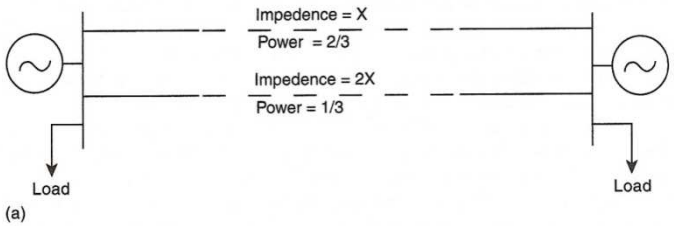
Dinámicos:

–Estabilidad transitoria y dinámica
–Oscilaciones subsíncronas
–Sobretensión y subtensión dinámicas
–Colapso de tensión
–Colapso de frecuencia

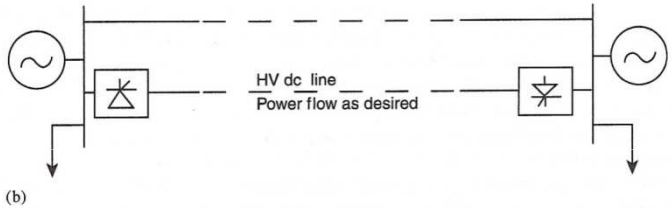
Estado permanente:

–Flujo de potencia desigual
–Flujos excesivos de potencia reactiva
–Capacidad de tensión
–Capacidad térmica

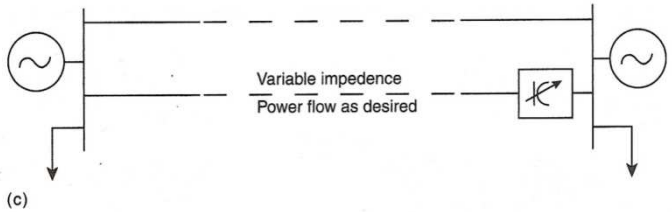
SITUACIONES QUE SE PUEDEN DAR EN EL TRANSPORTE



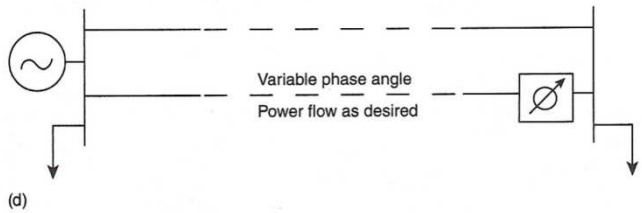
La potencia transmitida no es controlable y se establece de manera fija dependiendo de la impedancia de las líneas.



La potencia fluye según se controlen las estaciones HVDC.



La potencia se controla según se necesite con un equipo FACTS que controle la impedancia.



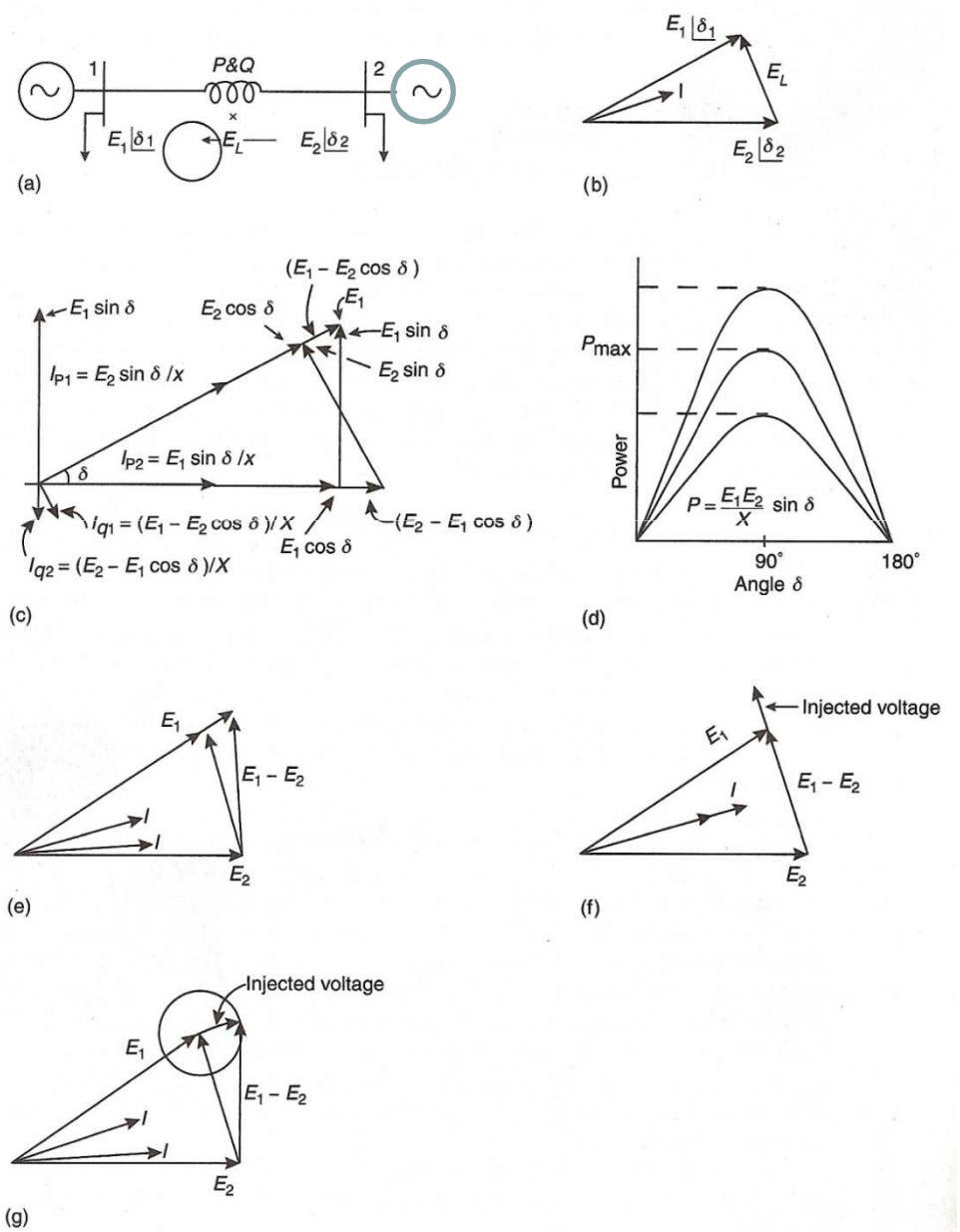
El control de potencia se puede realizar también con un equipo FACTS que controle el ángulo de fase.

CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA

- La transferencia de potencia entre áreas puede afectarse al ajustarse la impedancia neta de la red.

- La capacidad de transmisión de la línea de transporte puede incrementarse al instalar elementos reactivos que reduzcan la impedancia neta de la red

CONTROL DEL FLUJO DE POTENCIA EN UNA LÍNEA



Sistema de dos máquinas simple y el flujo de potencia perpendicular la tensión E_L

Fasores de potencia activa y reactiva y curvas potencia-ángulo para diferentes valores de X

Regulando la magnitud de tensión generalmente cambia la potencia reactiva

Pero inyectando un fasor de tensión en serie con la línea y perpendicular a la corriente se cambia la potencia activa. Alternativamente se puede realizar el control inyectando un fasor de tensión con ángulo de fase y magnitud variable

Clasificación de los FACTS

- Equipamientos FACTS
  - Basados en Tiristores
    - Tap changer
    - Phase angle regulator
    - Static Var Compensator (SVC)
    - Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)
  - Basados en GTOs
    - Static synchronous Compensator (STATCOM)
    - Static Synchronous Series Compensator (SSSC)
    - Unified Power Flow Controller (UPFC)
  - Basados en IGBTs
    - Static synchronous Compensator (STATCOM)
    - HVDC Using Voltage Source Converters (HVDC-VSC)

Clasificación de los FACTS

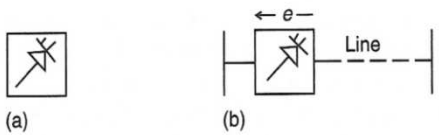
- **Dependiendo del tipo de conexión a la red de los dispositivos FACTS, se pueden diferenciar cuatro categorías:**

  - **Controladores serie**
  - **Controladores derivación**
  - **Controladores serie-serie**
  - **Controladores serie-derivación**

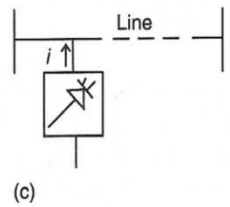
- **Dependiendo de las características tecnológicas, los dispositivos FACTS se pueden dividir en dos generaciones:**

  - **Primera generación:** usan tiristores (SCR), con el cebado controlado por puerta.
  - **Segunda generación**: utilizan semiconductores con el cebado y el apagado controlados por puerta (GTO´s , MCTS , IGBTS , IGCTS, etc).

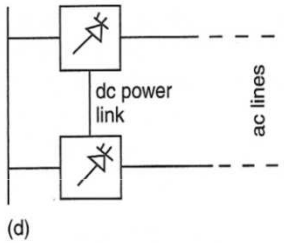
Posibles combinaciones de los FACTS

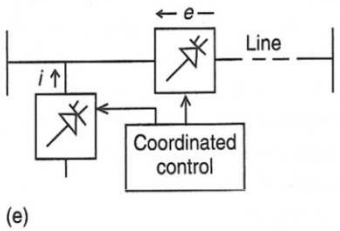


Simbolos básicos

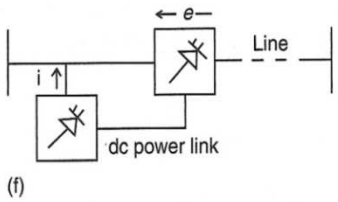


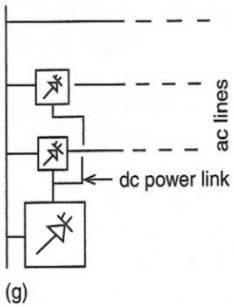
Controlador serie y controlador en derivación



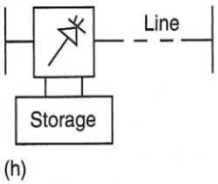


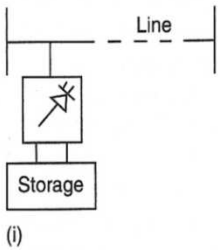
Controlador serie-serie unificado y controlador coordinado serie y derivación

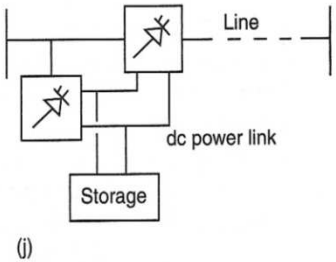




Controlador unificado derivación-serie y Controlador unificado para múltiples líneas







Controlador serie con almacenamiento, controlador derivación con almacenamiento y controlador unificado serie-derivación con almacenamiento

Clasificación de los FACTS

Dispositivo FACTS	Atributos de control
Primera Generación	
Static Var Compensator, SVC (TCR,TSC,TSR)	Control de tensión y estabilidad, compensación de VARs, amortiguación de oscilaciones
Thyristor Controlled Series Compensations (TCSC,TSSC)	Control de corriente, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión, limitación de la corriente de falta
Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR,TSSR)	Control de corriente, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión, limitación de la corriente de falta
Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST o TCPR)	Control de la potencia activa, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión
Thyristor Controlled Voltage Regulator (TCVR)	Control de potencia reactiva, control de tensión, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión
Thyristor Controlled Voltage Limited (TCVL)	Límites transitorios y dinámicos de la tensión

Clasificación de los FACTS

Dispositivos FACTS	Atributos de control
Segunda Generación	
Synchronous Static Compensator (STATCOM sin almacenamiento)	Control de tensión, compensación de VARs, amortiguación de oscilaciones, estabilidad de tensión
Synchronous Static Compensator (STATCOM con almacenamiento)	Control de tensión y estabilidad, compensación de VARs, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión
Static Synchronous Series Compensator (STATCOM sin almacenamiento)	Control de corriente, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión, limitación de la corriente de falta
Static Synchronous Series Compensator (STATCOM con almacenamiento)	Control de corriente, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión
Unified Power Flow Controller (UPFC)	Control de potencia activa y reactiva, control de tensión, compensación de VARs, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión, limitación de la corriente de falta
Interline Power Flow Controller (IPFC) o Back to Back (BtB)	Control de potencia reactiva, control de tensión, compensación de VARs, amortiguación de oscilaciones, estabilidad transitoria, dinámica y de tensión

Beneficios Técnicos de los FACTS

Mejor

Dispositivo FACTS	Control del flujo de Carga	Control de tensión	Estabilidad transitoria	Estabilidad dinámica
SVC	●	● ● ●	●	● ●
STATCOM	●	● ● ●	● ●	● ●
TCSC	● ●	●	● ● ●	● ●
UPFC	● ● ●	● ● ●	● ●	● ●

Los beneficios de utilizar dispositivos FACTS en los sistemas eléctricos de transporte, se pueden resumir como sigue:

- Mejor utilización de las ventajas de los sistemas de transporte existentes.
- Incremento de la fiabilidad y disponibilidad del sistema de transporte
- Incremento de la estabilidad transitoria y dinámica de la red
- Incremento de la calidad de suministro para las industrias sensibles
- Beneficios Medioambientales.

Instalación de FACTS

Existen tres factores principales que se deben considerar antes de instalar un dispositivo FACTS:

- El tipo de dispositivo
- La capacidad requerida
- La localización que optimice el funcionamiento del dispositivo.

De los tres factores, el último es de gran importancia, debido a que el efecto deseado y las características propias del sistema dependen en buena medida de la localización del FACTS.

Instalación de FACTS

Pasos previos para la instalación de un dispositivo FACTS:

- El primer paso siempre debiera ser el realizar un estudio detallado de la red para investigar las condiciones críticas de la red o de las conexiones de las redes. Estas condiciones deben incluir: riesgos de problemas de tensión o incluso colapsos de tensión, flujos de potencia no deseados, asi como la capacidad para asumir las oscilaciones de potencia y resonancias subsíncronas.

- Para una red estable, la utilización optimizada de las líneas de transporte – por ejemplo, se debiera investigar el posible incremento de la capacidad de transporte

- Si existe la posibilidad de mejorar el sistema de transporte, bien a través de reforzar la estabilidad o la capacidad de transferencia de energía, se debe determinar el dispositivo FACTS apropiado y sus requerimientos nominales necesarios

- Basandose en esta información técnica, se debe desarrollar un estudio económico para comparar el coste de los dispositivos FACTS o de las soluciones convencionales con los beneficios previstos.

Instalación de FACTS

La capacidad del sistema de transporte de transmitir potencia se encuentra directamente influenciada por una o más de las siguientes limitaciones permanentes y dinámicas:

- **Estabilidad angular**
- **Magnitud de tensión**
- **Límites térmicos**
- **Estabilidad transitoria**
- **Estabilidad dinámica**

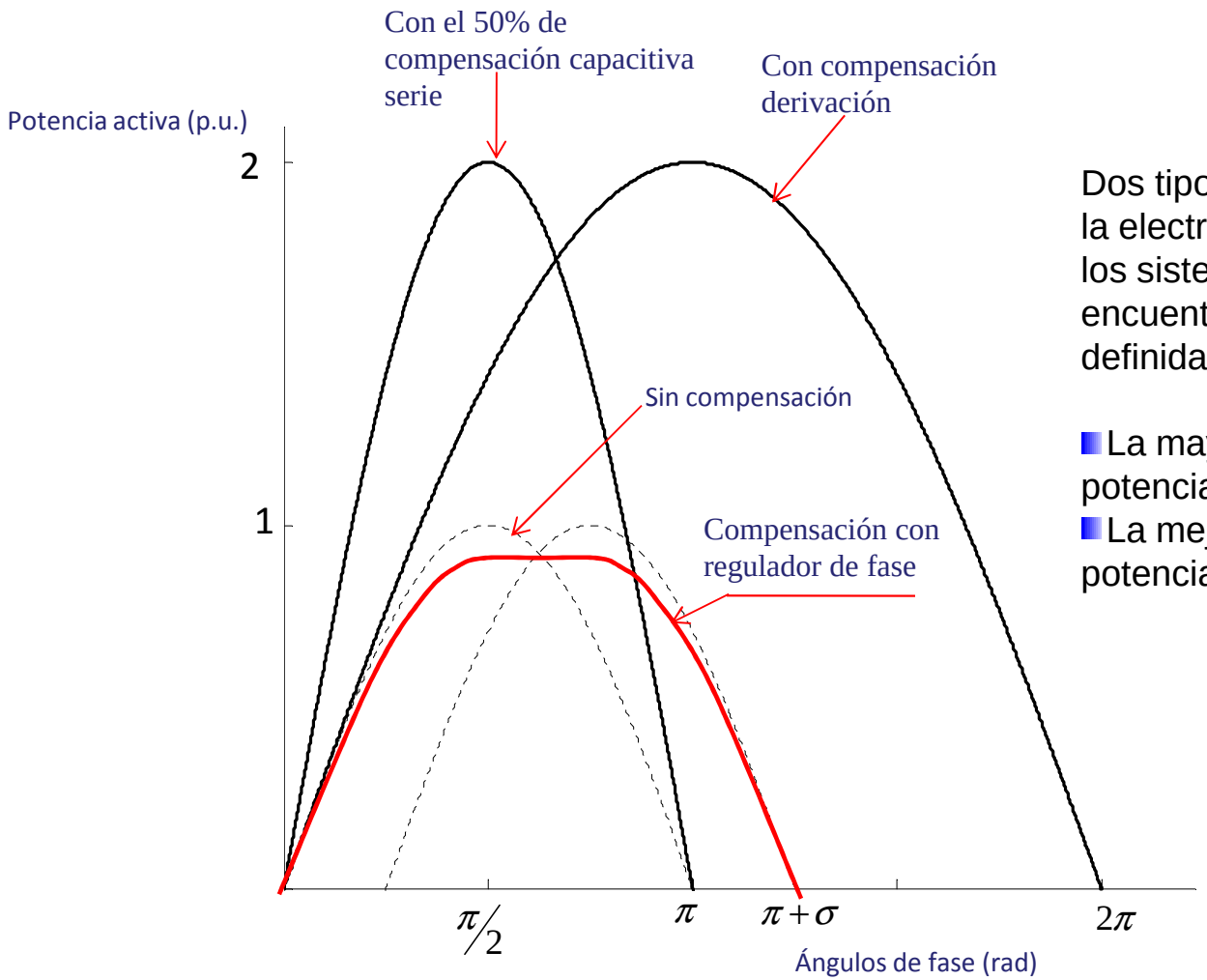
El flujo de potencia en cualquier punto a lo largo de una línea de transporte siempre se puede determinar si se conocen, o se pueden calcular, la tensión, la corriente y el factor de potencia. Con todo ello, la potencia activa transferida entre dos barras, se puede expresar de forma simple mediante la ecuación:

$$P = \frac{V_s \cdot Vr}{X_{eq}} \cdot sen\delta$$

Análogamente, la potencia reactiva recibida en el terminal receptor (barra r), vendrá dada por la ecuación:

$$Q = \frac{Vr}{X_{eq}}\left(Vs \cdot \cos\delta - Vr\right)$$

Instalación de FACTS

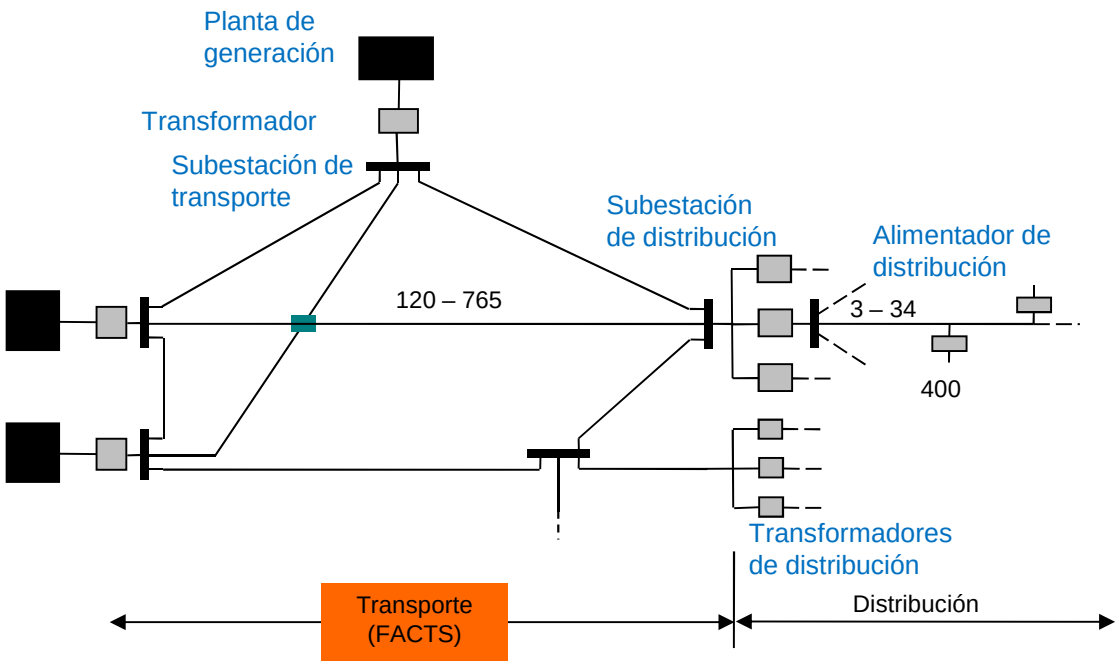


Dos tipos de aplicaciones de la electrónica de potencia a los sistemas eléctricos, se encuentran perfectamente definidas:

- La mayoría del control de potencia activa y reactiva
- La mejora de la calidad de potencia

Gráfica representativa de la potencia activa en función del ángulo de fase para diferentes tipos de compensación.

Instalación de FACTS

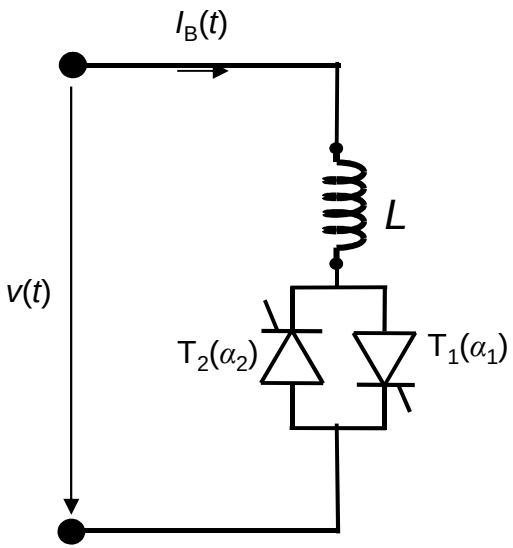


Se pueden destacar dos tipos de beneficios:

- Beneficios en el transporte de Alta Tensión mediante la instalación de equipamiento FACTS
- Beneficios en la distribución de baja tensión por la instalación del equipamiento de potencia habitual.

Esquema de un sistema de transporte y distribución con la indicación de la zona de influencia del equipamiento FACTS.

TCR (*Thyristor-Controlled Reactor)*



Esquema de un TCR monofásico

Las reactancias controladas por tiristores (*Thyristor-Controlled Reactor, TCR*), funcionan como reactancias variables y pueden demandar o no VA inductivos. La principal misión de este elemento es la de conseguir una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por una bobina.

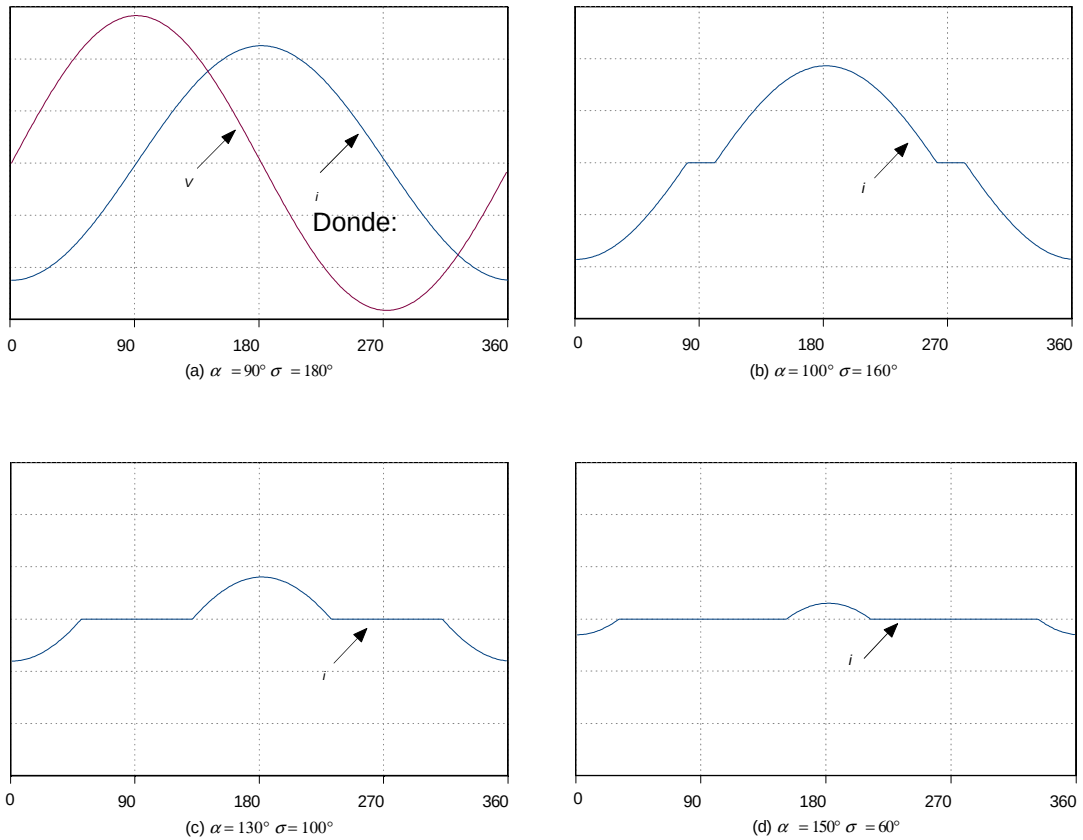
El esquema de un TCR está formado por una bobina L y un convertidor CA/CA compuesto por dos tiristores en antiparalelo. En este caso, a la electrónica de potencia se le aplica un control de fase, de forma que se regula el valor eficaz de la corriente que circula a través de la reactancia. Dependiendo de cada caso concreto puede haber necesidad de VA inductivos o capacitivos; por lo que, se suele utilizar el TCR en paralelo con condensadores.

Los tiristores T_1 y T_2, conducirán alternativamente cada medio ciclo de la frecuencia de suministro. En función del ángulo de disparo de los tiristores, se controlará la susceptancia correspondiente a la bobina lineal.

TCR (*Thyristor-Controlled Reactor)*

$$v(t) = \sqrt{2}V sen\,\omega t$$

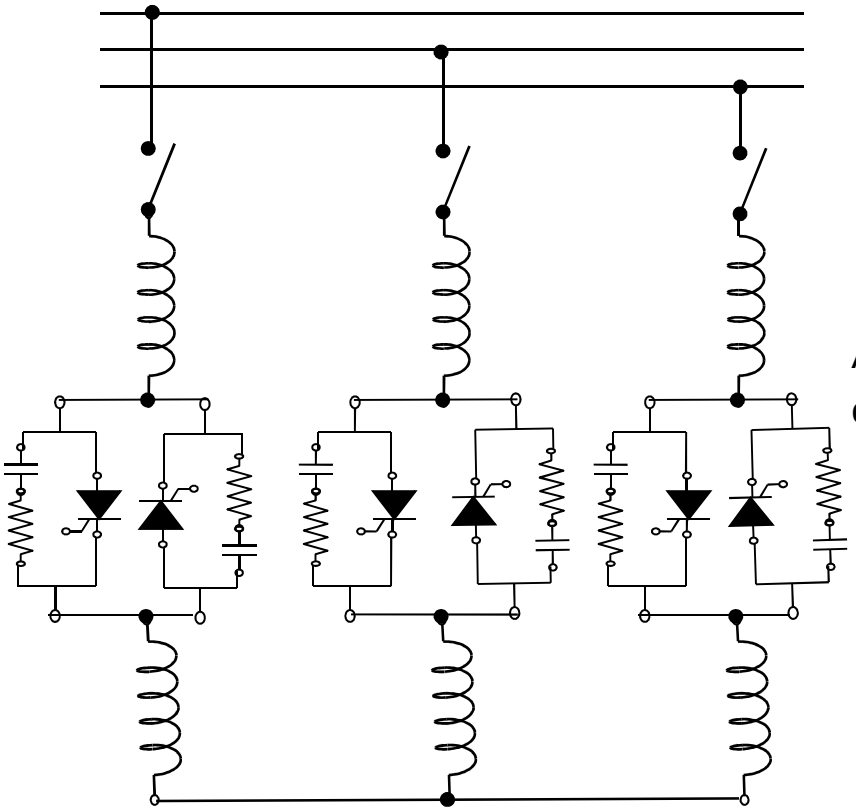
Al aplicar el control del ángulo de fase sobre los tiristores, se consigue que vayan conduciendo alternativamente de forma que la intensidad resultante es una sucesión de transitorios sobre un conjunto RL. Esto es lo que se puede ver en la figura, donde a partir de un instante definido por el ángulo de disparo α se inicia la conducción de cada uno de los tiristores T_1 y T_2.



Representación gráfica de las ondas de tensión y corriente en un TCR monofásico para diferentes valores de α y σ.

$$\begin{cases} \sigma = 2(\pi - \alpha) \\ \pi/2 < \alpha < \pi \\ 0 < \sigma < \pi \end{cases}$$

TCR (*Thyristor-Controlled Reactor)*



Esquema representativo de un TCR trifásico conectado en estrella.

La corriente instantánea de un TCR viene dada por la expresión:

$$i_B(t) = \left\{ \frac{1}{L}\int_{\alpha}^{\varpi t} \sqrt{2} V sen\,\omega t dt = \frac{\sqrt{2}\cdot V}{\varpi L}\left(\cos\alpha - \cos\varpi t\right) \right.$$

Para $\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \sigma$ y 0 en los demás casos

Aplicando el análisis de Fourier se obtiene la siguiente expresión, para la corriente a la frecuencia fundamental:

$$I_{Bf1} = \frac{V}{j\varpi L\pi}\left[2(\pi - \alpha) + sen 2\alpha\right]$$

Y la corriente correspondiente a los diferentes armónicos impares vendrá dada por la expresión:

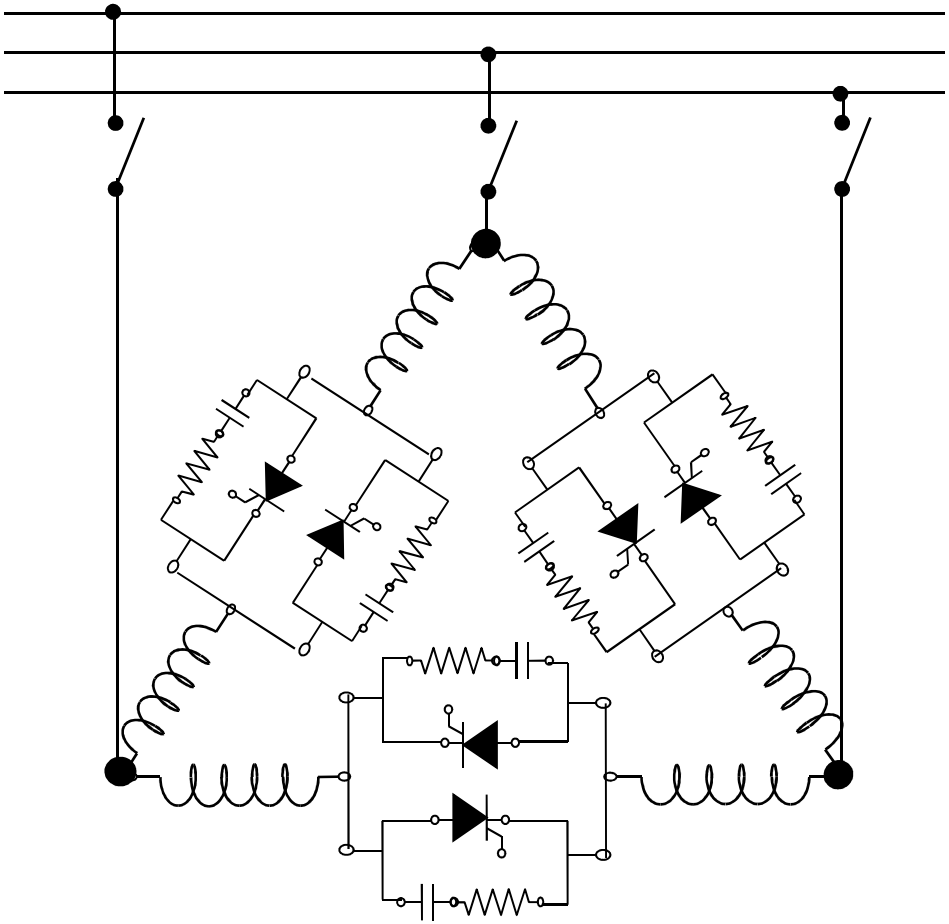
$$I_{Bh} = \frac{4V}{j\varpi L\pi}\left[\frac{sen(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{sen(h-1)\alpha}{2(h-1)} - \cos\alpha\frac{senh\alpha}{h}\right]$$

donde: h =3,5,7,9,11,13…

TCR (*Thyristor-Controlled Reactor)*

Si se supone un sistema de tensiones sinusoidales, trifásico y equilibrado y además todos los tiristores se disparan con el mismo ángulo, las intensidades de línea presentan las siguientes características:

- Sólo hay armónicos impares
- En caso de una configuración en estrella con neutro aislado, no existen componentes armónicas homopolares (h = 3, 9, 15...), en cambio, si la conexión es en estrella con neutro sí que aparecen dichas componentes.
- En el caso de configuración en triángulo, como la de la figura, los armónicos homopolares en la intensidad de línea son nulos.

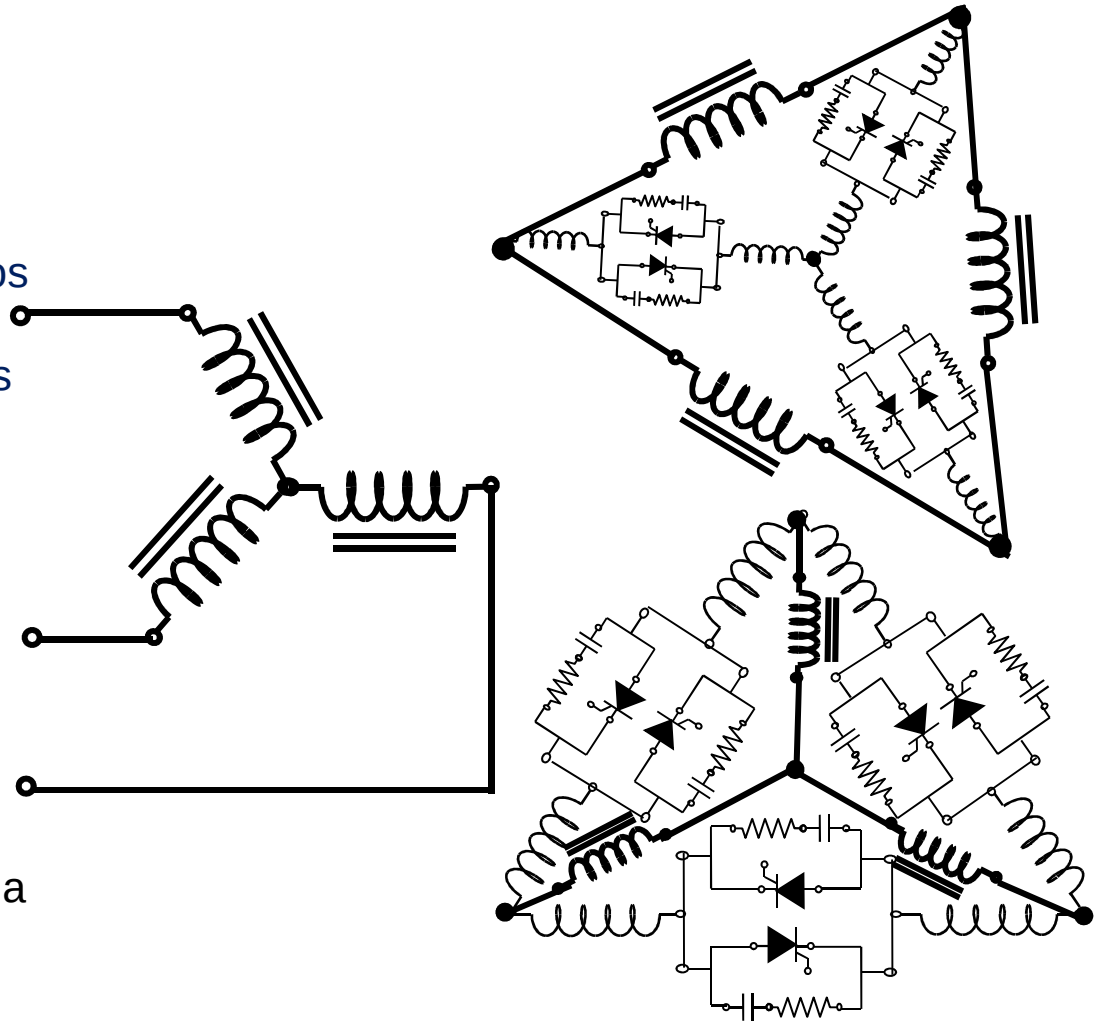


. *Esquema representativo de un TCR trifásico conectado en triángulo.*

TCR (*Thyristor-Controlled Reactor)*

Bajo condiciones de funcionamiento equilibrado, los armónicos "*triplen*" no alcanzarán la red; por lo tanto, sólo lo pueden hacer los armónicos h=5,7,11,13,…Por otra parte, realizando las conexiones adecuadas a través de los secundarios de los transformadores de conexión a la red, se pueden eliminar los armónicos h=5 y h=7, con ello los armónicos de orden más bajo que alcanzan la red, son h=11 y h=13, los cuales se pueden eliminar mediante un filtro de sintonización doble (f=550 Hz y f=650 Hz).

Actuando sobre el ángulo de disparo de los tiristores se puede modificar la componente fundamental de la corriente absorbida y, por lo tanto, varia la potencia reactiva absorbida.



Esquema de montaje de un TCR de 12 pulsos

TCR (*Thyristor-Controlled Reactor)*

El control, está basado en la identificación de la potencia reactiva fundamental y a partir de ahí, con control analógico o digital, se determinan los ángulos de disparo de los tiristores.

Los inconvenientes que plantea este sistema, son los siguientes:

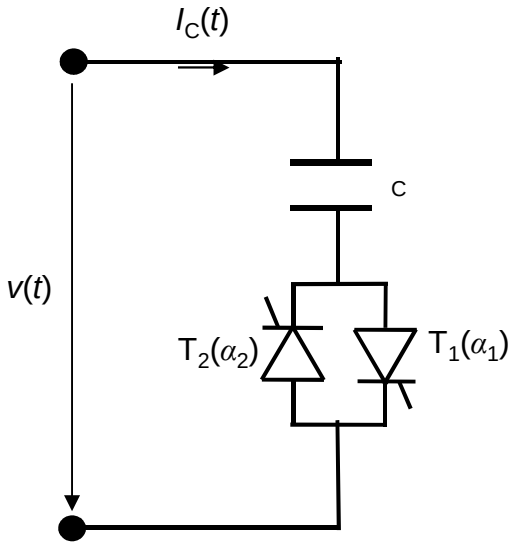
- Hacen la conmutación de los tiristores a frecuencia de red (apagado natural), mientras que tienen que reaccionar a las frecuencias bajas del parpadeo o flicker.
- Generan armónicos que dependen del nivel de potencia reactiva fundamental, y no puede ser cambiada con conmutación natural.

Para evitar este problema, se están desarrollando reactancias conmutadas por modulación de anchura de pulsos consiguiendo, de está manera, que las corrientes inductivas se aproximen bien a las componentes fundamentales de corriente.

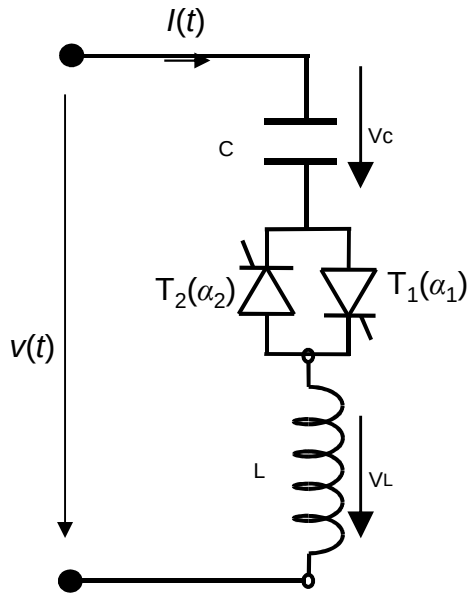
TSC (*Thyristor Switched Capacitors*)

El esquema del condensador conmutado por tiristor o *(TSC)*, representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactiva.

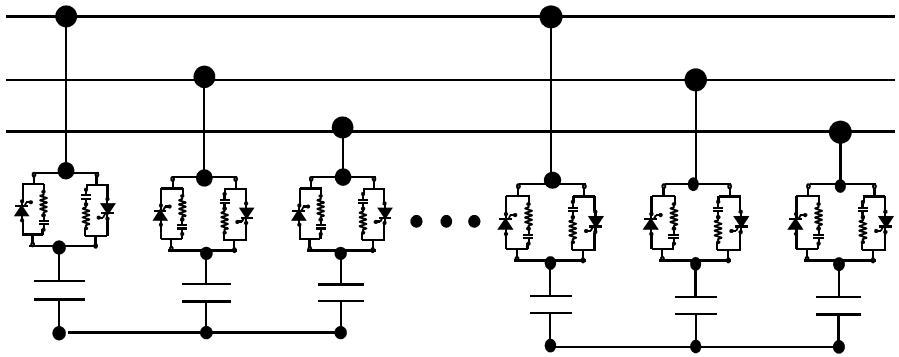
Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un condensador o batería de condensadores. Así pues, los TSC se basan en la conexión o desconexión de bancos de condensadores a la red, a través de dos tiristores conectados en antiparalelo, que actúan como interruptores bidireccionales



Esquema básico de un TSC monofásico



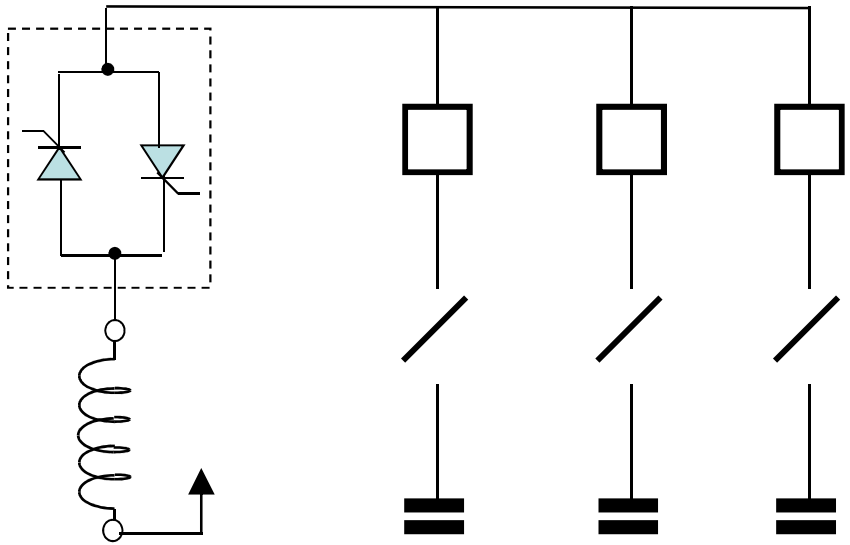
Esquema básico de un TSC monofásico con bobina



Esquema representativo de condensadores conmutados por tiristores (TSC).

SVC (**Static Var Compensators**)

- Los SVCs, se comportan como fuentes pasivas de potencia reactiva a la frecuencia fundamental. Se consigue una mejora de la calidad de la red mediante la regulación de la tensión. Su uso está justificado, especialmente, para la compensación de flicker.



Bobina conmutada por tiristores

Banco de tres condensadores mecánicamente controlados

- Típicamente un **SVC** comprende un banco de condensadores individualmente conmutados, conjuntamente con una bobina al aire, o con núcleo de hierro, controlada por tiristores. Mediante la modulación del ángulo de fase de conmutación de los tiristores, la bobina se puede conmutar de forma variable en el circuito y proporcionar así una inyección, (o absorción), continuamente variable de MVAr a la red eléctrica.

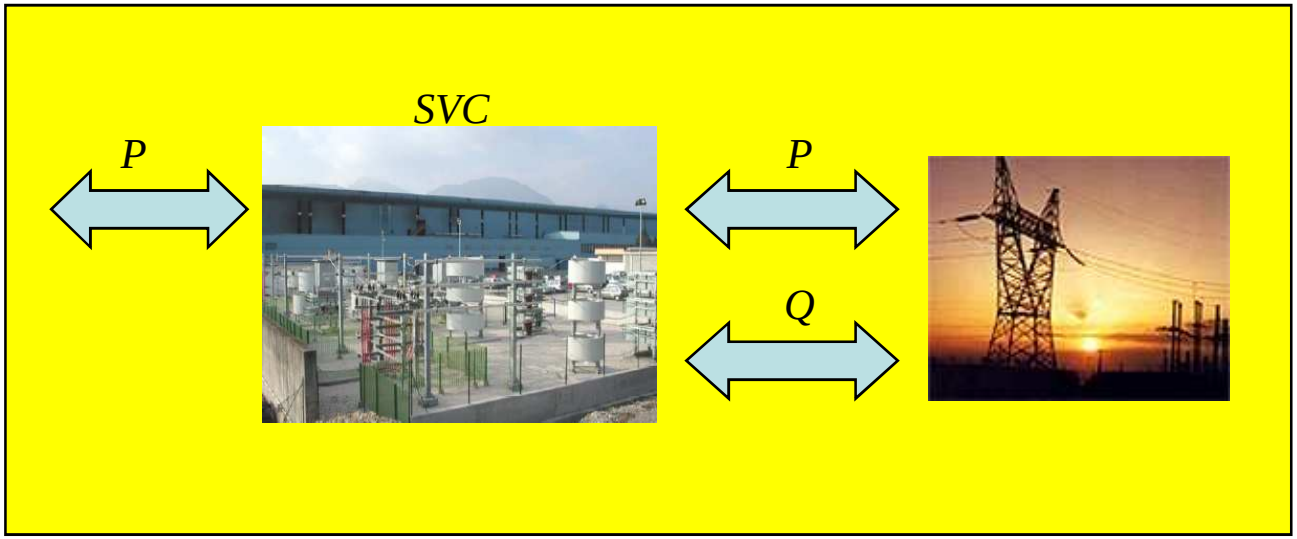
SVC (**Static Var Compensators**)

- **Static Var Compensator (SVC).** Es uno de los dispositivo FACTS más importantes y se ha usado a lo largo de los años para mejorar economicamente las líneas de transporte resolviendo problemas de tensión dinámica. La precisión, disponibilidad y rápida respuesta, permite al SVC proporcionar un mejor funcionamiento en régimen permanente y en el control de la tensión transitoria si se compara con las clásicas compensaciones derivación. Los SVCs se usan también para amortiguar las oscilaciones de potencia, mejorar la estabilidad transitoria y reducir las pérdidas del sistema mediante la optimización del control de la potencia reactiva.

- Cuando un **SVC** se interconecta a un sistema de transporte, tiene que:
  (i) funcionar a la frecuencia de la línea, y
  (ii) Producir un conjunto de tensiones senoidales equilibradas.

Entonces, un **SVC** acoplado a un sistema de transporte, tiene sólo **dos grados de libertad controlados-** puede variar la magnitud y el ángulo de fase de su tensión de salida relativa a la tensión del sistema.

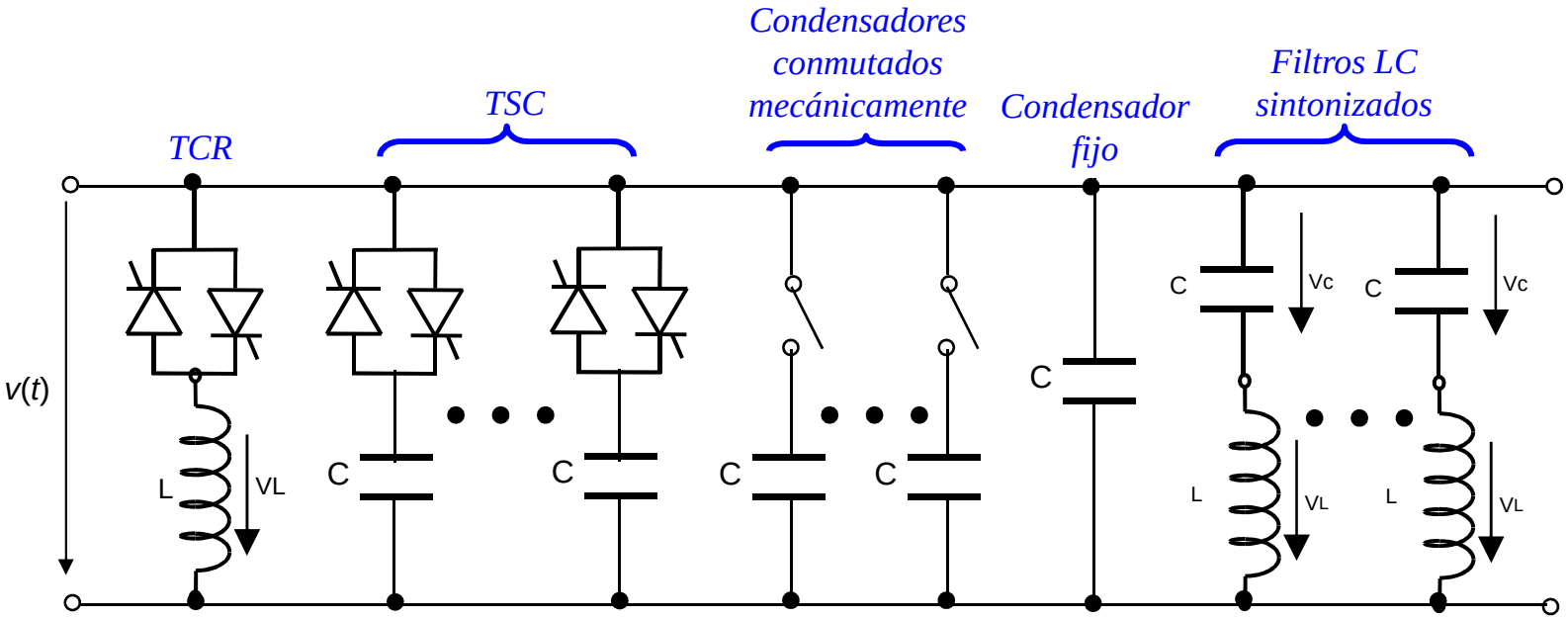
SVC (**Static Var Compensators**)



Intercambio de P y Q a través de un SVC conectado a una línea de transporte

- Los dos grados de libertad del SVC se pueden planificar para controlar el libre intercambio de potencia activa y reactiva con el sistema de transporte. La cantidad de potencia reactiva intercambiada está limitada únicamente por la capacidad de corriente de los interruptores del convertidor y por la capacidad de los condensadores y bobinas que conformen en SVC, mientras que la potencia activa tiene que ser suministrada desde la línea, como se muestra simbólicamente en la figura.

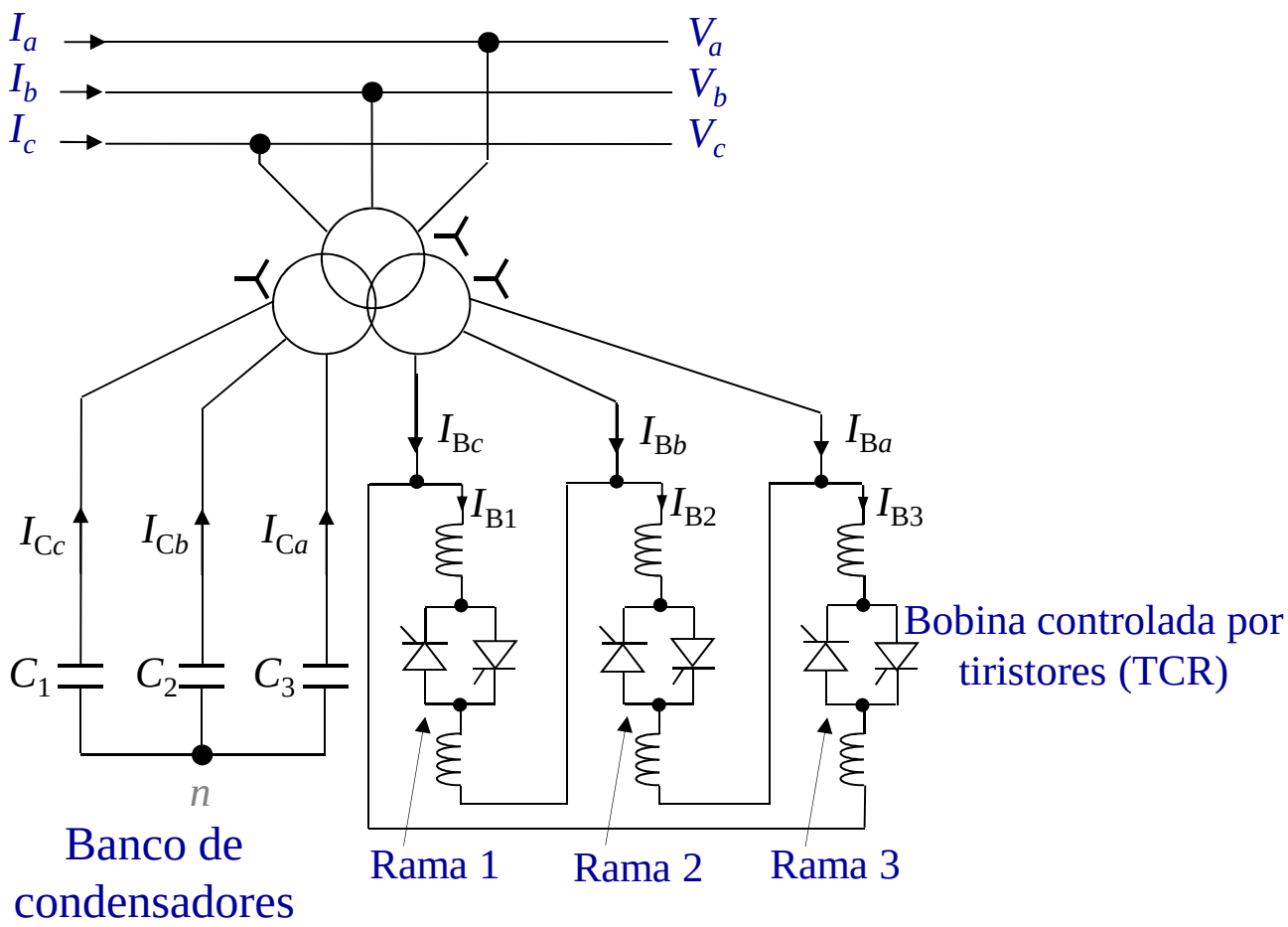
SVC (**Static Var Compensators**)



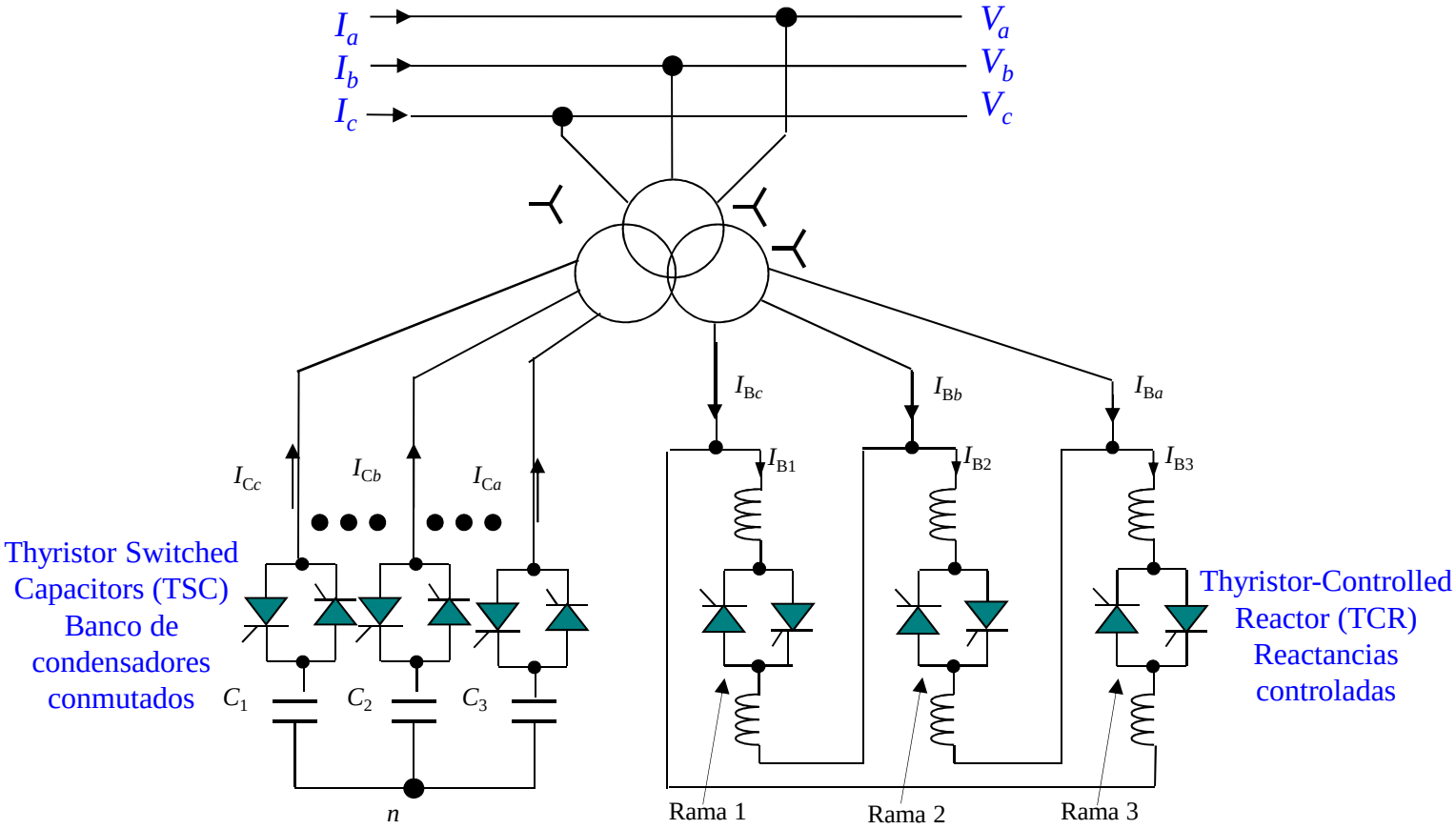
Esquema eléctrico por fase de un SVC

- En general un SVC puede estar compuesto por todos o algunos de los elementos mostrados en la figura . De esta forma, el SVC tiene un comportamiento capacitivo o inductivo en función del estado de operación de las distintas unidades de capacidad: TSC o bancos de condensadores controlados mecánicamente y TCR, así como de la dimensión de los condensadores fijos, ya sea en bancos de condensadores o filtros LC.
- La utilización de unidades TSC en paralelo con el TCR permite disminuir su inductancia para el funcionamiento capacitivo, ya que el TCR sólo tendría que cubrir el salto de reactiva entre dos escalones del TSC. Al reducir el tamaño del TCR también disminuirían los armónicos inyectados por éste a la red.

SVC (**Static Var Compensators**)



SVC (**Static Var Compensators**)



SVC (**Static Var Compensators**)

- El control grueso de tensión está proporcionado por los condensadores, mientras que las bobinas controladas por tiristores proporcionan el control fino. Conmutando la bobina dentro del circuito se inyectan armónicos impares no deseados y normalmente son los bancos de filtros de alta potencia los que proporcionan una forma de onda suave. Ya que los filtros en si mismos son capacitivos, ellos también contribuyen a la inyección de MVAr en la red. La inclusión de filtros LC, ya sea sintonizados a un determinado armónico o bien paso-bajo, sirven para evitar que parte de los armónicos generados en el TCR se transmitan a la red. Con objeto de reducir los armónicos emitidos por el SVC también se pueden emplear estrategias como las del rectificador de 12 pulsos, dividiendo el SVC en dos y conectando cada parte a un transformador YY e YD.

- Un controlador en lazo cerrado proporciona la regulación de tensión. Es normal disponer de un control de supervisión remota, aparte de los usuales ajustes manuales del conjunto de tensiones.

- La ventaja principal de los SVCs sobre los esquemas de compensación simple conmutada mecánicamente, es la respuesta casi instantánea de los SVCs a los cambios en la tensión del sistema. Por esta razón, a menudo operan próximos a su punto cero con el fin de maximizar las reservas de MVAr que ellos pueden proporcionar rápidamente cuando sean necesarias.

- Son en general más baratos y requieren menos mantenimiento que los esquemas de compensación dinámica tales como compensadores síncronos.

SVC (**Static Var Compensators**)

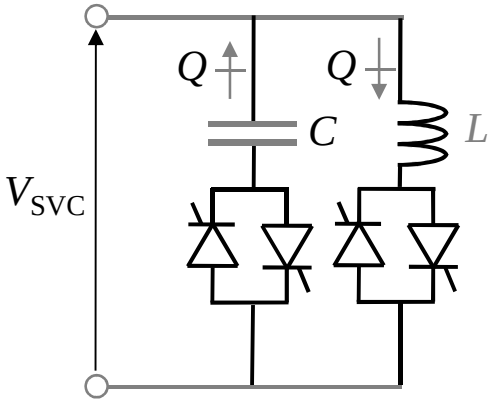
Los problemas que puede resolver la utilización de SVCs en sistemas de alta tensión son los siguientes:

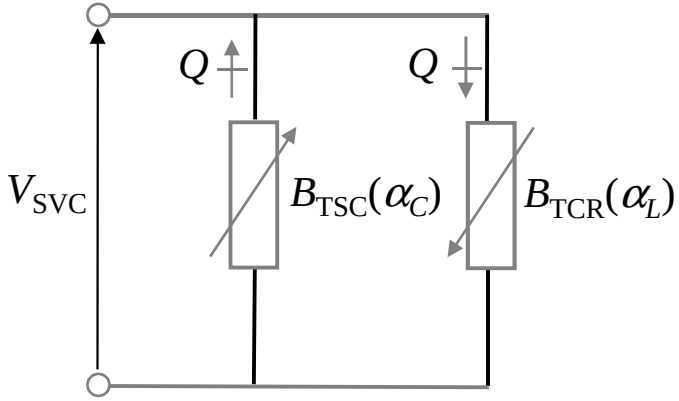
- Control de la tensión
- Control de la potencia reactiva
- Limitación de las sobretensiones provocadas por la desconexión de cargas
- Mejorar la estabilidad de los sistemas de corriente alterna
- Amortiguar las oscilaciones de potencia
- Incrementar la capacidad de transporte
- Reducción de carga por reducción de tensión
- Amortiguación de las oscilaciones subsincronas.

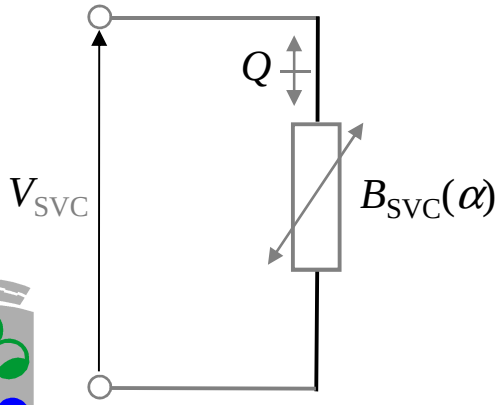
SVC (**Static Var Compensators**)

Para obtener el modelo correspondiente a un SVC, se realiza primero el análisis correspondiente a la rama del TCR para, seguidamente, realizar el análisis para la rama TSC. El análisis se realiza considerando que se han eliminado todos los armónicos; por lo que, el sistema funciona a la frecuencia fundamental.

Si sólo se considera la componente fundamental de la intensidad, se puede interpretar la variación de la intensidad con el ángulo de disparo como si se dispusiese de una susceptancia (B_{SVC}), variable función del ángulo de disparo de los tiristores α, por la que circula la componente fundamental de la corriente







$$I_{SVC} = jB_{SVC}V$$

Where:

$$B_{SVC} = B_{TSC} - B_{TCR} = \frac{X_L - \frac{X_C}{\pi}\left[2(\pi-\alpha)+\sin 2\alpha\right]}{X_C X_L}$$

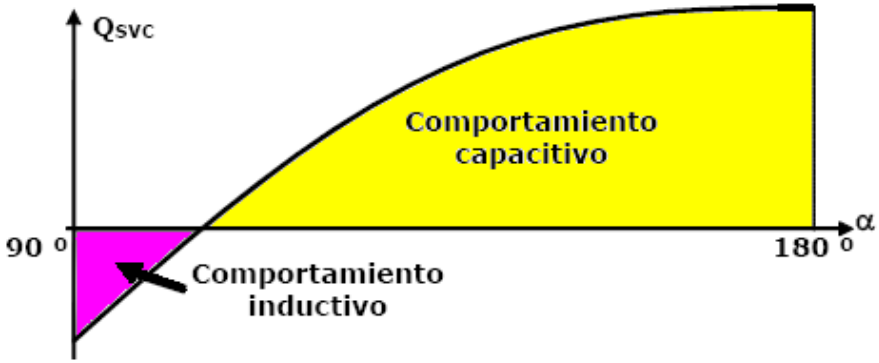
$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Siempre que el SVC por construcción sea equilibrado y su funcionamiento también lo sea, entonces solamente tiene interés la representación de la componente de secuencia directa, la cual sirve también como modelo representativo de un SVC monofásico.

SVC (**Static Var Compensators**)

El comportamiento de un SVC se puede aproximar al de una susceptancia variable con un valor que depende del estado de funcionamiento del SVC, o sea, de los condensadores conectados y del ángulo de disparo de los tiristores del TCR



Evolución de la potencia reactiva generada por el SVC en función del ángulo de disparo (α)

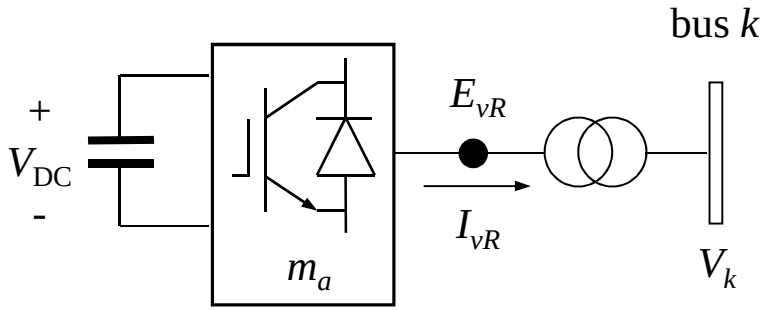
La potencia reactiva Q_{SVC} generada por el SVC se puede obtener del balance:

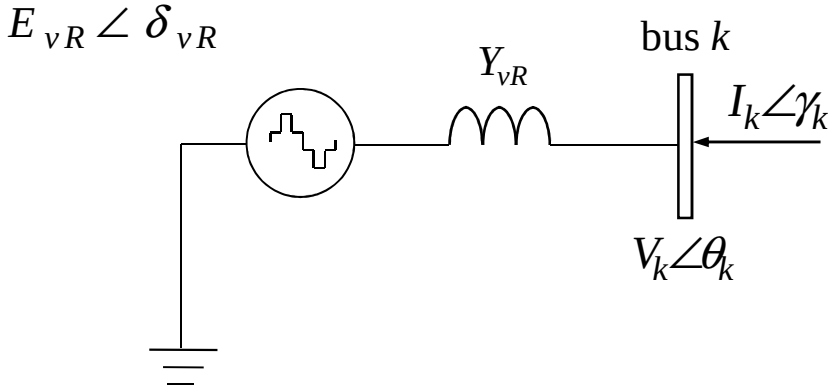
$$Q_{SVC} = Q_C - Q_{Le}$$

Donde, Q_C es la potencia reactiva generada por los condensadores conectados y Q_{Le} la potencia reactiva consumida por el TCR en función del ángulo de disparo (en este término se incluiría la potencia de las reactancias adicionales en uso).

SVC conectado a la red

Para realizar análisis de flujos de carga, los primeros modelos consideraban al SVC como un generador detrás de una reactancia inductiva, la cual se tiene en cuenta para la característica de regulación de tensión del SVC.



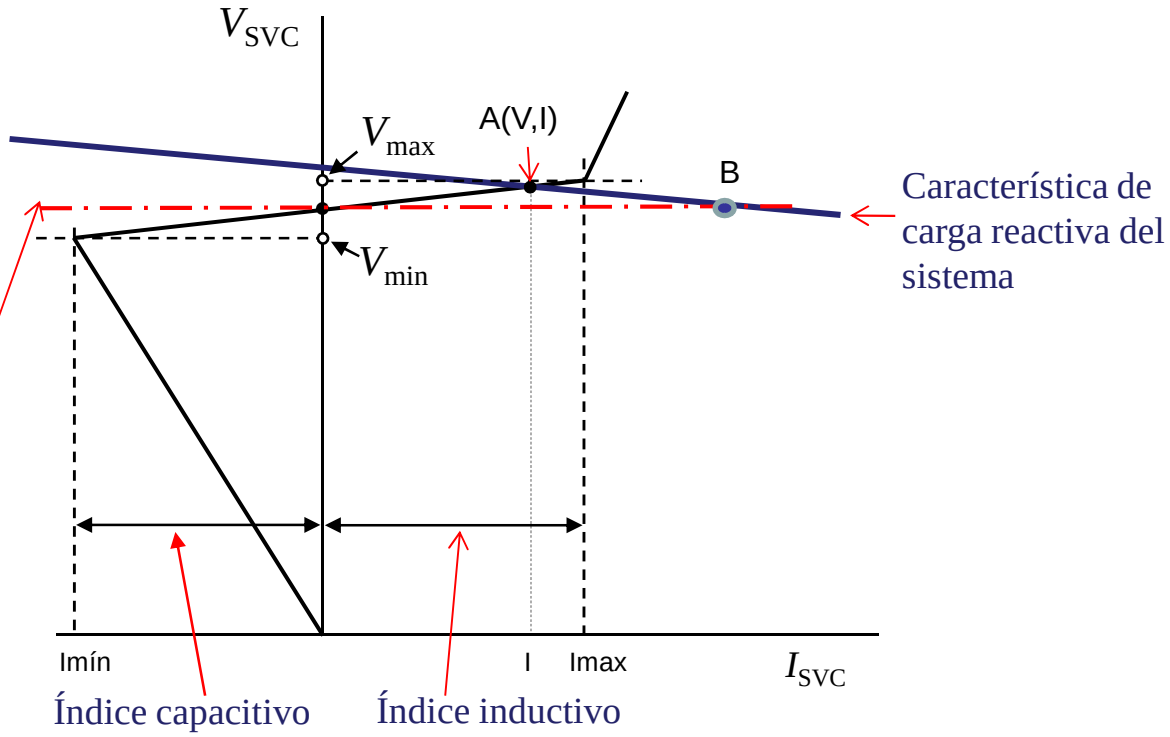


VSC conectado a una red de corriente alterna mediante un transformador conectado en paralelo.

SVC conectado a una red

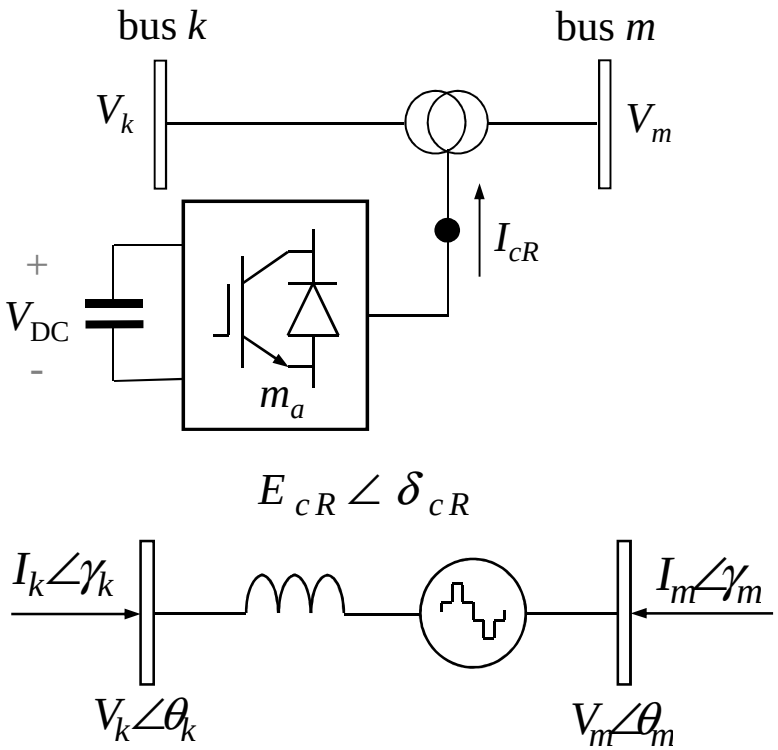
En la figura, se pueden ver las áreas típicas de funcionamiento del SVC. Dado que el SVC se basa en componentes pasivos de un cierto valor nominal, su máxima corriente reactiva es proporcional a la tensión de red.

Una representación más simple, supone que la pendiente del SVC es cero, lo cual puede ser tanto más aceptable cuanto más el SVC funcione dentro de sus límites de diseño, pero puede conducir a errores importantes si el SVC funciona fuera de sus límites. Esto se puede ver en la figura, cuando el sistema funciona bajo condiciones de carga baja, ya que si la pendiente es cero entonces el generador violará sus limites, punto B. Sin embargo, funcionará bien dentro de sus límites si se tiene en cuenta la pendiente tensión-corriente del SVC, punto A.



Característica tensión-corriente de un SVC con el sistema en carga

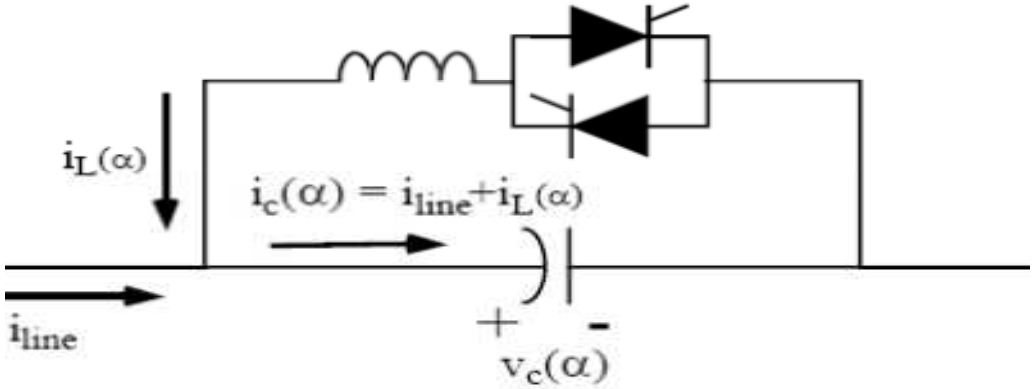
SVC (**Static Var Compensators**)



VSC conectado a una red de corriente alterna mediante un transformador conectado en serie

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)

- **Thyristor controlled series compensators (TCSCs)** son una extensión de los condensadores serie convencionales a los cuales se le añade una reactancia controlada mediante tiristores. El colocar una reactancia controlada en paralelo con un condensador serie permite una variación rápida y continua de la compensación serie del sistema.



TCSC Power Circuit

- El circuito de potencia básico para el TCSC es simple. Dispone de un circuito separado para cada fase con el control necesario. Los elementos básicos del TCSC son:
  - **Circuito de potencia para el convertidor de potencia**
  - **Sincronización y control de puerta**
  - **Lazos de control.**

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)

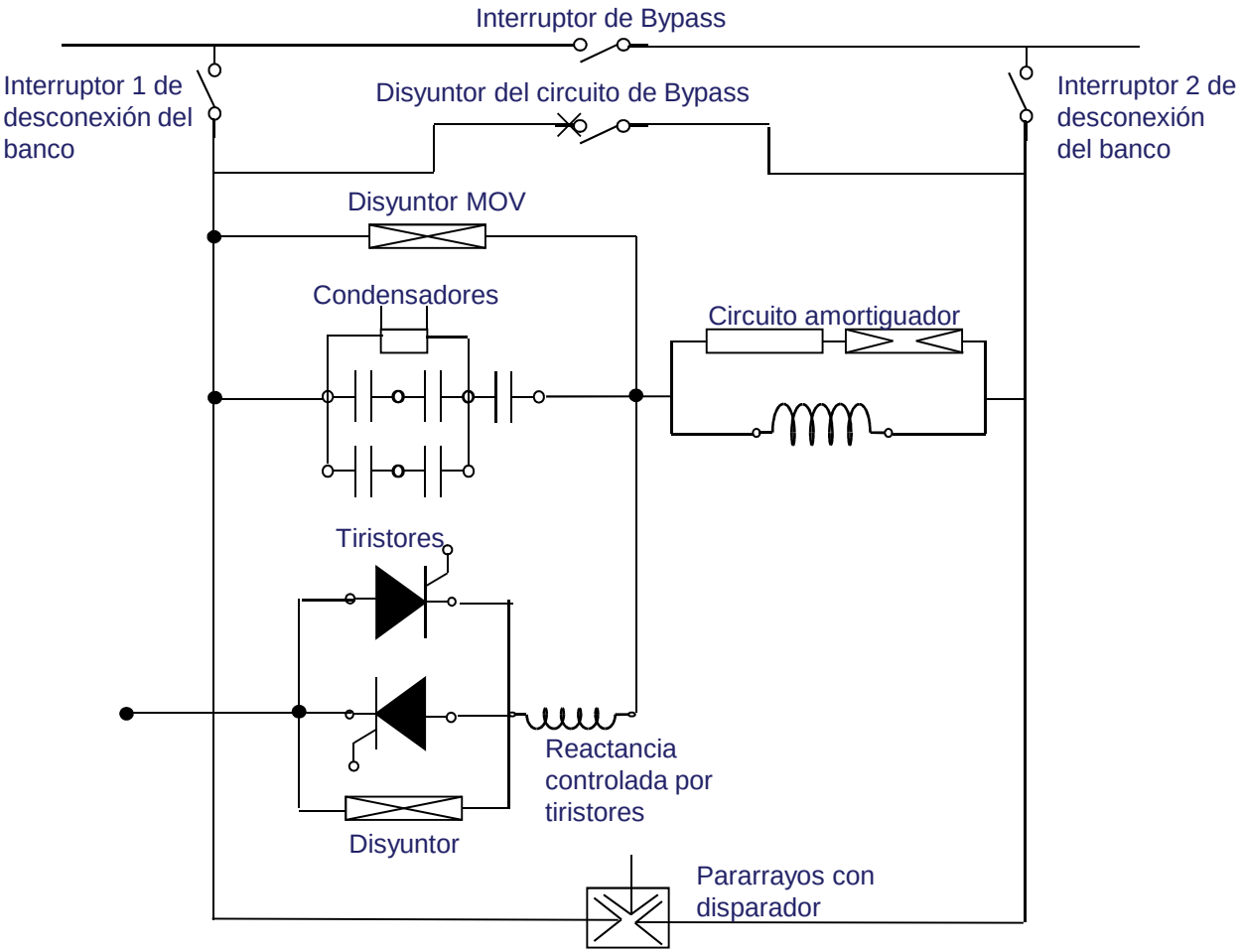
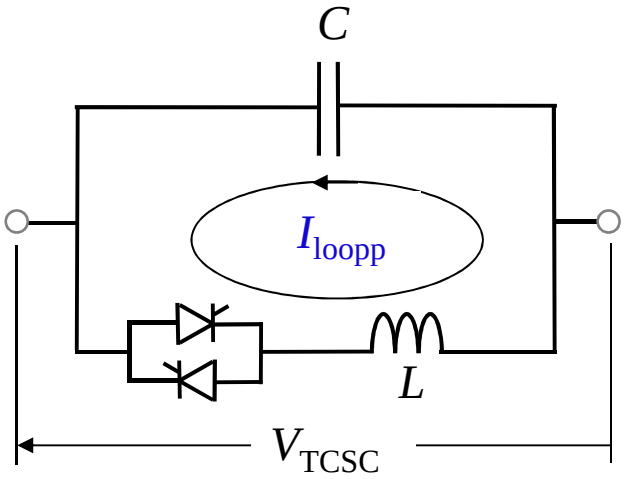


Diagrama por fase de un TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)



Thyristor-Controlled Series Compensator (TCSC)

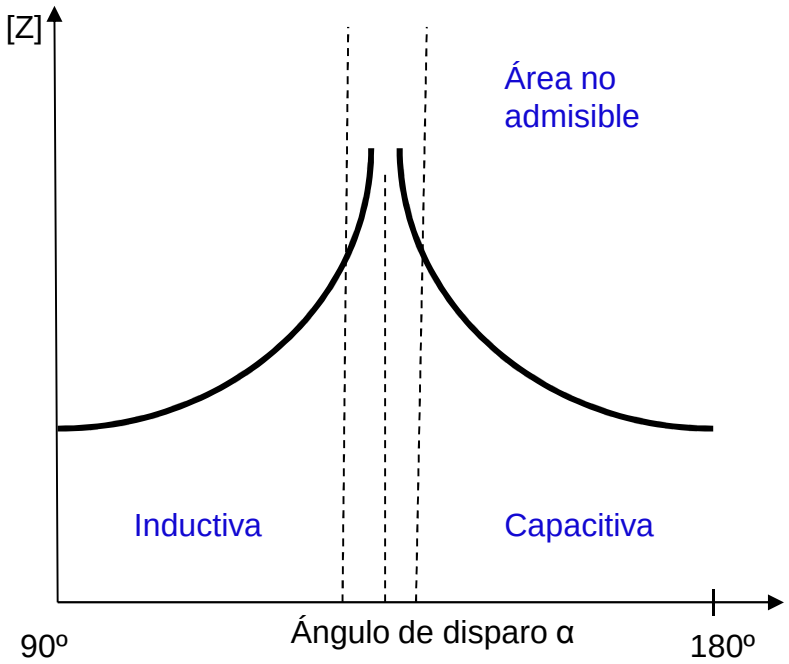


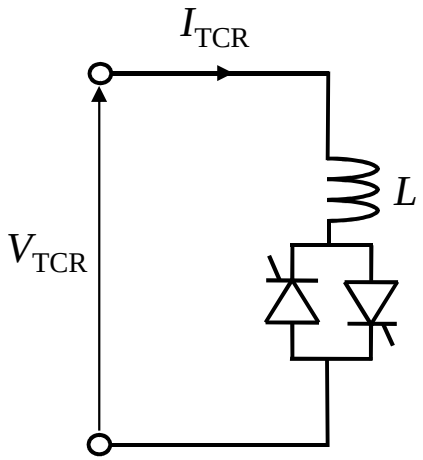
Diagrama de funcionamiento de un TCSC

El TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*, proporciona un control continuo de la impedancia de la línea de transporte ofreciendo algunas ventajas sobre las instalaciones convencionales de condensadores fijos en serie. Entre estas ventajas, se pueden citar las siguientes:

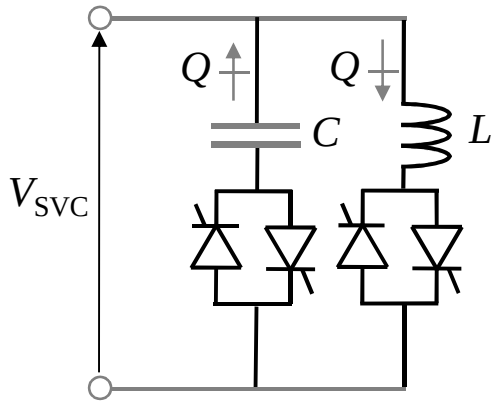
- Control continuo del nivel de compensación deseado
- Control directo y suave del flujo de potencia en la red
- Mejora la protección del banco de condensadores
- Mitigación local de las oscilaciones subsíncronas (SSR). Esto permite altos niveles de compensación en redes donde las interacciones con las vibraciones torsionales turbina-generador o con otro control o sistema de medida se han de tener en cuenta.
- El amortiguamiento electromecánico (0,5-2 Hz) de las oscilaciones de potencia que aparecen a menudo entre áreas de una gran red de potencia interconectada. Estas oscilaciones son debidas a la dinámica de la potencia interárea transferida y exhiben a menudo un amortiguamiento pobre cuando la agregación de potencia transferida sobre un corredor es elevada en relación con la capacidad de transmisión.

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)

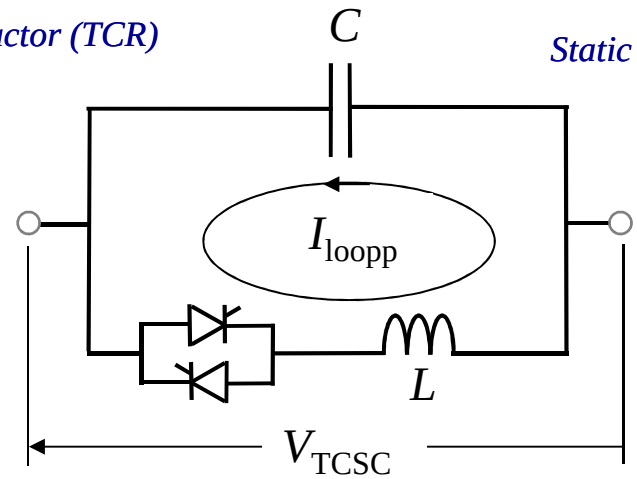
Representación de los controladores FACTS basados en tiristores convencionales



Thyristor-Controlled Reactor (TCR)



Static VAR Compensator (SVC)



Thyristor-Controlled Series Compensator (TCSC)

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)

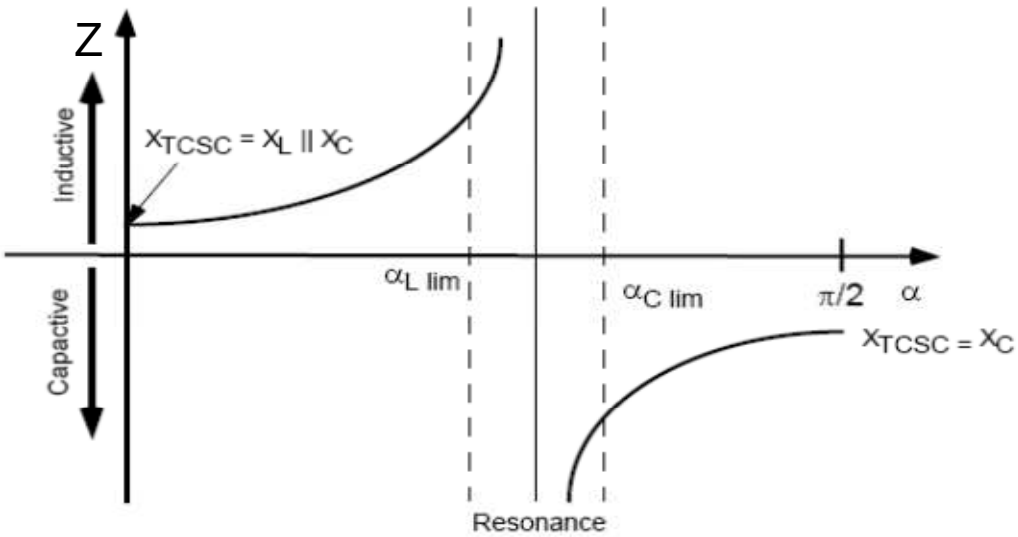
La impedancia efectiva es:

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C}$$

Donde:

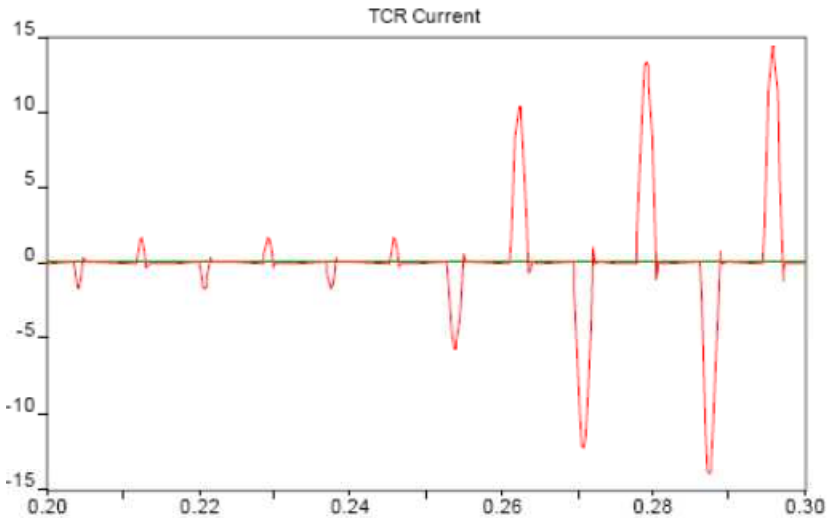
$$X_L(\alpha) = X_L\left(\frac{\pi}{\pi - 2\alpha - sin(2\alpha)}\right)$$

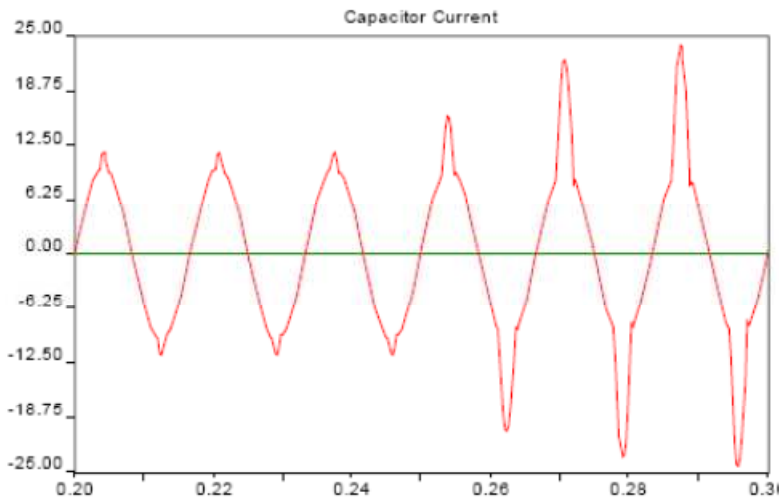
Y α es el ángulo de encendido medido desde el valor de pico de Vc .



Característica del TCSC. Impedancia en función del ángulo de encendido

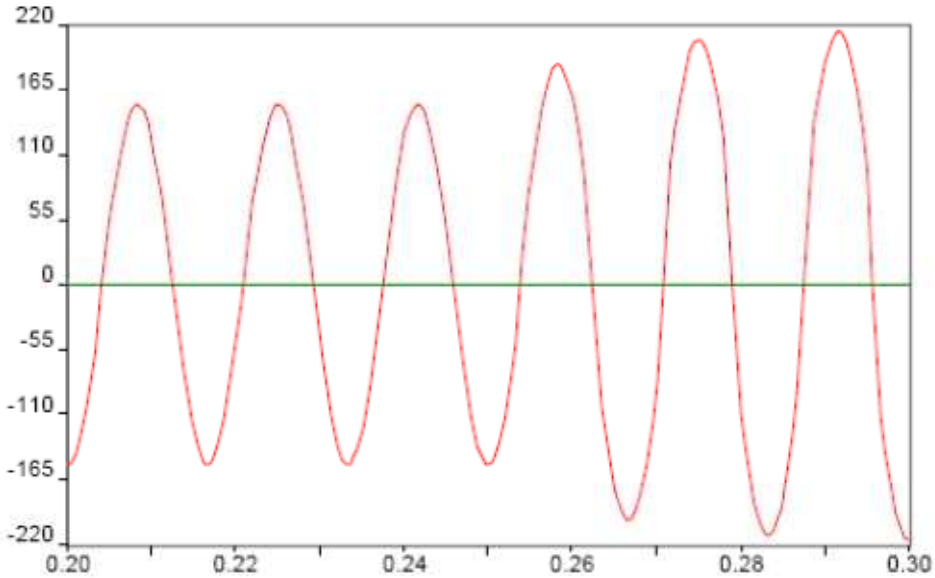
TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)





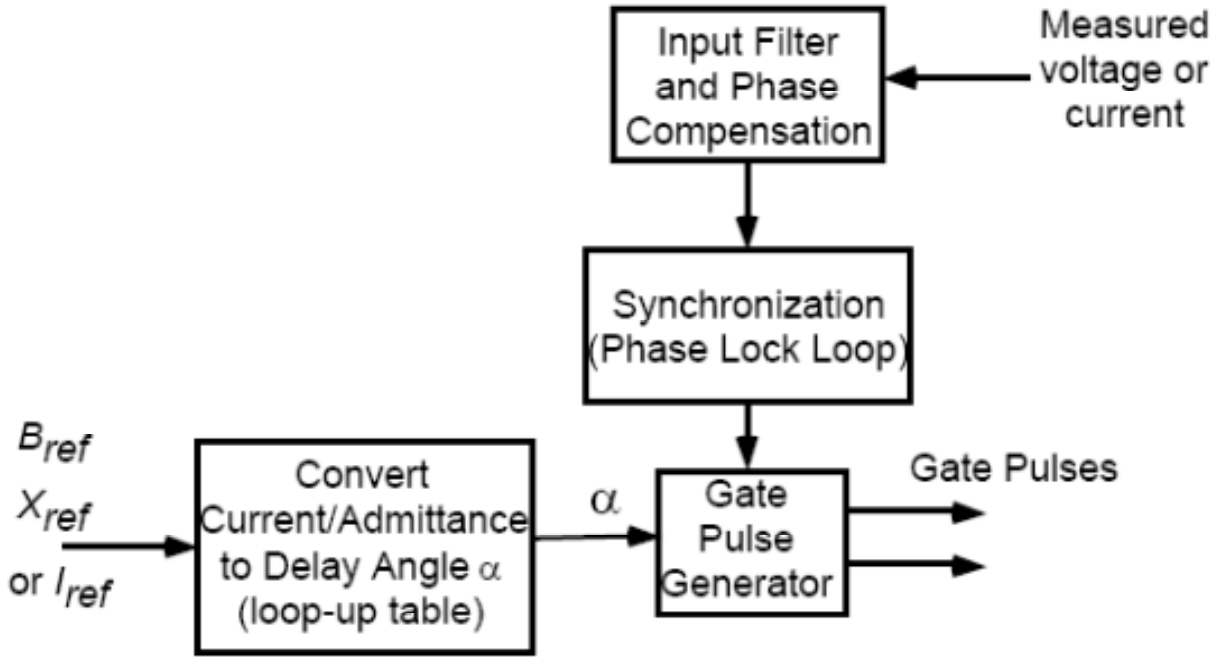
Formas de onda típicas de un TCSC

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)



Forma de onda típica de un TCSC

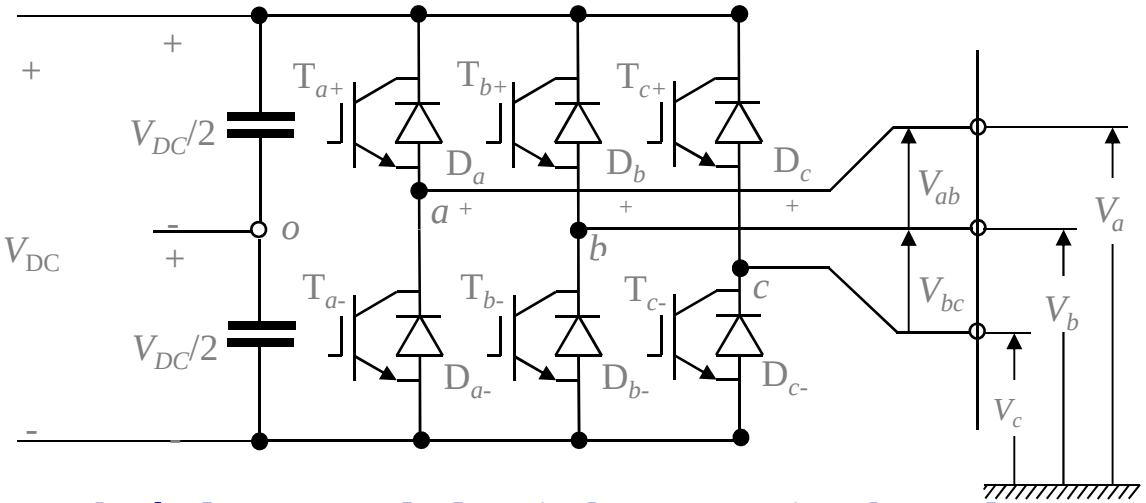
TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator)



Esquema del control interno del TCSC

- Un "Thyristor controlled series compensator TCSC " se diseño en el año 2000 para una mejor utilización del sistema eléctrico de la India. El sistema FACTS fue instalado sobre la líínea de 400kV, 395km, Kanpur- Ballabgarh. Kanpur-Ballabgarh y Kanpur-Agra son líneas de 400kV lines en la red Noroeste de UP que transportan alrededor de 800MW de potencia desde el anillo de Singrauli y Rihand al Oeste de UP y Rajasthan.

VSC (**Voltage-Sourced Converter**)



Topología de un VCS de dos niveles convencional usando IGBTs

Voltage-sourced Converters (VSCs). Se trata de convertidores de seis pulsos que están constituidos por seis semiconductores de potencia controlados y diodos en anti-paralelo. A partir de una fuente de tensión de corriente continua (DC), el VSC genera un conjunto de tensiones trifásicas de salida controladas a la frecuencia de la tensión del sistema. Para el encendido de los semiconductores se utiliza un control pulse width modulation (PWM), generando una onda seno "promedio". El control PWM también ayuda a mitigar la cantidad de armónicos.

VSC (**Voltage-Sourced Converter**)

- En los últimos años, la tecnología **Voltage Sourced Converter (VSC)** ha hecho progresos significativos a través del desarrollo y mejora de semiconductores de alta potencia de apagado controlado, tales como GTOs, IGBTs, y GCTs. Debido a sus ventajas sobre los convertidores de conmutación natural en sus características de funcionamiento y compacidad, se han utilizado en diferentes aplicaciones de convertidores basados en la tecnología VSC. La disponibilidad, ampliamente difundida, de esta tecnología a niveles prácticos de MVA ha sido ilustrada en numerosas referencias de aplicaciones actuales.

- Existen varias topologías **Voltage Sourced Converter (VSC)** usadas normalmente en el funcionamiento de los actuales sistemas de potencia. Los puntos comunes de estas topologías, son:

  1. Minimizar las pérdidas de conmutación de los semiconductores dentro del VSC.
  2. Producir una onda de tensión sinusoidal de alta calidad sin necesidad de filtrado o con una necesidad mínima.

VSC (**Voltage-Sourced Converter**)

Comparación de las topologías VSC

Topología	*Ns*	*Nc*	Comentarios
VSC de tres ramas con condensador DC simple	6	1	Usa el menor número de isemiconductores de potencia y un sólo condensador en DC. Sin embargo, no puede compensar corrientes de secuencia homopolar en los sistemas de distribución de cuatro hilos. Puede compensar la carga trabajando en sistemas trifásicos de tres hilos.
VSC de tres ramas con condensador de DC dividido y neutro	6	2	Puede compensar el desequilibrio de las corrientes de carga en sistemas trifásicos de cuatro hilos. Las corrientes de carga de secuencia homopolar inyectadas por el compensador retornarán al mismo en el punto situado en medio de los dos condensadores. Para prevenir las desviaciones en sus tensiones, la componente continua de la corriente de carga no se compensa y los condensadores tendrán que reducir el rizado. Requiere el mínimo número de semiconductores de potencia pero necesita dos condensadores en la barra de continua (DC) lo cual incrementa su tamaño.
VSC de cuatro ramas	8	1	Puede compensar corrientes de carga desequilibradas que contengan componentes de continua en un sistema trifásico de cuatro hilos. Precisa dos semiconductores extra para compensar la componente de secuencia homopolar de las corrientes de carga. Para controlar estos dos semiconductores extra, se debe generar una referencia de corriente separada así como una estrategia de control de conmutación apropiada. Sin embargo precisa de un sólo condensador de DC. Como la compensación de las componentes de secuencia homopolar de las corrientes de carga se realiza en la cuarta rama y existe un sólo condensador, la tensión en el condensador DC es fácil de controlar. Una topología alternativa usando chopper y un VSC de tres ramas con condensador de DC dividido utiliza seis semiconductores pero tiene un control más complejo.

N_s: número de interruptore N_c: número de condensadores .

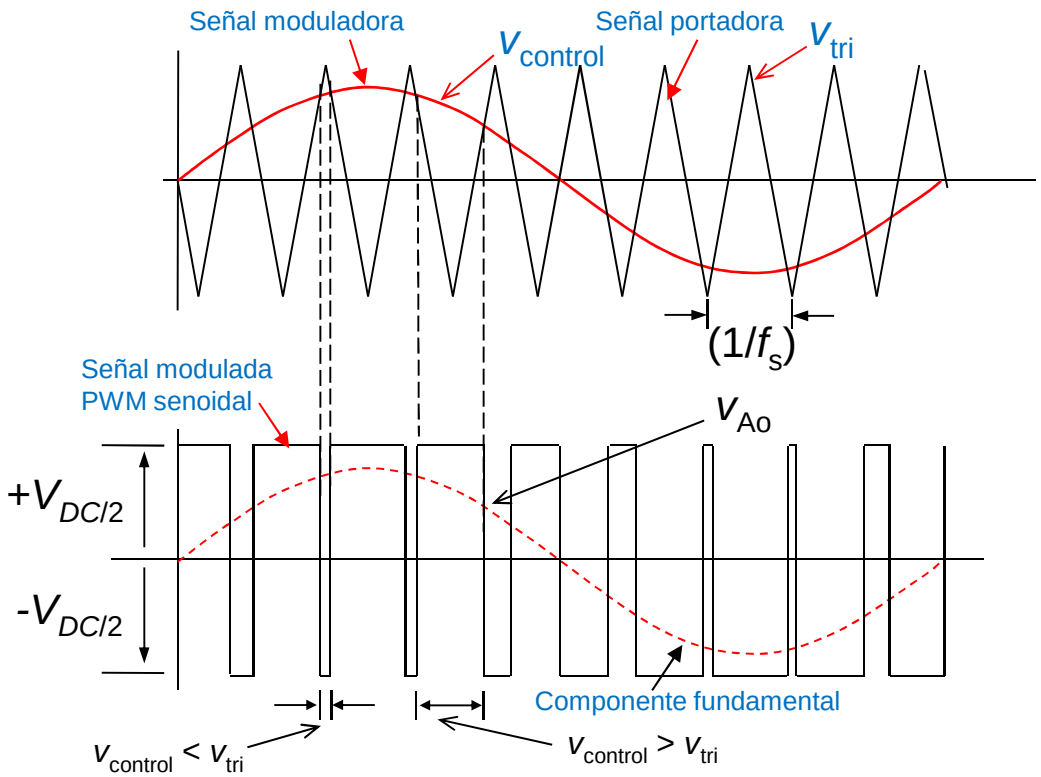
Compensadores basados en inversores PWM

- La utilización de compensadores basados en inversores PWM (*Pulse Width Modulation)*, en estos momentos, está limitada a aplicaciones de baja y media potencia, aunque esta tendencia va cambiando paulatinamente. Sus ventajas son la reducción de tamaño, peso y coste de los componentes reactivos, asimismo, se puede realizar un control de potencia reactiva más preciso y con un tiempo de respuesta más rápido; por otra parte, y debido a las altas velocidades de conmutación, no se introducen en la red componentes armónicas de baja frecuencia.

- La modulación en ancho de pulso o PWM, se basa en la comparación de una señal moduladora y una portadora para la obtención de una serie de pulsos cuadrados de una determinada frecuencia y duración variable (*"duty cycle"* variable). Mediante el filtrado de la señal modulada es posible obtener una señal con un contenido armónico muy similar al de la señal moduladora. En principio, se pueden utilizar diferentes tipos de señales moduladoras: senoidal, cuadrada, etc.

Compensadores basados en inversores PWM

La amplitud de la señal modulada es proporcional a la amplitud de la señal moduladora y la frecuencia de la componente fundamental de la señal modulada es idéntica a la frecuencia de la componente fundamental de la señal moduladora. Se denomina modulación en amplitud o índice de modulación (m_a) a la relación entre la amplitud de la señal moduladora y la portadora y varía entre 0 y 1: cuando vale 0 la tensión de salida es mínima, cuando vale 1 es máxima. Se denomina modulación en frecuencia (m_f) a la relación entre la frecuencia de la señal portadora y la moduladora. Esta relación es normalmente múltiplo de 3 y mayor que 9.



Representación esquemática de las ondas básica en un control PWM

En la base del método PWM, una señal sinusoidal de frecuencia fundamental se compara con una señal triangular de alta frecuencia; produciéndose una señal de onda cuadrada, la cual controla el disparo de los dispositivos del convertidor.

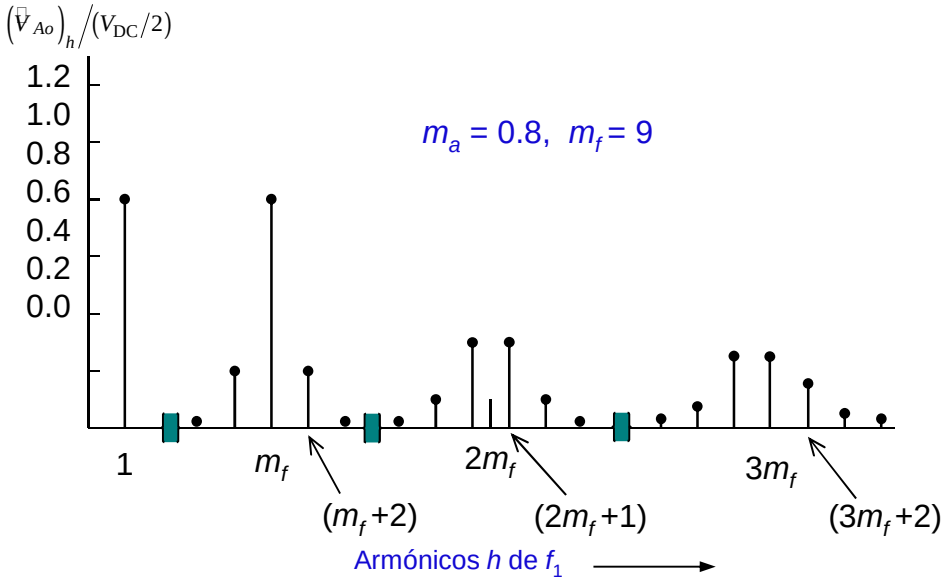
Compensadores basados en inversores PWM

El correspondiente espectro de armónicos de tensión, para el caso de m_f =9 y m_a =0,8, en forma normalizada, se muestra en la figura

Relación entre el orden del armónico y β

β	Orden del armónico
1	19, 21, 23
2	39, 41, 43, 45
3	59, 61, 63, 65, 67
4	81, 83, 85, 87
…	…
10	207, 209, 211, 213
…	…

El tercer armónico es también significativo. El armónico de orden 207 varia entre 13% y el 40% de la tensión del sistema de potencia, dependiendo de la conexión y del ángulo de fase entre los dos inversores.



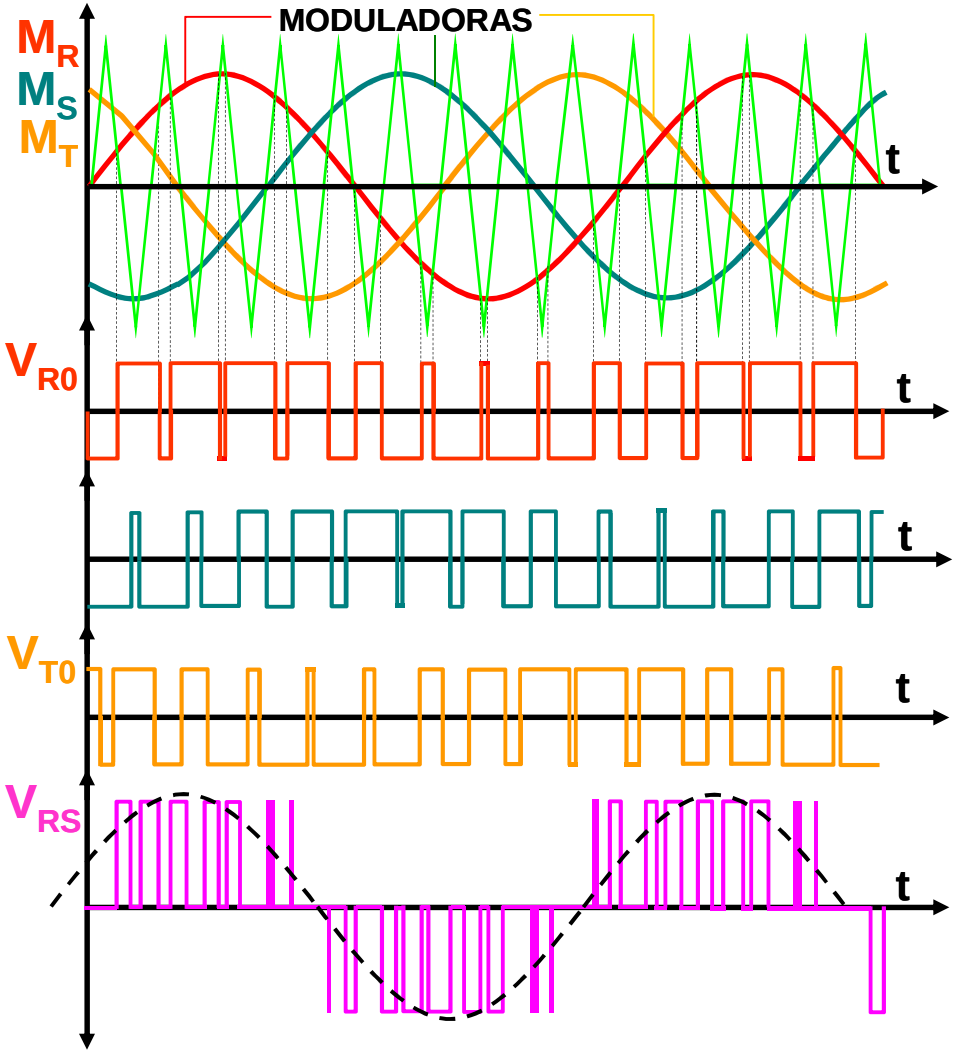
Representación del espectro de armónicos de tensión para el caso: m_f=9 y m_a=0,8.

Los armónicos PWM son generados a la frecuencia indicada por la expresión:

$$f_h = (\beta m_f \pm k) f_1$$

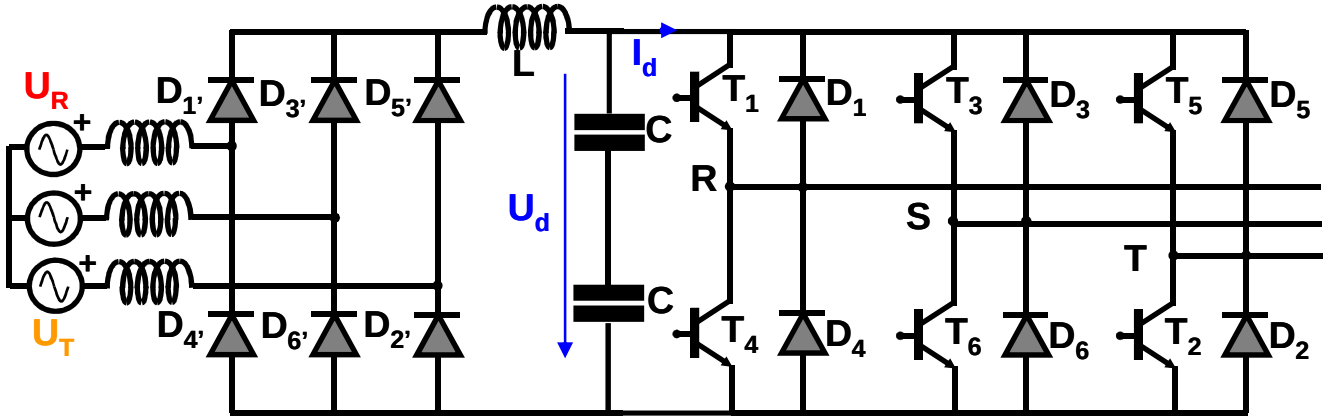
Compensadores basados en inversores PWM

La relación entre las frecuencias de la portadora y las moduladoras tiene que ser múltiplo de 3 para que se obtengan las 3 ondas trifásicas equilibradas desfasadas 120º. En inversores comerciales la modulación en frecuencia m_f suele ser un valor elevado (>9). La frecuencia de conmutación en el caso de variadores con IGBT's es típicamente de 4 – 10 kHz



Representación esquemática de las tres señales moduladas PWM desfadas 120º en un control PWM trifásico.

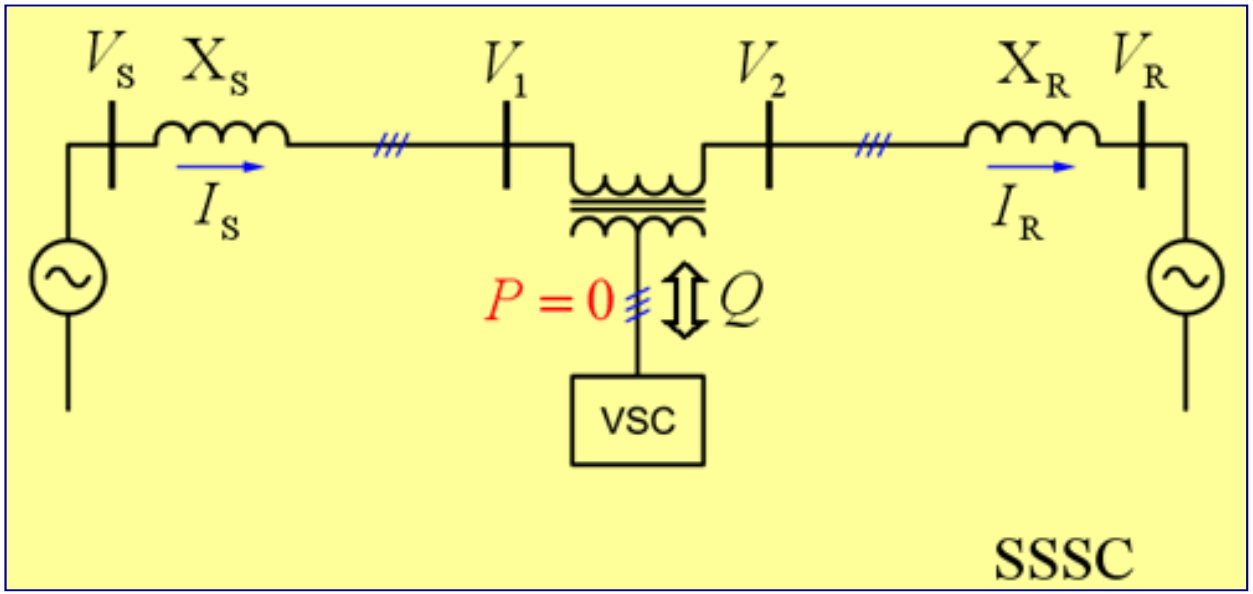
Compensadores basados en inversores PWM



Estructura de un compensador industrial con inversores PWM

T1 → T6 pueden ser transistores bipolares, MOSFET, GTO's, IGBT's o incluso tiristores con circuito de bloqueo trabajando en conmutación (actualmente suelen ser IGBT's). El orden de conducción de los semiconductores controlados es: T1 → T2 → T3 → T4 → T5 → T6 → T1 ....Las señales de disparo de los transistores se obtienen a partir de tres señales moduladas PWM desfadas 120º una para cada fase o rama de transistores (se obtienen desfasando 120º la moduladora). Cuando la señal es positiva conduce el transistor de la parte superior y cuando es negativa lo hace el de la parte inferior. La tensión de salida es idéntica a la señal modulada PWM utilizada para el disparo de los semiconductores controlados. Sus valores máximo y mínimo son respectivamente Ud/2 y –Ud/2. La frecuencia de la moduladora determina la frecuencia de la tensión de salida del inversor. La amplitud y frecuencia de la tensión de salida se ajustan variando la amplitud y la frecuencia de la señal moduladora. La frecuencia de la portadora determina la frecuencia de conmutación de los transistores

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)



SSSC – Un VSC interconectado en serie a una línea de transporte

- El Static Synchronous Series Compensator (SSSC) usa un VSC interconectado en serie a una línea de transporte, como se muestra en la Figura.

- La potencia activa intercambiada con la línea se ha de mantener a cero – entonces, en funcionamiento permanente, el SSSC es equivalente a un condensador infinito y variable conectado en serie. El SSSC ofrece un control rápido y es inherentemente neutral a la resonancia síncrona.

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

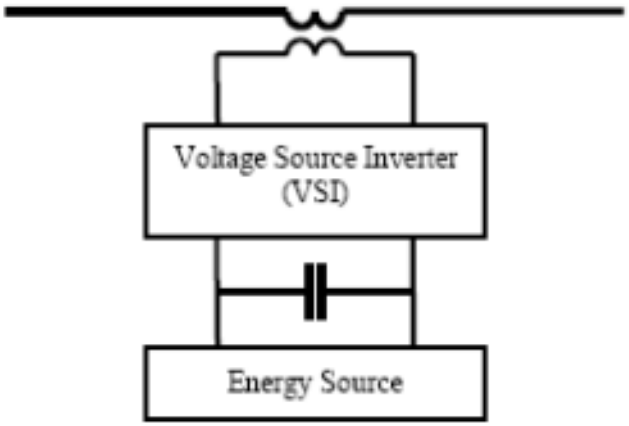


Fig. 1. Basic configuration of SSSC

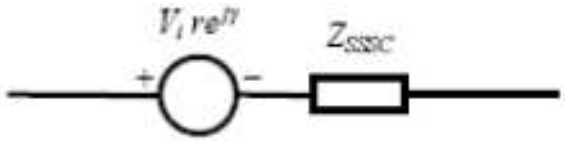


Fig. 2. Equivalent circuit of SSSC

- Este dispositivo trabaja de la misma forma que el STATCOM. Esta compuesto por un convertidor en fuente de tensión conectado en serie con la línea de transporte a través de un transformador. Es necesaria una fuente de energía para proporcionar una tensión continua en los bornes del condensador y compensar las pérdidas del VSC.

- La Fig. 2 muestra el modelo del **SSSC** el cual consiste en una fuente de tensión serie conectada en serie con una impedancia. Esta impedancia representa la impedancia de acoplamiento del transformador .

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

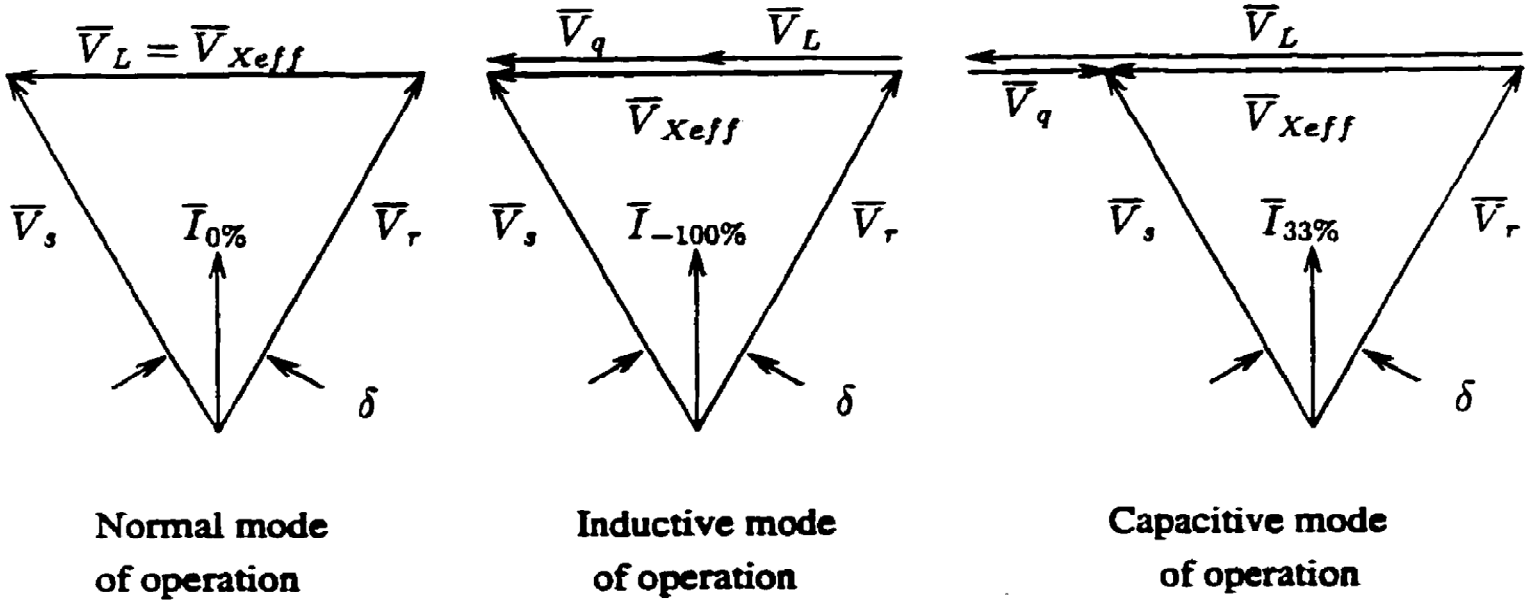
- Un SSSC podría ser capaz de intercambiar potencia activa y reactiva con el sistema de transporte. Pero si nuestra intención es solo equilibrar la potencia reactiva, la fuente de energía podría ser pequeña. La tensión inyectada se puede controlar tanto en magnitud como en fase si disponemos de una fuente de energía suficientemente grande para este proposito. Con la compensación de potencia reactiva solamente es controlable la tensión, porque el vector tensión forma 90º con la intensidad de la línea. En este caso, la inyección serie de la tensión puede retrasar o adelantar la corriente de línea. Esto significa que el SSSC se puede controlar uniformemente en cualquier valor, dentro del margen de trabajo del VSC.

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

- Cuando el **SSSC** cuenta con un suministro de CC apropiado (una fuente de energía y/o sumidero, o un almacenamiento de energía adecuado) puede inyectar una componente de tensión en oposición con la tensión desarrollada a través de la resistencia de línea, para compensar el efecto de la caída de tensión resistiva del sistema de transporte. La capacidad del **SSSC** para intercambiar tanto potencia activa como reactiva hace posible compensar las caídas de tensión tanto en la resistencia como en la reactancia manteniendo una relación efectiva X/R independientemente del grado de la compensación serie.

- Así, un **SSSC** puede trabajar como un condensador serie controlable y una reactancia serie. La principal diferencia es que la tensión inyectada a través de un **SSSC** no está relacionada con la intensidad de la línea y se puede controlar independientemente. Este es un hecho importante ya que significa que el **SSSC** se puede usar, con excelentes resultados, tanto con cargas bajas como con cargas elevadas.

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)



Modos de funcionamiento Inductivo y Capacitivo

- Las Figuras muestran un ejemplo de un sistema de transporte simple con un **SSSC** funcionando tanto en modo inductivo como en modo capacitivo y los correspondientes diagramas fasoriales.

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

- La línea de transporte con la reactancia inductiva X_L suministra potencia desde el terminal emisor al terminal receptor, no teniendo compensación de ninguna clase, se dice que está en estado permanente. La tensión en la reactancia inductiva es la misma que la caída de tensión a lo largo de la línea no compensada porque el grado de compensación serie es cero.

- La reactancia de la línea es constante y añadiendo la la reactancia (inductiva/capacitiva) serie variable, la cantidad de compensación se puede controlar. El grado de compensación serie en este caso se define como:

$$\% \text{ compensation} = \frac{X_q}{X_L} \times 100$$

donde X_L es la reactancia inductiva de la línea y Xq es la reactancia serie emulada.

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

- En el modo de funcionamiento inductivo, la corriente de línea decrece con el nivel de incremento de la compensación de reactancia inductiva desde el 0% al 100%. En el modo de funcinamiento con compensación de reactancia capacitiva la corriente de línea se incrementa con el nivel de compensación de reactancia capacitiva desde el 0% al 33%. Como se puede ver en los diagramas vectoriales el **SSSC** no solo puede incrementar la potencia transferible sino que también puede reducirla, simplemente invirtiendo la polariada de la tensión inyectada. La tensión inversa se añade directamente a la caída de tensión en la línea como si la impedancia de línea se incrementase.

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Estos dispositivos (SSSC, DVR, SVC) corrigen la tensión cuando se tiene una falta en la red, pero también tienen una serie de ventajas en el uso normal, cuando no existen perturbaciones, entre ellas:

- Debido a la inyección continua de tensión en combinación con un controlador adecuadamente estructurado, es posible controlar el factor de potencia de las cargas conectadas.

- En las topologías de redes de distribución interconectadas, la tensión adicional con su magnitud y fase controlables, se puede usar para ajustar los flujos de potencia.

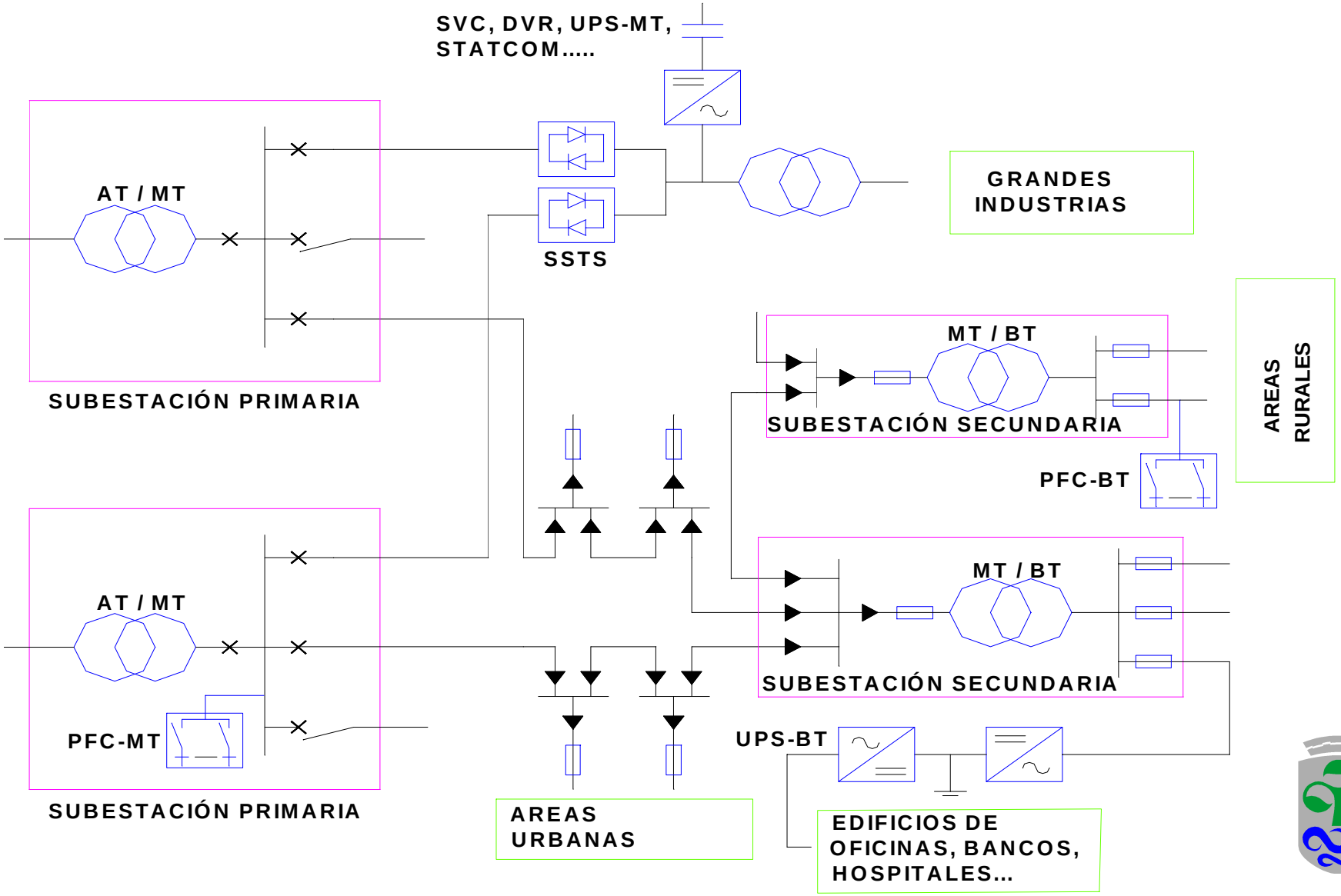
- Ello también puede ayudar para cubrir la demanda de potencia reactiva en los cables de la red, la cual es mayor que en las líneas aéreas, principalmente durante los niveles bajos de carga.

SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

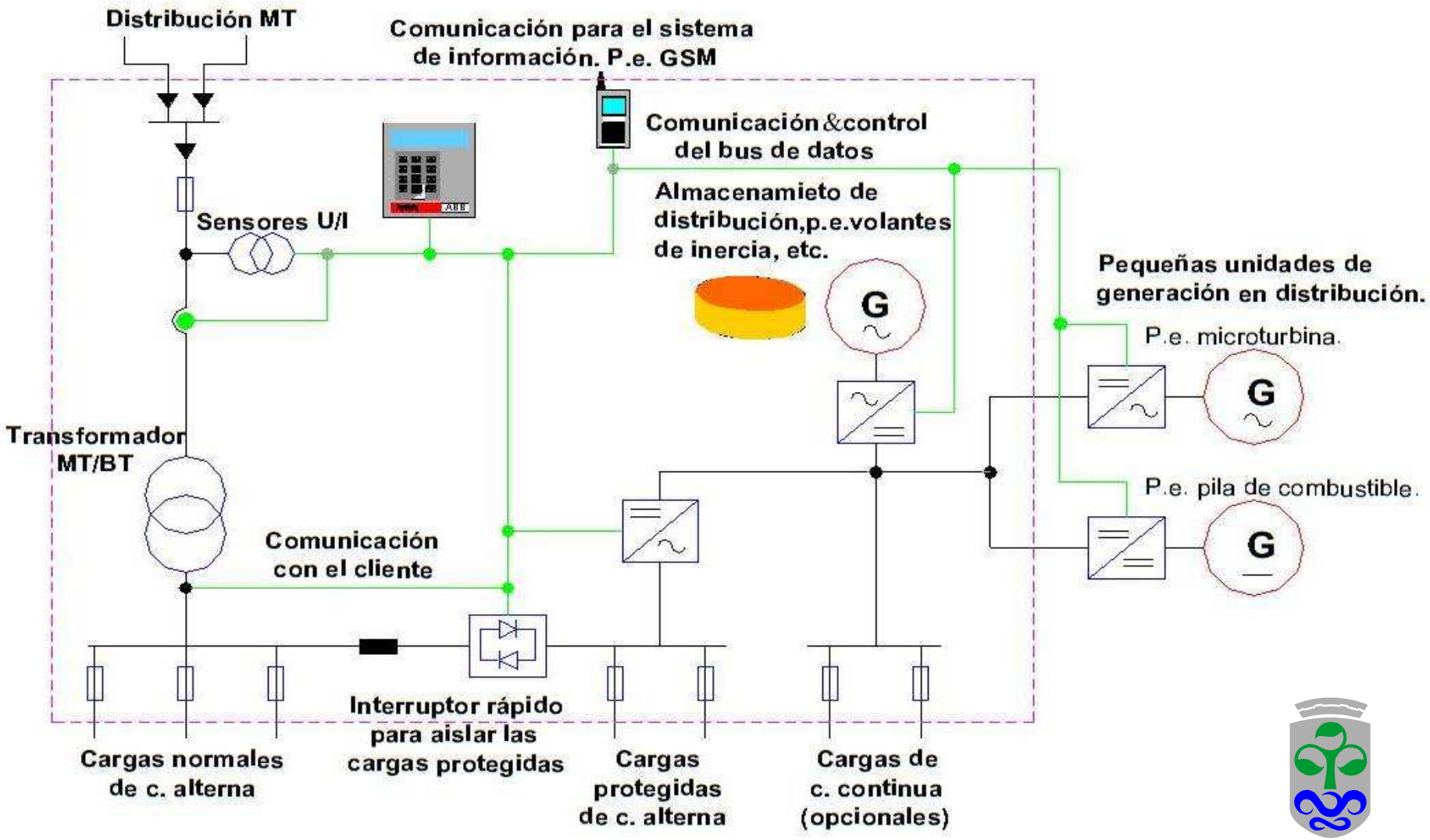
- Se equilibran las cargas en las redes de distribución interconectadas, proporcionando un equilibrio del sistema.

- Se reducen los armónicos ocasionados mediante el uso de plantas de generación distribuida al nivel de distribución de la red, mediante el filtrado activo, inyectando tensión con el convertidor en el lado de la carga.

SISTEMA DE POTENCIA CON FACTS



SISTEMA DE POTENCIA DE PRIMERA CALIDAD



AUTOMATIZACIÓN DISTRIBUIDA Y TECNOLOGÍA WEB

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DISTRIBUIDA A LA MEJORA DE LA CALIDAD DE POTENCIA		
AUTOMATIZACIÓN DE LA SUBESTACIÓN DE MT	**ATOMATIZACIÓN DEL SUMINISTRO DE MT**	**AUTOMATIZACIÓN DEL CLIENTE EN BT**
- Control y motorización de las salidas. - Condición de motorización de la subestación primaria. - Localización de la falta, aislamiento y restauración. - Control de energía reactiva y tensión.	- Control y monitorización del suministro. - Condición de motorización de la subestación secundaria - Localización de la falta aislamiento y restauración. - Control de energía reactiva y tensión. - Gran área de comunicación	- Lectura de medidas automática. - Servicio de conexión y desconexión automático. - Control de las cargas.

Tabla . Contribución de la Automatización distribuida a la mejora de la calidad de potencia