

Transporte flexible de la energía eléctrica en corriente alterna

En este artículo se presenta un grupo de dispositivos electrónicos de potencia (FACTS) que sirven para flexibilizar el transporte de la energía eléctrica en corriente alterna. Tienen la capacidad de modificar los parámetros que regulan el flujo de potencia de una línea (tensiones en los nudos, impedancia y ángulo de transporte) y se pueden utilizar para controlar la tensión en un nudo, compensar el factor de potencia de una carga o, por ejemplo, para repartir adecuadamente el flujo de potencia de varias líneas. Además, su respuesta dinámica es muy rápida y pueden contrarrestar algunas de las perturbaciones dinámicas típicas de los sistemas de transporte de energía eléctrica: oscilaciones electromecánicas, fluctuaciones rápidas de la tensión (flicker), etc.

El sistema de transporte de energía eléctrica

Los sistemas de transporte de energía eléctrica tienen como misión llevar la energía desde las unidades de generación hasta las zonas donde se distribuye para su consumo. Un fallo en el sistema de transporte que ocasione una interrupción del suministro eléctrico puede llegar a afectar a un gran número de usuarios, en algunos casos ciudades enteras. Por este motivo, la fiabilidad es una de las principales preocupaciones en la planificación y operación de los sistemas de transporte de energía eléctrica.

Normalmente, los sistemas de transporte están muy mallados, es decir, tienen múltiples conexiones entre los diferentes nudos, lo que permiten asegurar el camino de la ener-

gía eléctrica desde las zonas de generación hasta las de consumo. De esta forma se consigue, además de aumentar la fiabilidad del sistema, reducir las necesidades de generación (potencia instalada) para atender a la demanda de los usuarios. Sin embargo, un sistema muy mallado tiene inconvenientes: (a) es difícil de controlar el camino que siguen los flujos de potencia, pudiendo suceder que mientras unas líneas están cerca de su límite térmico otras apenas llevan corriente, (b) hay exceso de potencia reactiva y (c) aumenta la posibilidad de que se produzcan oscilaciones dinámicas entre generadores del sistema.

En la actualidad, por motivos tanto políticos como económicos y medioambientales, es difícil instalar nuevas líneas para aumen-



Pablo García González

Dr. Ingeniero Industrial del ICAI. Profesor Propio Adjunto de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.



Aurelio García Cerrada

Dr. Ingeniero Industrial. Profesor Propio Ordinario de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid.

tar la capacidad de transporte del sistema. Esto contrasta con el aumento del consumo y con la necesidad de dar acceso a la red a nuevos generadores (p.e. parques eólicos). La consecuencia es que cada vez se opera el sistema más cerca de su límite, lo que reduce la fiabilidad del sistema y, en consecuencia, la calidad del producto eléctrico.

Los dispositivos FACTS como alternativa

El término FACTS viene del inglés *Flexible Alternating Current Transmission Systems* que se puede traducir como Sistemas para el Transporte Flexible de la Energía Eléctrica en Corriente Alterna. Son un conjunto de dispositivos basados en la Electrónica de Potencia y que tienen la capacidad de modificar los parámetros que regulan la potencia eléctrica que va por una línea. Esto es muy útil para aumentar la capacidad efectiva del sistema de transporte, evitando los desequilibrios entre líneas y escogiendo en cada momento el camino más adecuado para los flujos de potencia.

Flujo de potencia por una línea de transporte

En la Figura 1 se presenta un esquema equivalente de una línea de transporte que une dos nudos del sistema. Para modelar la línea se han despreciado las pérdidas y se ha supuesto que no es excesivamente larga. En la figura, X es la reactancia equivalente de la línea, V_E y V_R son, respectivamente, los módulos de las tensiones en los nudos emisor (E) y receptor (R) y δ el ángulo de transporte. El nudo emisor suministra la potencia activa (P) que se consume en el nudo receptor y una potencia reactiva (Q_E) que es la suma de la que se consume en el nudo receptor (Q_R) más la que consume la propia línea.

Como indican las ecuaciones de la figura, la potencia activa (P) y las reactivas (Q_E y Q_R) dependen de la reactancia de la línea, del ángulo de transporte y de las tensiones de los nudos. En concreto la potencia activa aumenta si se reduce la reactancia de la línea o si se aumenta el ángulo de transporte, la influencia de las tensiones en los nudos es menos significativa habida cuenta de que en el sistema de transporte las tensiones en los nudos deben de ser siempre próximas a sus valores nominales.

Por otro lado, el módulo de la tensión en los nudos depende de la potencia activa y de la reactiva. Sin embargo, como se ilustra en diagrama vectorial de la Figura 1, la caída de tensión del nudo emisor al receptor está asociada, fundamentalmente, a la potencia reactiva, mientras que la potencia activa provoca variaciones de ángulo.

Ejemplos de aplicación de los dispositivos FACTS

EJEMPLO 1

En la Figura 2 se presenta un ejemplo de aplicación de dispositivos FACTS en un sistema

Figura 1. Flujo de potencia por una línea de transporte de energía eléctrica

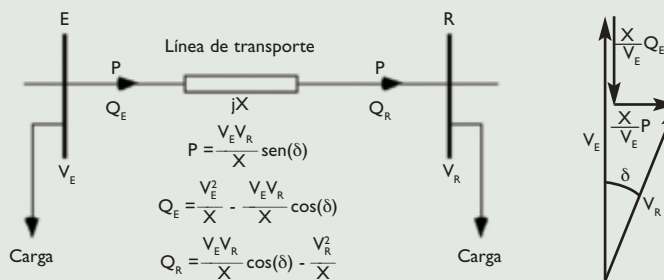
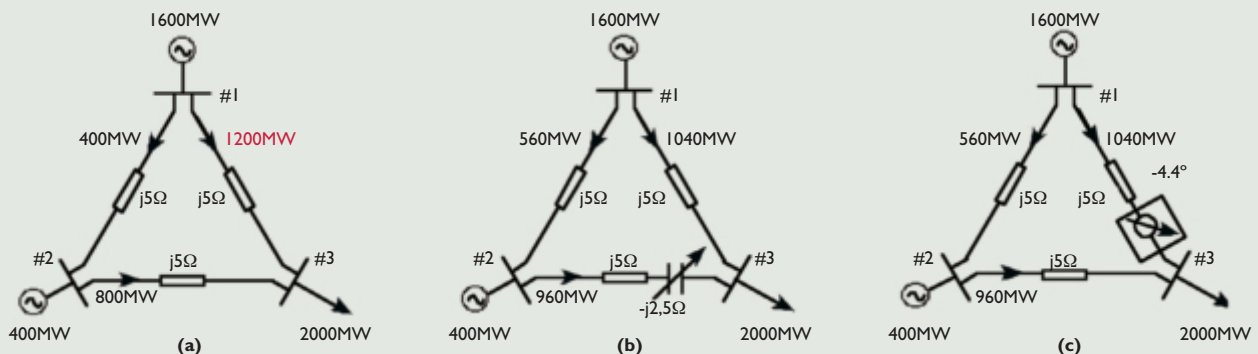


Figura 2. Sistema mallado



mallado formado por tres nudos conectados mediante tres líneas; dos generadores suministran la potencia activa que consume la carga. Se han despreciado las pérdidas. En la Figura 2 (a) se presenta la situación sin compensación, Figura 2 (b) con un compensador serie que modifica la impedancia efectiva de la línea 2-3 ($j5\Omega-j2,5\Omega=j2,5\Omega$) y en la Figura 2 (c) con un compensador serie que disminuye el ángulo de transporte de la línea 1-3. Considerando únicamente los flujos de potencia activa y suponiendo que todas las líneas están limitadas a 1100MW se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Sin compensación la línea 1-3 está sobrecargada mientras que las líneas 1-2 y 2-3 están claramente por debajo de su límite térmico.
- Al disminuir la impedancia efectiva de la línea 2-3 aumenta su flujo de potencia activa y, como consecuencia, disminuye el de la línea 1-3. En este caso todas las líneas pasan a estar por debajo de su límite térmico.
- Al disminuir el ángulo de transporte de la línea 1-3 disminuye su flujo de potencia activa por debajo de su límite térmico. El exceso de flujo de potencia activa que llevaba esta línea sigue llegando a la carga a través de las líneas 1-2 y 2-3, que siguen estando por debajo de sus límites térmicos.

EJEMPLO 2

En la Figura 3 se presenta un ejemplo genérico de un corredor formado por dos líneas paralelas que interconectan dos áreas de un sistema de transporte. En la Figura 3 (a) se presenta la situación sin compensación, en la Figura 3 (b) con un compensador serie que modifica la impedancia efectiva de la línea 2 ($j2X-jX_c$) y en la Figura 3 (c) con un compensador serie que aumenta el ángulo de transporte de la línea 2 (se pasa de δ a δ'). Cuando no hay compensación alguna, el flujo de potencia activa de la línea 1 es el doble del de la línea 2. Las compensaciones que se presentan en la figura permiten regular la potencia activa de la línea 2 y, de esta forma, equilibrar el flujo de potencia de las líneas. Si se supone que el límite de potencia para ambas líneas es de 1000MW, entonces sin compensación la potencia máxima que se puede transportar por el corredor es de 1500MW (1000MW por la línea 1 y 500MW por la línea 2) mientras que con compensación se alcanzan los 2000MW (1000MW por la línea 1 y otros 1000MW por la línea 2).

Figura 3. Interconexión entre dos áreas

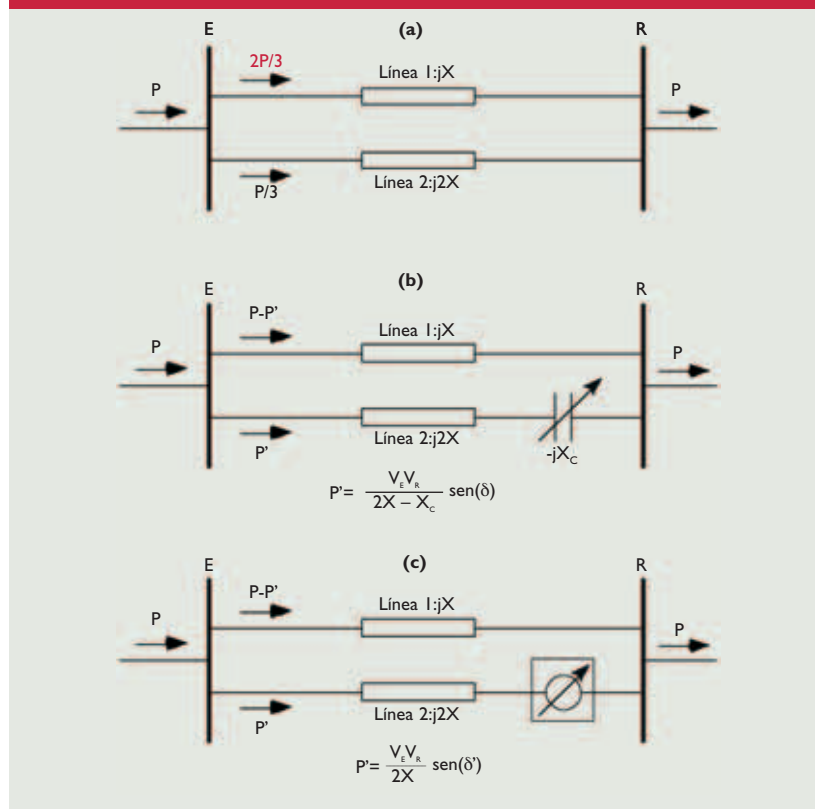
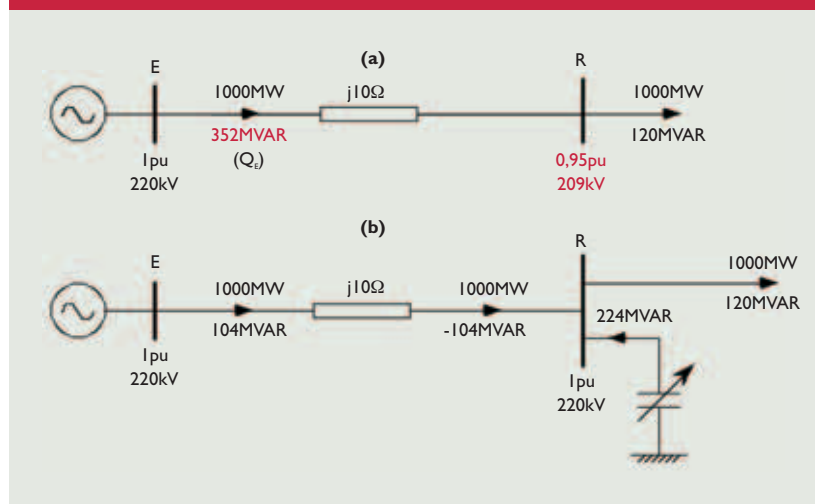


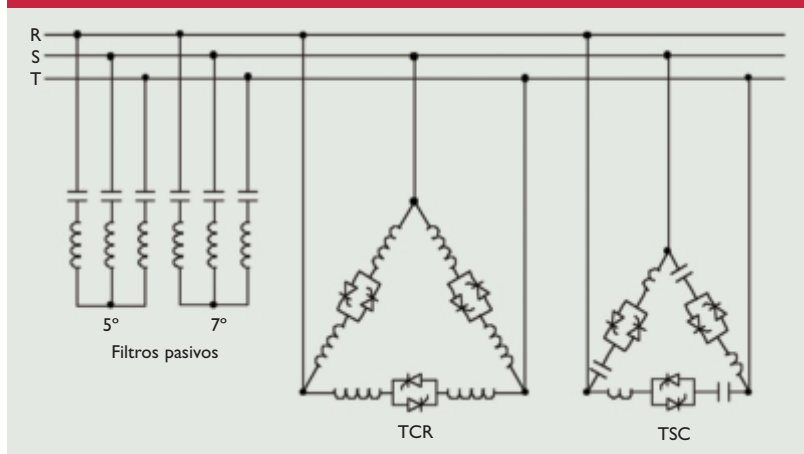
Figura 4. Compensación de reactiva



EJEMPLO 3

Por último, la Figura 4 es un ejemplo de una línea de transporte con flujo de potencia activa y reactiva. El nudo emisor suministra la potencia activa que se consume en el nudo receptor (1000MW) y la reactiva que se consume en la propia línea y en el nudo receptor. En la Figura 4 (a) se presenta la situación sin compensación y en la Figura 4 (b) con compensación de

Figura 5. Compensación paralela de potencia reactiva



reactiva en el nudo receptor. Algunas observaciones:

- Sin compensación, el nudo emisor suministra 352MVAR, que es la suma de la reactiva que es consume en la línea (232MVAR) más la que se consume en el nudo receptor (120MVAR). El flujo de reactiva del nudo emisor al receptor provoca una caída de tensión en la línea de un 5%, pasándose de 220kV (1pu) en el nudo emisor a 209kV (0,95pu) en el nudo receptor.
- El compensador instalado en el nudo emisor aporta 224MVAR de los que 120MVAR son para el consumo en el nudo receptor y 104MVAR para la línea. Con esta compensación se inyecta a la línea la misma cantidad de potencia reactiva desde los nudos emisor y receptor y, como consecuencia, la tensión de ambos nudos es de 220kV (1pu).

Descripción de algunos dispositivos FACTS

Existen varias clasificaciones para los dispositivos FACTS: por ejemplo atendiendo a aspectos tecnológicos o a los modos de conexión a red. Desde un punto de vista tecnológico los dispositivos FACTS se pueden dividir en dos generaciones: la primera generación utiliza tiristores con encendido controlado por puerta (SCRs) y la segunda generación semiconductores con encendido y apagado controlado por puerta (GTOs, MCTs, IGBTs, IGCTs, etc.). Las consecuencias fundamentales de estas diferencias tecnológicas son las siguientes:

- Los dispositivos FACTS de primera generación se comportan como elementos pasivos (bobinas, reactancia o transformadores) controlados.

- Los dispositivos FACTS de segunda generación se comportan como fuentes de tensión controlables en módulo y ángulo y sin inercia.

Simplificando, la principal diferencia entre estas generaciones de dispositivos FACTS es la flexibilidad y la respuesta dinámica: la segunda generación de dispositivos FACTS se adapta mejor a cambios en la topología o en el punto de trabajo de la red y su respuesta dinámica es más rápida. No obstante, los dispositivos de esta segunda generación de FACTS son más complejos y caros.

Por último y atendiendo al modo de conexión a red, los dispositivos FACTS se pueden dividir en compensadores serie, compensadores paralelo ó compensadores serie-paralelo. Esta clasificación es independiente de la anterior y existen, por ejemplo, compensadores paralelo tanto en la primera como en la segunda generación de FACTS.

La primera generación de dispositivos FACTS

En la Figura 6 se presenta un esquema de compensación de potencia reactiva con algunos de los dispositivos FACTS más utilizados: reactancias controladas por tiristores (TCR o *Thyristor Controlled Reactor*) y una batería de condensadores conmutada por tiristores (TSC o *Thyristor Switched Capacitor*). En conjunto, el esquema de compensación de la figura es lo que se denomina un Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC o *Static Var Compensator*) y tiene como misión suministrar o absorber potencia reactiva de la red, por ejemplo para mejorar el factor de potencia de una carga o mantener niveles de tensión en un nudo. El TSC son tres ramas conectadas en triángulo compuestas por condensadores, dos tiristores en antiparalelo y una pequeña bobina cuya única misión es limitar las corrientes al conectar los condensadores a la red. Los tiristores realizan la función de interruptores que conectan o desconectan los condensadores de la red una vez por ciclo, coincidiendo con el máximo (positivo o negativo) de la tensión de la rama correspondiente; de manera que el TSC se comporta como una batería de condensadores que se puede conectar o desconectar de la red durante un número entero de ciclos. Las ramas del TCR se componen de dos bobinas puestas en serie a través de dos tiristores conectados en antiparalelo. En este caso no existe las misma restricciones que hay para el encendido de los tiristores del TSC y el TCR se comporta como una reactancia regulable de forma con-

tinua. Debido al control en el encendido de los tiristores las corrientes del TCR no son senoidales, tienen armónicos. Cada uno de los filtros de la Figura 5 está sintonizado a una frecuencia con el objetivo de evitar que los armónicos de corriente del TCR perturben al resto del sistema; además, suministran una cantidad fija de potencia reactiva que permite reducir el tamaño que se necesita de TSC.

En la Figura 6 se presenta un esquema simplificado del SVC y, a modo de ejemplo, unos valores de reactiva asociados a cada compensador. La inyección máxima de reactiva es de 125MVAR y se produce cuando el TSC está conectado y el TCR no consume reactiva. A partir de esta situación, mediante el control del consumo de reactiva del TCR se podría regular de forma continua la inyección de reactiva de 125 a -25MVAR. Por otro lado, el consumo máximo de reactiva es de 125MVAR y se produce cuando el TCR está consumiendo el máximo (150MVAR) y el TSC está desconectado, hay que tener en cuenta que los filtros inyectan 25MVAR. A partir de esta situación, mediante el control del consumo de reactiva del TCR se podría regular de forma continua el consumo de reactiva de 125 a -25MVAR. Resumiendo y teniendo en cuenta las dos situaciones que se han planteado, el SVC se comporta como una reactancia variable que se puede ajustar para inyectar cualquier valor de potencia reactiva entre -125 y 125MVAR.

En la práctica, la capacidad del SVC como compensador de reactiva puede servir para colaborar con los generadores del sistema en el control de tensiones y, por ejemplo, para compensar las variaciones en el consumo de reactiva de determinadas cargas como es el caso de los hornos de arco. Para controlar los flujos de potencia de una línea existen dispositivos más apropiados como los transformadores desfasadores.

En la Figura 7 se presenta un esquema algo simplificado de un transformador desfasador y los vectores de tensión resultantes. El transformador inyecta una tensión en serie con la línea que se ajusta mediante la regulación de las tomas de un autotransformador trifásico. En la práctica, el ajuste de las tomas se realiza mediante la conmutación de tiristores. El transformador inyecta una tensión en cuadratura con la tensión de red provocando un desfase y una amplificación. Para variaciones de ángulo relativamente pequeñas, el ángulo resultante es prácticamente proporcional a la tensión inyectada, mientras que el módulo de la tensión es prácticamente constante; sin

Figura 6. Esquema simplificado del compensador paralelo de potencia reactiva

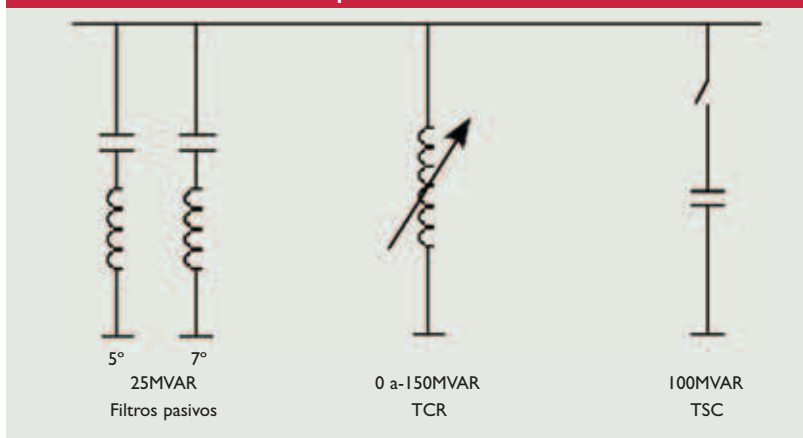
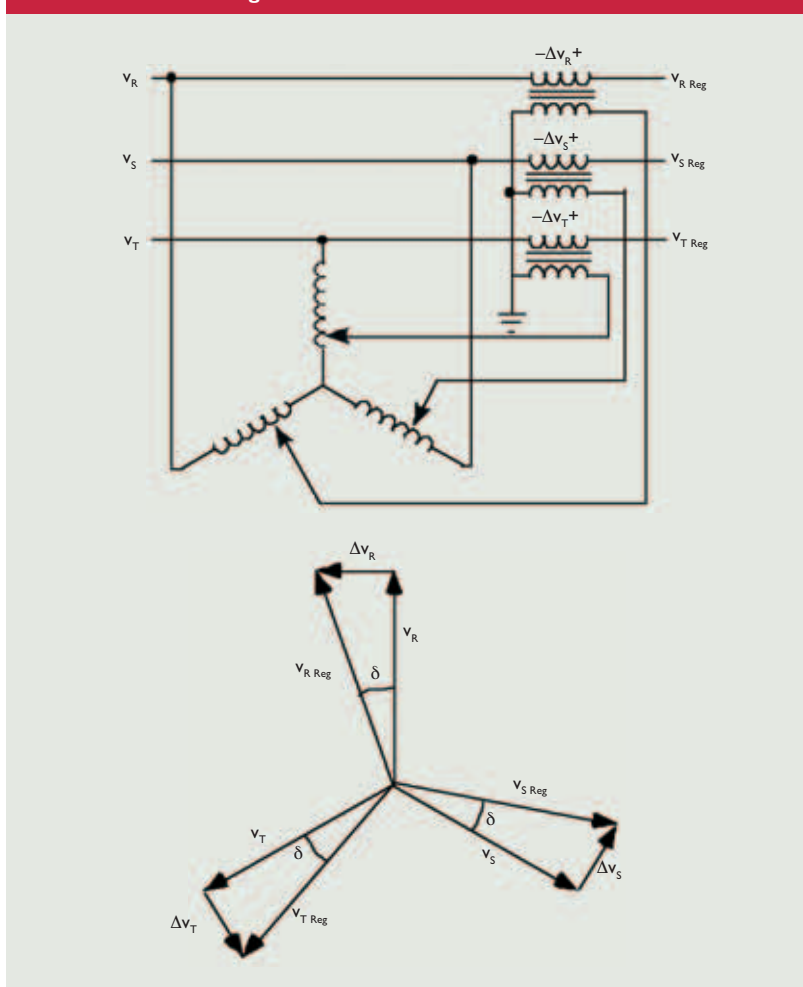
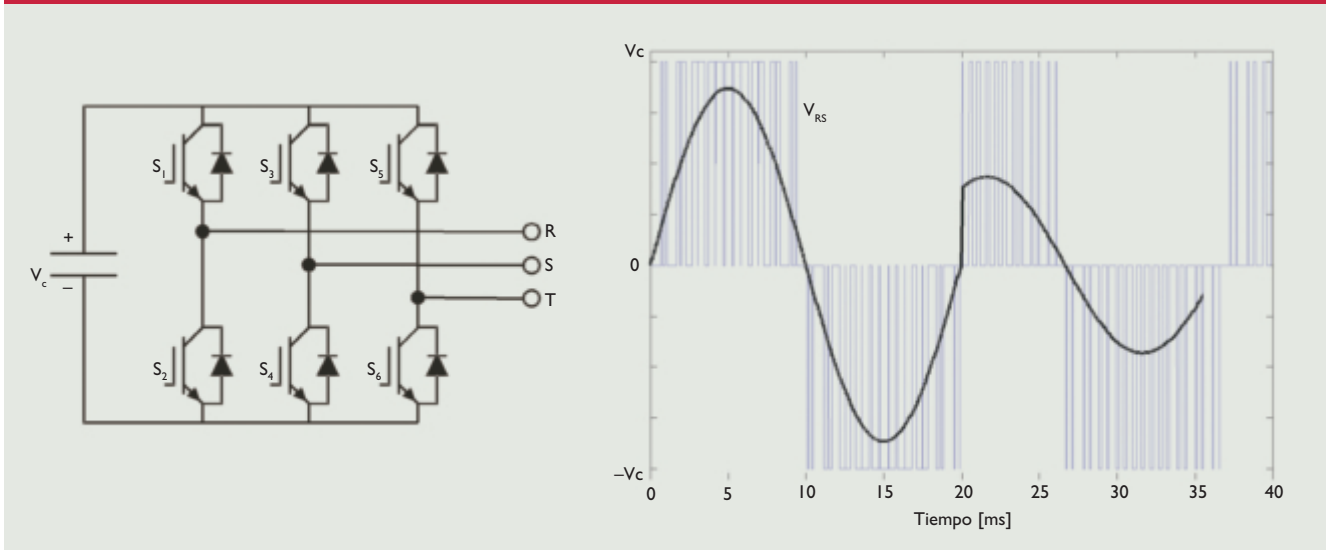


Figura 7. Transformador desfasador



embargo, para variaciones de ángulo grandes, la variación en el módulo de la tensión de red es apreciable y se requieren otras configuraciones de los arrollamientos más complejas pero que aseguran que el módulo de la tensión permanece constante.

Figura 8. Inversor trifásico elemental



Dos ejemplos de aplicación del transformador desfasador son los que se presentan en la Figura 2 (c) y en la Figura 3 (c). En el primer caso, el transformador desfasador reduce el ángulo de transporte para disminuir la potencia de la línea 1-3 que estaba sobrecargada y, el segundo caso, es un ejemplo en el que el transformador desfasador aumenta el ángulo de transporte para aumentar la potencia de una línea y equilibrar la potencia de dos líneas paralelas.

La segunda generación de dispositivos FACTS

Mientras que en la primera generación de dispositivos FACTS los elementos fundamentales son pasivos: condensadores, bobinas y transformadores; la segunda generación se caracteriza por dispositivos en los que los elementos fundamentales son las fuentes de tensión electrónicas (inversores trifásicos fuente de tensión). Otra alternativa es la utilización de fuentes de corriente electrónicas (inversores trifásicos fuente de corriente), pero en la práctica no suelen utilizarse en el campo de los dispositivos FACTS.

En la Figura 8 se presenta un inversor trifásico elemental con una tensión de línea que se genera mediante la conmutación controlada de los 6 interruptores electrónicos que lo componen. También se ha representado la componente fundamental de la tensión en dos periodos consecutivos. Se puede observar como el inversor tiene la capacidad de ajustar instantáneamente el módulo, el ángulo y la frecuencia de la componente fundamental de la tensión que suministra, comportándose

como una fuente de tensión controlable y sin inercia. Sin embargo, a parte de la componente fundamental también genera armónicos, cuya frecuencia está relacionada con la frecuencia de conmutación de los semiconductores: si se aumenta la frecuencia de conmutación aumenta la frecuencia de los armónicos. Para aprovechar el efecto de filtrado sobre los armónicos que tienen la red eléctrica, interesa aumentar su frecuencia y por lo tanto la frecuencia de conmutación del inversor. El problema es que la tecnología actual no permite conmutar a frecuencias altas (serían deseables decenas de kHz) semiconductores que tienen que manejar las tensiones y corrientes típicas de un sistema de transporte de energía eléctrica. Por este motivo, en la práctica, las fuentes de tensión electrónicas que se utilizan en los dispositivos FACTS son algo más complejas y se componen de varios inversores elementales acoplados mediante transformadores y que generan tensiones más próximas a una senoidal pero con frecuencias de conmutación inferiores a 1 kHz.

El dispositivo de la Figura 9 es un dispositivo FACTS en conexión paralelo, de esta segunda generación, denominado STATCOM (*STATic synchronous COMPensator*). Se compone de un inversor trifásico fuente de tensión y de un transformador para conectarse a la red eléctrica. El transformador tiene la misión de adaptar niveles de tensión y, gracias a su impedancia interna, de separar eléctricamente la tensión del inversor de la de la red. El objetivo del STATCOM es suministrar o absorber potencia reactiva (Q) del sistema: el sistema de control del STATCOM

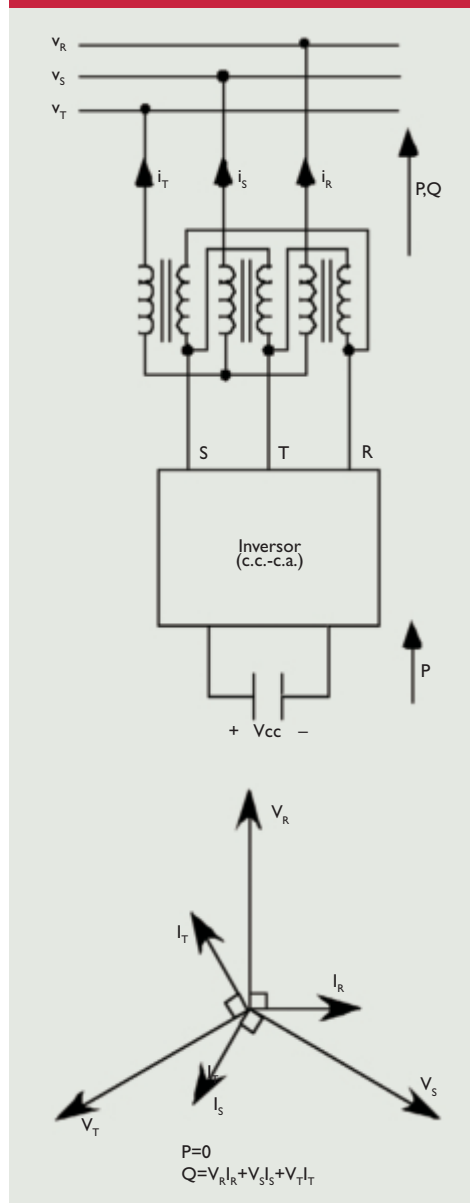
ajusta en cada momento la tensión del inversor para que la corriente que se inyecta en la red esté en cuadratura respecto a la tensión de red, en estas condiciones $P=0$ y $Q \neq 0$. Es importante resaltar que el STATCOM no dispone de elementos almacenadores de energía, por lo que aunque puede intercambiar Q con la red en régimen permanente, si se desprecian las pérdidas, el intercambio neto de energía tiene que ser cero ($P=0$).

En régimen permanente el STATCOM tiene una utilidad similar a la del SVC de la sección previa, gracias a su capacidad para inyectar o absorber potencia reactiva de la red. Sin embargo se pueden resaltar algunas diferencias entre ambos dispositivos:

- El SVC se comporta como un conjunto de elementos pasivos regulables (condensadores y bobinas) conectados a la red y, por lo tanto, pueden interaccionar con otras impedancias del sistema provocando resonancias serie o paralelo no deseadas.
- El STATCOM se comporta como una fuente de corriente controlable y, como consecuencia, desaparece el peligro de las resonancias.
- En el SVC el intercambio de potencia reactiva depende de la tensión de red, por ejemplo si la tensión de red disminuye la capacidad de intercambio de reactiva también disminuye.
- En el STATCOM las variaciones de la tensión de red se pueden compensar mediante el ajuste de la tensión del inversor.
- La diferencia fundamental entre el SVC y el STATCOM es que la respuesta dinámica del último es más rápida, como consecuencia de que el tiempo necesario para ajustar la tensión del inversor del STATCOM es mucho menor que el necesario para ajustar la impedancia efectiva del SVC.

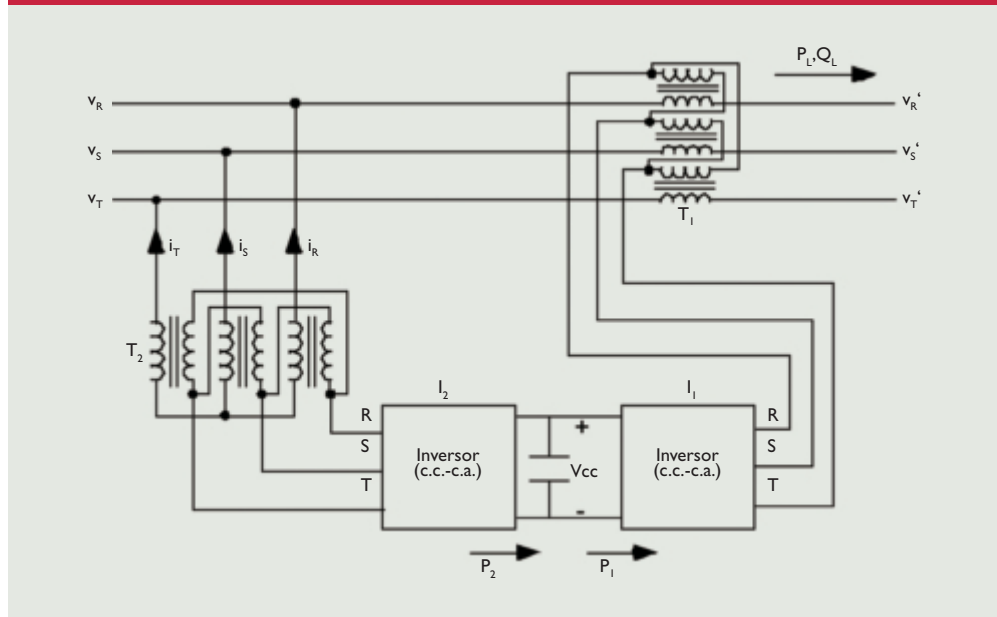
Por último, en la Figura 10 se presenta el UPFC (*Unified Power Flow Controller*) que es el dispositivo FACTS más completo. Se trata de un único dispositivo con compensación serie y paralelo. El compensador serie está formado por un inversor trifásico fuente de tensión (I1) que introduce una tensión en serie con la línea mediante los arrollamientos de un transformador (T1). El compensador paralelo (que básicamente es un STATCOM) está formado por un inversor (I2) conectado en un punto de la línea a través de otro transformador (T2). El UPFC, mediante la tensión que inyecta el compensador serie tiene la capacidad de controlar las corrientes de la línea de transporte y, por lo tanto, las potencias activa y reactiva de la línea (P_L y

Figura 9. Esquema simplificado y vectores de tensión y corriente de un STATCOM



Q_L). Ésta es la misión fundamental del UPFC. La tensión que tiene que inyectar el compensador serie depende de la impedancia y del punto de trabajo de la línea y, en general, no tiene por qué estar en cuadratura respecto a la corriente de la línea. Esto significa que el compensador serie, y por lo tanto su inversor, puede necesitar suministrar o absorber energía del sistema ($P_1 \neq 0$). La misión fundamental del compensador paralelo es conseguir de la red la energía que necesita el compensador serie ($P_2 = P_1$), de manera que la energía neta que consume el UPFC es cero ($P_1 - P_2 = 0$). Adicionalmente, el compensador paralelo realiza la función de STATCOM inyectando potencia reactiva en la red.

Figura 10. Esquema simplificado de un UPFC



El UPFC aglutina en un único dispositivo todas las posibilidades de los dispositivos FACTS, pudiendo regular el flujo de potencia de una línea de transporte, compensar el factor de potencia en un nudo y colaborar en el control de tensiones. En régimen permanente equivale a la combinación de un SVC y un transformador desfásador, pero sin los problemas de resonancias, etc. de este tipo de dispositivos FACTS. En régimen dinámico su comportamiento es muy superior al del SVC y el transformador desfásador gracias a la rapidez de respuesta de los inversores.

Conclusiones

Los dispositivos FACTS ayudan a flexibilizar el transporte de la energía eléctrica con el objetivo de aumentar la fiabilidad del sistema. Son una herramienta para controlar el flujo de potencia de determinadas líneas, compensar reactiva y, gracias a su rapidez de respuesta, atender a las perturbaciones dinámicas más típicas. Existen dos generaciones de dispositivos FACTS que se caracterizan por el tipo de semiconductores que utilizan: la primera generación semiconductores con encendido por puerta y la segunda con encendido y apagado por puerta. Los dispositivos de la primera generación se comportan como elementos pasivos (condensadores, bobinas o transformadores) regulables y los de la segunda generación como fuentes de tensión completamente controlables y sin inercia. En régimen permanente las posibilidades de ambas generaciones son

similares, salvo que la segunda generación de FACTS no tiene alguno de los problemas prácticos de la primera: resonancias y dependencia de la compensación del punto de trabajo del sistema. La diferencia fundamental entre ambas generaciones de FACTS radica en la rapidez de respuesta: la respuesta dinámica de los dispositivos de la segunda generación (STATCOM, UPFC y otros) es más rápida que la de los de la primera generación (SVC, transformador desfásador, etc.).

El UPFC es el dispositivo FACTS más completo, aglutinando en un único dispositivo todas las posibilidades de los FACTS. Sin embargo, en la práctica los dispositivos más utilizados pertenecen a la primera generación de FACTS y, por el momento, sólo en casos especiales se justifica la instalación de dispositivos tan complejos y caros como un STATCOM o un UPFC. ■

Referencias

- [1] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi. "Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems". IEEE Press, 1999.
- [2] Laszlo Gyugyi. "Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real-Time Control of AC Transmission Lines". Emerging Practices in Technology, IEEE Standards Press, 1993.
- [3] Philip Moore and Peter Ashmole. "Flexible AC Transmission Systems". Power Engineering Journal, pag. 282-286, diciembre de 1995.
- [4] Pablo García González. "Modelado Control y Aplicación de Dispositivos FACTS Basados en Inversores Fuente de Tensión". Colección de Tesis Doctorales de la Universidad Pontificia Comillas, junio de 2000.