

Control de tensión

Índice

1. Control de potencia reactiva y control de tensión	1
1.1. Elementos que producen o consumen potencia reactiva	2
1.2. Métodos de control de tensión	3
2. Condensadores y reactancias en paralelo	3
3. Compensadores síncronos	4
4. Compensadores estáticos (SVCs)	4
4.1. Fundamento de un sistema de compensación estático	4
4.2. Reactancia controlada mediante tiristores	6
4.3. Condensadores conectados mediante tiristores	8
4.4. Aplicaciones típicas	9
5. Compensadores estáticos tipo STATCOM	10
6. Transformadores con cambio de tomas	11
7. Sistemas de excitación	14
8. El control de tensión en el marco regulatorio español	16
9. Estabilidad de tensión	17

1. Control de potencia reactiva y control de tensión

El control de las tensiones en los nudos de una red eléctrica es necesario por varias razones:

1. Las tensiones en los nudos deben permanecer dentro de unos límites aceptables. Tanto los equipos de las instalaciones eléctricas como los de los consumidores están diseñados para trabajar en un rango determinado de tensión, por lo que la operación de los mismos fuera de este rango puede afectar a su funcionamiento o dañarlos.

2. Un buen nivel de tensión mejora la estabilidad del sistema.
3. Un reparto de tensiones inadecuado origina flujos de potencia reactiva que a su vez provocan pérdidas en las líneas por efecto Joule.

Las tensiones en una red eléctrica dependen en gran medida del flujo de potencia reactiva en la misma. Dados dos nudos de un sistema eléctrico conectados entre sí, la diferencia entre los valores eficaces de sus tensiones está fuertemente relacionada con el flujo de potencia reactiva entre ellos. A su vez, tanto la caída de tensión como el flujo de reactiva son relativamente independientes del desfase entre los ángulos de ambas tensiones y del flujo de potencia activa entre los dos nudos.

El desacoplamiento entre el flujo de potencia reactiva y la caída de tensión por un lado, y el flujo de potencia activa y el desfase angular de tensión por otro, es una regla que suele cumplirse en los sistemas eléctricos. Este desacoplamiento es más pronunciado si

- las líneas son muy inductivas, situación habitual en las redes eléctricas; en general, cuando mayor es la tensión de transporte más inductivas son las líneas eléctricas
- las líneas no están excesivamente cargadas.

En general, puede afirmarse que la potencia reactiva circula desde los nudos con tensión mayor hacia los nudos con tensión menor, considerando ambas tensiones en por unidad. De la misma forma, puede afirmarse que para aumentar la tensión en un nudo hay que inyectar en él potencia reactiva, y para disminuir su tensión hay que extraer potencia reactiva. Por eso es muy común emplear indistintamente las expresiones “control de tensión” y “control de potencia reactiva”.

A lo largo del día las cargas en un sistema eléctrico varían, y con ellas la demanda de reactiva, por lo que el sistema de control debe operar de forma continua para corregir las desviaciones de tensión. Además, y en la medida de lo posible, la potencia reactiva debe producirse allí donde se necesita con el fin de reducir los gradientes de tensión y las pérdidas del sistema. En este sentido el control de tensión es un control esencialmente local, al contrario que el control de frecuencia, y por ello se ejecuta mediante dispositivos repartidos por todo el sistema.

1.1. Elementos que producen o consumen potencia reactiva

Antes de abordar los distintos mecanismos utilizados para controlar la tensión, consideremos cuáles son los componentes de un sistema eléctrico que producen o consumen potencia reactiva [1, sec. 11.2.1]:

Generadores síncronos: Pueden generar o consumir potencia reactiva dependiendo de su excitación. Esta capacidad está limitada por los márgenes de funcionamiento de la máquina, fundamentalmente la corriente máxima en el devanado de campo y la corriente máxima en el devanado inducido. Normalmente los generadores síncronos están equipados con reguladores automáticos que controlan de forma continua la tensión en el punto de conexión.

Líneas aéreas: En función de su carga, absorben o generan potencia reactiva. En general, cuando están cargadas absorben reactiva, y cuando están descargadas la generan.

Cables subterráneos: Debido a su elevada capacidad distribuida, generan potencia reactiva.

Transformadores: Siempre consumen potencia reactiva. Cuando están descargados lo hacen por la reactancia de magnetización, y cuando están cargados por la reactancia en serie.

Cargas: Normalmente absorben potencia reactiva, si bien depende de la naturaleza de la carga: las lámparas incandescentes y los sistemas de calefacción son resistivos, mientras los motores de inducción y las lámparas fluorescentes son inductivos. Las compañías eléctricas penalizan económicamente las cargas inductivas, por lo que los clientes industriales suelen compensar su consumo de potencia reactiva mediante la instalación de baterías de condensadores.

Dispositivos compensadores: Generan o consumen potencia eléctrica para contribuir al control de tensión.

1.2. Métodos de control de tensión

Los principales dispositivos que se utilizan para controlar la tensión en el sistema son:

1. Fuentes y sumideros de potencia reactiva: condensadores y reactancias en paralelo, compensadores síncronos, y compensadores estáticos (SVCs).
2. Transformadores reguladores.
3. Generadores síncronos.
4. Compensadores permanentemente conectados en líneas, habitualmente en líneas largas.

Las siguientes secciones describen con más detalle algunos de estos elementos.

2. Condensadores y reactancias en paralelo

Las reactancias y condensadores en paralelo constituyen un medio sencillo y económico de inyectar o consumir potencia reactiva en el nudo en el que son conectados. Típicamente las reactancias se conectan en horas valle, cuando las líneas están menos cargadas y las tensiones tienden a subir, mientras los condensadores se conectan en horas punta, cuando las tensiones son más bajas.

Los condensadores en paralelo son muy frecuentes, tanto en la red de transporte como en líneas de distribución. En la red de transporte, se encuentran repartidos con el fin de minimizar las pérdidas y las diferencias de tensión. En las líneas de distribución, se usan para compensar el factor de potencia de las cargas y para controlar el perfil de tensiones. El principal inconveniente de los condensadores es que su generación de potencia reactiva es proporcional al

cuadrado de la tensión, por lo que su capacidad de aportar potencia reactiva disminuye cuando las tensiones son muy bajas, precisamente cuando es más necesaria.

3. Compensadores síncronos

Un compensador síncrono, también llamado condensador síncrono, es una máquina síncrona cuyo eje no recibe ningún par procedente de ninguna turbina. La corriente en su devanado de campo se controla a través de un regulador de tensión, de forma que la máquina genera o consume potencia reactiva según lo requiera el sistema al que está conectada.

Algunas de sus ventajas, en comparación con otros dispositivos de compensación, son las siguientes:

- Regula la tensión de forma continua, sin los transitorios electromagnéticos asociados a los cambios de tomas de otros tipos de dispositivos.
- No introduce armónicos en la red, ni se ve afectado por ellos.
- No causa problemas por resonancia eléctrica.
- En caso de caída de tensión por un fallo en la red proporciona corriente de cortocircuito, facilitando la actuación de las protecciones de sobre-corriente.

4. Compensadores estáticos (SVCs)

Los compensadores estáticos son dispositivos conectados en paralelo en la red eléctrica que a través de semiconductores controlados generan o absorben potencia reactiva. El adjetivo *estático* hace referencia a que no poseen ninguna parte móvil, al contrario que los compensadores síncronos. La explicación del funcionamiento de los compensadores estáticos en esta sección, así como las figuras utilizadas, provienen del libro de Kundur [1, sec. 11.2.7]

4.1. Fundamento de un sistema de compensación estático

Desde el punto de vista de la operación del sistema eléctrico, un sistema de compensación estático consiste en un condensador y una bobina en paralelo, regulables, cuya capacidad e inductancia pueden ajustarse para controlar la tensión y el intercambio de reactiva en sus terminales.

Un sistema de compensación estático ideal tendría una capacidad ilimitada de generar y absorber potencia reactiva, y sería capaz de mantener una tensión constante en sus terminales. Su característica tensión-corriente sería una línea recta horizontal, como la indicada en la figura 1. Además, no tendría pérdidas y respondería de forma instantánea.

Para comprender el funcionamiento de un sistema de compensación estático real, consideremos un sistema sencillo constituido por una bobina controlable más un condensador fijo. La parte izquierda de la figura 2 muestra las características tensión-corriente de la bobina y del condensador. Al ser la bobina regulable, podemos elegir la pendiente de su característica, siempre que nos

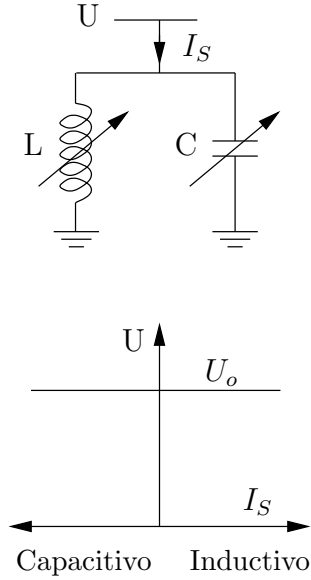


Figura 1: Característica de un compensador estático ideal.

mantengamos dentro de la zona limitada por la inductancia máxima y mínima. Esta pendiente se programa, a través del sistema de control, de forma que imponga una relación entre tensión y corriente representada por una línea recta con ligera pendiente ascendente, tal como indica la figura. En el caso del condensador, la característica es una línea recta determinada por la ecuación $I_C = \omega C U$.

La misma figura 2 muestra, a la derecha, la característica tensión-corriente de ambos elementos conectados en paralelo. Dado que la corriente total I_S del sistema es la suma de las corrientes por la bobina y por el condensador, esta característica se obtiene fácilmente sumando ambas corrientes. El resultado es un elemento con tres zonas lineales, que puede operar en el semiplano inductivo y en el capacitivo, y con una ligera pendiente positiva en la zona central. Típicamente, la corriente nula corresponde aproximadamente a la tensión nominal del nudo de conexión.

Si la tensión en el nudo de conexión es elevada, el compensador estático absorbe potencia reactiva. Si la tensión es reducida, el compensador genera potencia reactiva. De esta forma, el compensador estabiliza la tensión en el nudo en el que se conecta, acercándola al valor de referencia programado.

Cuando es sometido a tensiones anormalmente bajas, el compensador opera en la zona capacitiva marcada por la recta que pasa por el origen, de forma que sólo es capaz de aportar una corriente reactiva reducida. En esta zona de operación la inductancia queda reducida al mínimo y el compensador estático se comporta como un condensador, de forma que el aporte de potencia reactiva es proporcional al cuadrado de la tensión. Esta es una característica importante de los SVCs, que limita su aporte de reactiva durante, por ejemplo, huecos profundos de tensión provocados por un cortocircuito.

El margen de control del compensador estático puede ampliarse mediante la conexión de condensadores conmutados, que se conectan y desconectan en

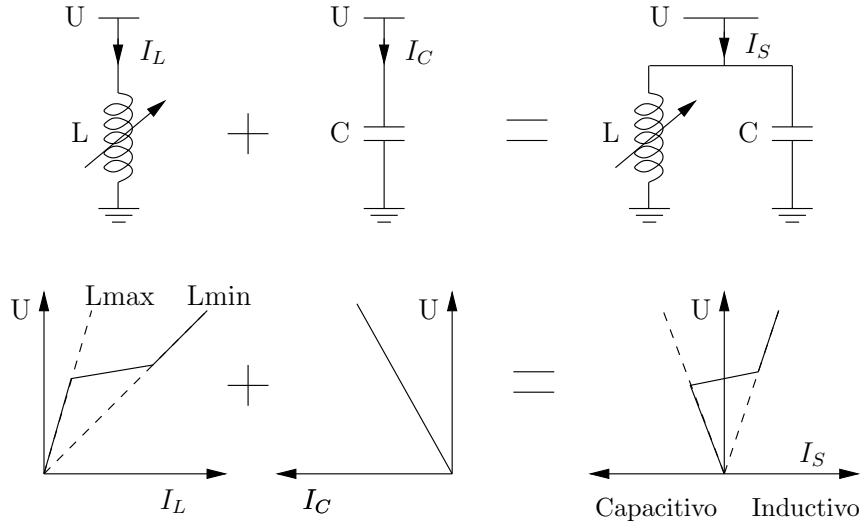


Figura 2: Composición de la característica de un compensador estático.

función de la tensión. La figura 3 ilustra un circuito de este tipo y su característica tensión-corriente. En dicha figura, la etapa 1 está constituida por la bobina regulable y un filtro capacitivo y da origen a la característica marcada con el número 1. La misión del filtro, además de aportar reactiva, es reducir el contenido de armónicos. Si la tensión descende, se conectan sucesivamente las etapas 2 y 3, que desplazan la característica tensión-corriente hacia la zona capacitiva.

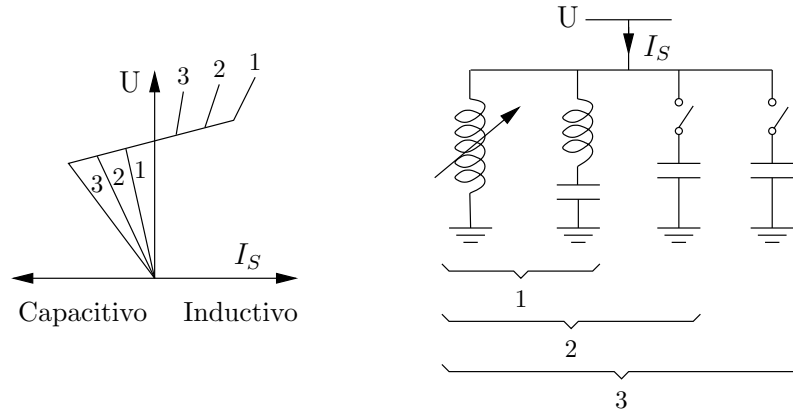


Figura 3: Compensador estático con tres escalones de condensadores.

4.2. Reactancia controlada mediante tiristores

El elemento central del sistema descrito de compensación estática, es la bobina regulable, con sus semiconductores y su correspondiente sistema de control. La figura 4 muestra el circuito eléctrico y el ciclo de conducción de una bobina

controlada mediante dos tiristores. Cada tiristor comienza a conducir cuando se encuentra polarizado en secuencia directa, y además recibe la orden de disparo a través de la puerta correspondiente. El disparo es ordenado por el sistema de control en el instante determinado por el ángulo de disparo α , que se mide a partir del paso por cero de la tensión en el tiristor. El ángulo σ durante el cual un tiristor conduce se llama ángulo de conducción.

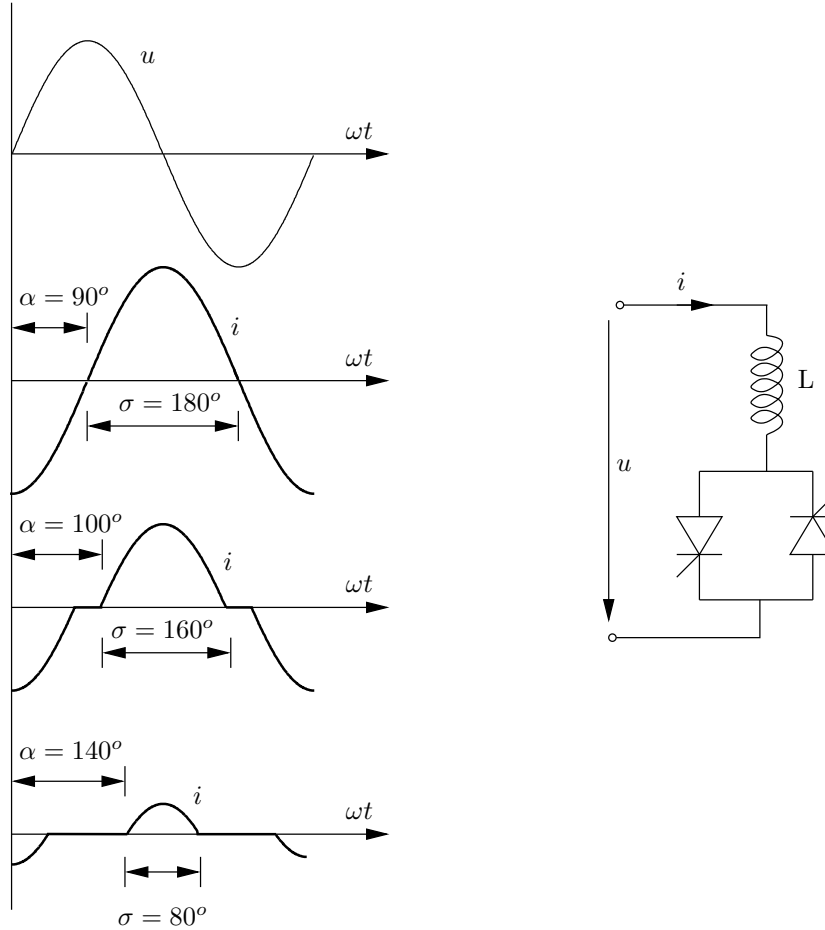


Figura 4: Reactancia controlada mediante tiristores.

Como indica la figura, un ángulo de disparo $\alpha = 90^\circ$ corresponde a un ángulo de conducción $\sigma = 180^\circ$ en cada tiristor, y por tanto la bobina conduce a lo largo de todo el ciclo. Este modo de funcionamiento equivale a tener la bobina permanentemente conectada.

Si aumenta el ángulo de disparo α , disminuye el ángulo de conducción σ . La figura 4 muestra los ciclos de conducción para los ángulos de disparo $\alpha = 100^\circ$ y $\alpha = 140^\circ$. Conforme aumenta α , la corriente por la bobina es menor. Además la corriente se distorsiona y se aleja de la forma sinusoidal.

Aplicando el análisis de Fourier, es posible calcular el valor de la componente fundamental de 50 Hz de la corriente, en función del ángulo de disparo. Este análisis da como resultado la siguiente relación entre la susceptancia de la bobina

controlada y el ángulo de disparo:

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{U} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (1)$$

donde I_1 y U son los valores eficaces de corriente y tensión, y X_L la reactancia de la bobina a la frecuencia fundamental. Aplicando la ecuación 1 podemos modificar la susceptancia de la bobina a voluntad, a través del ángulo de disparo α .

El sistema de control ejecuta la característica tensión-corriente deseada, representada por el tramo con ligera pendiente positiva en las figuras 2 y 3, a través de la elección del ángulo de disparo. Durante el funcionamiento del compensador, el sistema de control mide la tensión, y aplica en función de la misma el ángulo de disparo correspondiente. El método para diseñar el sistema de control puede ser el siguiente:

1. Se elige un punto de la característica tensión-corriente deseada, al que llamaremos $[U_x, I_x]$.
2. Se obtiene el valor de la susceptancia correspondiente $B_x = I_x/U_x$.
3. A través de la ecuación 1 se obtiene el ángulo de disparo α_x deseado.
4. El proceso se repite en otros puntos, para construir la característica α -U deseada.

Conforme aumenta el ángulo de disparo la corriente se vuelve menos sinusoidal, es decir, aumenta su contenido en armónicos. Si el disparo de los tiristores es simétrico, únicamente se crean armónicos de orden impar. Para reducir el contenido en armónicos se usan diversas configuraciones. Por ejemplo, si las tres fases del compensador estático se conectan en triángulo, los armónicos triples (3, 9...) circulan por dentro del triángulo y no se transmiten a la red. Usando un transformador con tres devanados, con el secundario conectado en triángulo y el terciario en estrella, es posible generar entre ambos un desfase de 30° que permite eliminar los armónicos de orden 5 y 7. De esta forma, los primeros armónicos inyectados son los de orden 11 y 13.

4.3. Condensadores conectados mediante tiristores

Otro elemento básico de los sistemas de compensación estáticos son las etapas de condensadores. Como se indicó anteriormente, y como indica la figura 3, estos condensadores se conectan y desconectan para conseguir un comportamiento más o menos capacitivo.

Los dispositivos para conectar estos condensadores pueden ser interruptores mecánicos, pero su tiempo de respuesta es relativamente lento (típicamente superior a 100 ms), y además provocan transitorios electromagnéticos. Por ello es frecuente emplear condensadores conectados mediante tiristores. La disposición del circuito es similar a la de la bobina controlada mediante tiristores, pero sustituyendo la bobina por el condensador, tal como se muestra en la figura 4. Sin embargo, en este caso el control de los tiristores únicamente se encarga de asegurar una conexión rápida y suave de los condensadores. Para ello los tiristores de cada fase comienzan a conducir cuando la diferencia de tensión entre

el condensador y la red es nula, eliminando el transitorio electromagnético que se produciría en otro caso. Una vez el condensador está conectado, los tiristores pueden retirarse mediante la conexión de una rama en paralelo (o bypass) para reducir las pérdidas.

4.4. Aplicaciones típicas

Los compensadores estáticos comenzaron a ser utilizados en la década de los 70, y hoy en día encuentran aplicaciones tanto en las redes de transporte como en las de distribución. Algunas de ellas son las siguientes.

En las redes de transporte:

- Control de sobretensiones temporales.
- Prevención del colapso de tensión.
- Mejora de la estabilidad transitoria.
- Atenuación de las oscilaciones electromecánicas en la red.

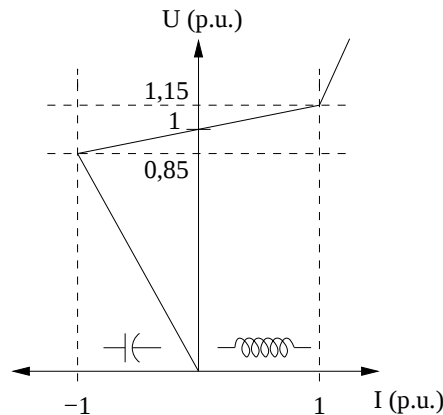
En las redes de distribución:

- Balance de sistemas desequilibrados.
- Reducción del efecto parpadeo (o flicker) en las proximidades de hornos de arco u otras cargas variables.

Ejemplo

En un nudo de una red puramente inductiva, con potencia de cortocircuito $S_{cc} = 10$ p.u., la tensión es 1,1 p.u.

Calcular cuál será la tensión en dicho nudo si se conecta un compensador estático con la siguiente característica tensión/corriente:



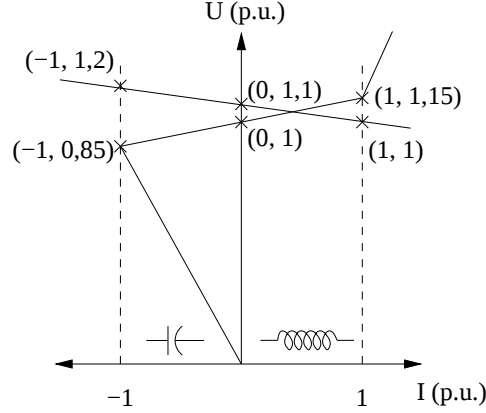
Solución

Representamos la red como un equivalente Thevenin. Puesto que la tensión en circuito abierto es 1,1 p.u., el valor de la fuente de tensión es 1,1. La impedancia equivalente es una reactancia de $X_{cc} = 1/S_{cc} = 0,1$ p.u..

Por tanto, al inyectar una corriente reactiva I en el nudo de conexión, la red impone una tensión

$$U = 1,1 - 0,1I \quad (2)$$

Esta ecuación impone una característica tensión/corriente que es representada en la siguiente figura junto con la característica propia del SVC.



El punto de equilibrio es aquel donde se cruzan las dos líneas. Por tanto, es la solución del siguiente sistema de dos ecuaciones:

$$U = 1 + 0,15I \quad (3)$$

$$U = 1,1 - 0,1I \quad (4)$$

Luego la corriente inyectada por el SVC es

$$I = 0,4 \text{ p.u. (reactiva)} \quad (5)$$

Y la tensión una vez conectado el SVC es

$$U = 1,06 \text{ p.u.} \quad (6)$$

5. Compensadores estáticos tipo STATCOM

Un STATCOM (STATIC COMPensator) es un dispositivo de compensación estático, cuyo funcionamiento se basa en un convertidor que aplica una fuente de tensión de la amplitud, fase y frecuencia deseada. A través del control del convertidor, esta tensión se modula de manera que el STATCOM genera o consume la potencia reactiva requerida.

La figura 5 muestra un esquema sencillo de un STATCOM. Consta de un convertidor conectado entre la red y una etapa de corriente continua. El sistema de control mide la tensión y la corriente alternas en la red para regular el intercambio de reactiva, y la tensión en la etapa de continua para mantenerla a un nivel constante.

El resultado es un dispositivo capaz de aportar corriente reactiva, dentro de los límites térmicos de los semiconductores, independientemente del nivel de tensión en la red. La figura 6 muestra la característica tensión-corriente típica de

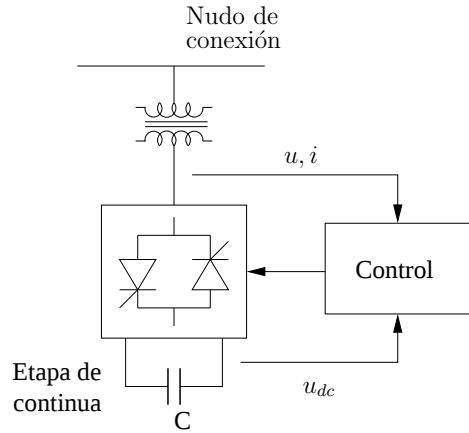


Figura 5: Esquema general de un STATCOM.

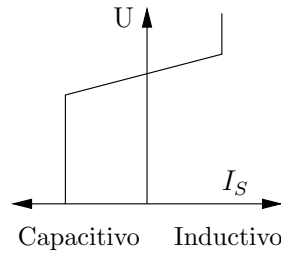


Figura 6: Característica de un STATCOM.

un STATCOM. Puede observarse que, al contrario que los SVCs, un STATCOM es capaz de aportar corriente reactiva a tensiones muy bajas.

Los semiconductores utilizados suelen ser IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) y GTOs (Gate Turn-Off thyristor), dependiendo de la aplicación. La modulación de la onda de tensión puede ejecutarse de varias formas. Por ejemplo, la figura 7 muestra una modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation, PWM). Este tipo de modulación exige, para construir una onda con pocos armónicos a bajas frecuencias, conmutaciones muy rápidas de los semiconductores. Por esta razón, y por las elevadas tensiones a soportar, en aplicaciones para la red de transporte se aplican otros esquemas de modulación más complejos que reparten el trabajo entre un elevado número de semiconductores.

6. Transformadores con cambio de tomas

Los transformadores con cambio de tomas contienen un devanado en el que la conexión puede realizarse a lo largo de distintos puntos, permitiendo una regulación discreta de la relación de transformación dentro de un margen relativamente estrecho. Estos transformadores proporcionan una herramienta sencilla y económica de control de tensión en un sistema eléctrico. Se aplican tanto en redes de transporte como en redes de distribución.

En las redes de transporte, y debido a la naturaleza mallada de las mis-

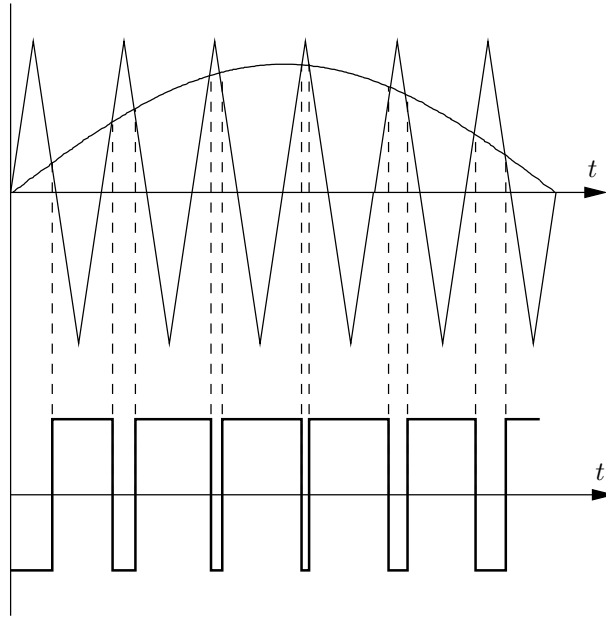


Figura 7: Modulación por ancho de pulso.

mas, el efecto de los transformadores con cambio de tomas sobre las tensiones en los nudos y sobre el flujo de potencia reactiva depende de la configuración del sistema. En general, para controlar la tensión de una parte del sistema es necesario operar de forma coordinada sobre todos los transformadores con cambio de tomas que conectan esa parte del sistema. Con frecuencia, los cambios de tomas se instalan en todos los transformadores que conectan subsistemas a determinada tensión. Por ejemplo, en todos los transformadores a la salida de los generadores síncronos, o en todos los que conectan la red de 400 kV con la de 220 kV, o en todos los que conectan la red de transporte a alta tensión con las redes de distribución a media tensión. La solución particular depende de la red, pues cada Operador de Sistema tiene su propia estrategia de instalación de transformadores reguladores.

En las redes de distribución, el carácter radial de las mismas simplifica el control de tensión. Éste suele realizarse a lo largo de las líneas, mediante la conexión de condensadores y mediante el uso de autotransformadores reguladores. Habitualmente, estos transformadores no cambian la tensión nominal entre sus terminales, por lo que su único cometido es regular la tensión mediante el cambiador de tomas. Es común referirse a ellos por su denominaciones en inglés “boosters” o “step voltage regulators” (SVR).

La figura 8 muestra el esquema de funcionamiento de un autotransformador regulador. Como puede observarse, no existe separación galvánica entre el primario y el secundario, pues ambos comparten una de las bornas. El devanado regulador incorpora un cambiador de tomas, y se encuentra conectado en serie. Existen típicamente 8 tomas donde conectarse. La conexión se realiza a través de una bobina que permite tomas intermedias y un cambio progresivo entre ellas, existiendo 16 posiciones posibles repartidas a lo largo de las 8 tomas. Además a través de un interruptor puede elegirse el sentido, positivo o negativo,

del incremento de tensión, gracias a lo cual se multiplica por dos el número de posiciones y se alcanzan 32 en total. El margen de regulación típico es $\pm 10\%$ respecto a la relación de transformación nominal.

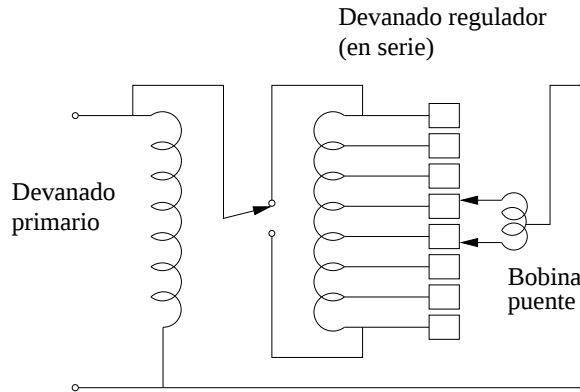


Figura 8: Transformador regulador de tensión. Figura extraída de [1, fig. 11.76]

La figura 9 representa un esquema típico de control de un autotransformador regulador. El sistema trata de mantener una tensión constante, bien en su devanado secundario, bien en algún punto situado aguas abajo en la línea de distribución y determinado por un mecanismo llamado compensador de caída de tensión. Si el sensor de tensión detecta una desviación respecto a la tensión de referencia superior a un determinado umbral (por ejemplo un 1 %), manda una orden al motor para que éste modifique la toma del secundario. El retraso temporal impide que el autotransformador responda a sobretensiones temporales o a variaciones rápidas que no necesitan corrección. Un retraso de 30 segundos es un valor típico.

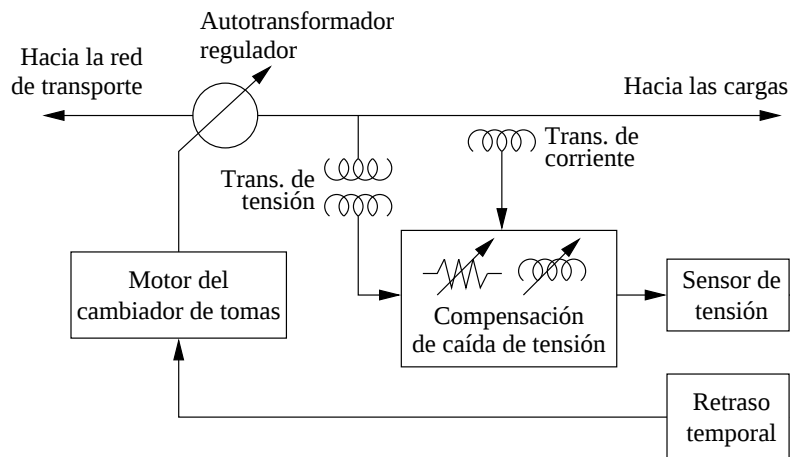


Figura 9: Control de un autotransformador regulador. Figura extraída de [1, fig. 11.77]

La figura 10 muestra, a modo de ejemplo, un esquema de control de tensión a través de una línea de distribución. Sin elementos de control, la curva de la

tensión a lo largo de la línea es la representada por la línea discontinua marcada como “carga”, de forma que un gran número de cargas quedan alimentadas a una tensión excesivamente baja. La conexión del transformador regulador R1 permite elevar la tensión al comienzo de la línea, mejorando la situación, si bien varias cargas siguen conectadas a tensiones demasiado bajas. La conexión del condensador C disminuye la pendiente de la caída de tensión, pero todavía no resuelve el problema para las últimas cargas. Finalmente, la acción conjunta de los transformadores reguladores R1 y R2 junto con el condensador C, permite que todas las cargas queden dentro de los límites de tensión admisibles.

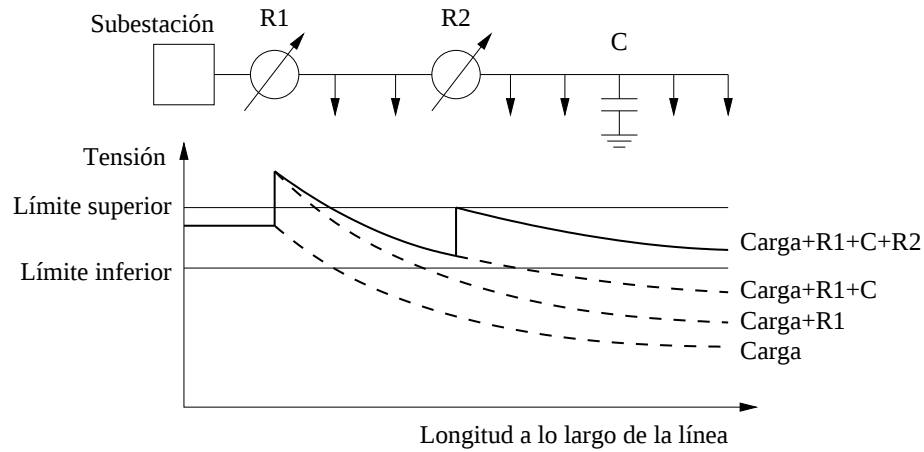


Figura 10: Ejemplo de regulación de tensión en una línea de distribución. Figura extraída de [1, fig. 11.78]

7. Sistemas de excitación

El sistema de excitación de un generador síncrono, además de proveer de corriente continua al devanado de campo, contiene varias funciones de control y protección que influyen sobre el comportamiento dinámico del sistema eléctrico. Esta sección aborda el sistema de excitación únicamente desde el punto de vista del control de sistemas eléctricos. Desde esta perspectiva, las principales funciones de control del sistema de excitación consisten básicamente en el control de tensión y de potencia reactiva, y en la mejora de la estabilidad del sistema eléctrico. También existen diversas funciones de protección, que aseguran que no se sobrepasen los límites de funcionamiento de la máquina.

La figura 11 muestra los principales elementos del sistema de excitación de un generador síncrono. Los siguientes apartados, que describen brevemente cada bloque de la figura, se basan en la explicación del libro de Kundur [1, sec. 8.5].

Excitatriz. Proporciona corriente continua al devanado de campo de la máquina síncrona, y constituye la etapa de potencia del sistema de control.

Regulador AC. Procesa las entradas de los sensores y proporciona una señal de control adecuada para la excitatriz. El procesamiento de las señales emplea técnicas clásicas de regulación y estabilización.

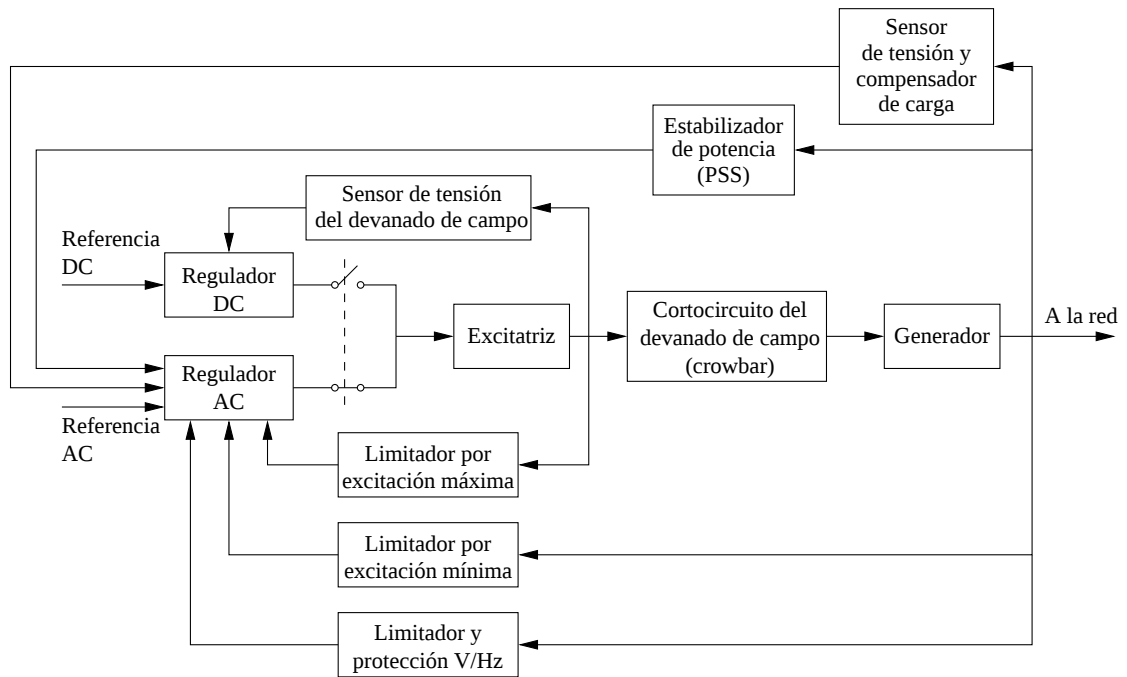


Figura 11: Sistema de control de excitación de un generador síncrono. Figura modificada a partir de [1, fig. 11.77]

Regulador DC. Ajusta la tensión del devanado de campo a un determinado valor de referencia, y permite el control manual de la excitación. Se usa para controlar la excitación en situaciones especiales como ensayos o fallos del control automático.

Sensor de tensión del devanado de campo. Este sensor permite cerrar el bucle del control manual de tensión del devanado de campo.

Limitador por excitación máxima. Esta protección evita el sobrecalentamiento por exceso de corriente del devanado de campo. Típicamente, esta protección actúa en función de la corriente por el devanado de campo.

Limitador por excitación mínima. Este limitador evita que la excitación descienda por debajo de un nivel que perjudique la estabilidad del generador, o que provoque el calentamiento del borde de la estructura del devanado inducido. La entrada se toma de la tensión y corriente en los terminales del generador.

Limitador y protección V/Hz. El objetivo de esta protección es proteger a la instalación contra un flujo magnético elevado, que podría provocar el calentamiento del circuito magnético del generador o del transformador. La relación entre tensión y frecuencia, designada como V/Hz, es proporcional al flujo magnético.

Cortocircuito del devanado de campo (crowbar). Esta protección se instala en algunos generadores para evitar, en algunas circunstancias especia-

les, una corriente negativa en el devanado de campo o una tensión excesiva en el mismo. El incidente típico que puede producir este tipo de problemas es un cortocircuito cerca del nudo de conexión. En caso de existir, esta protección proporciona un paso alternativo para la corriente, actuando como un cortocircuito del devanado de campo. Este camino puede abrirse a través de un tiristor que permita el paso de corriente a través de una resistencia de descarga, o también a través de una resistencia no lineal o varistor.

Sensor de tensión y compensador de carga. Mide la tensión en los terminales del generador, la rectifica, la filtra, y una vez convertida en una señal de corriente continua la compara con una referencia que representa la tensión deseada. Además puede compensar la caída de tensión en el circuito de salida, con el fin de controlar la tensión en un punto distinto de las bornas del generador. En caso de existir, el mecanismo del compensador de carga es similar al del compensador de caída de tensión de un autotransformador regulador, al que se hizo referencia en la sección 6.

En ocasiones es conveniente controlar la tensión en un punto ficticio situado *dentro* del generador. Esto es interesante en el caso de dos generadores en paralelo que comparten un mismo transformador. Si los dos generadores controlasen la tensión en su nudo de conexión uno de ellos aportaría toda la potencia reactiva mientras el otro absorbería el máximo de reactiva, dando como resultado un control inestable. El control de tensión en un punto ficticio en el interior de cada generador permite repartir la carga de potencia reactiva entre ambos.

En otras ocasiones, es conveniente controlar la tensión en un punto ficticio situado *aguas abajo* respecto a las bornas del generador. Puede ser interesante, por ejemplo, cuando dos generadores operan en paralelo, cada uno con su propio transformador elevador. De esta forma, es posible controlar la tensión en un punto cercano al punto de conexión común en la red de transporte, por ejemplo compensando entre un 50 % y un 80 % de la impedancia del transformador. No se debe compensar el 100 % de la impedancia, puesto que en tal caso el control de tensión se volvería inestable.

Estabilizador de potencia (Power System Stabilizer PSS). Proporciona una señal de control adicional que amortigua las oscilaciones electromecánicas en el sistema eléctrico. Esta señal de control se construye típicamente a partir de la desviación de velocidad, la frecuencia eléctrica y la potencia activa.

Referencias

Bibliografía

- [1] P. Kundur *Power system stability and control*, Electric Power Research Institute, 1994.
- [2] *Procedimiento de operación P.O.-7.4 Servicio complementario de control de tensión de la red de transporte*, Red Eléctrica de España REE, http://www.ree.es/index_ope.html.