

Aplicaciones de los dispositivos FACTS en generadores eólicos

JOSÉ LUIS OLABARRIETA RUBIO

Los nuevos sistemas de transporte flexible en corriente alterna permiten aumentar la capacidad de transporte de potencia de las actuales redes

Introducción

Las energías renovables, y en concreto la energía eólica, tienen un papel importante dentro de la economía española. En noviembre de 2004, según datos facilitados por Red Eléctrica Española (REE), se alcanzó un hito histórico en el campo de la energía en España, y más concretamente de la energía renovable, al superar por primera vez la potencia instalada de origen eólico a la de origen nuclear. Las cifras facilitadas por la operadora son de 7.681 MW eólicos conectados a la red por 7.606 MW nucleares. La ventaja se ha seguido incrementando, ya que el año 2004 se cerró superando los 8.200 MW instalados. Este incremento se puede observar en la *figura 1*.

Uno de los puntos clave de las energías renovables y en concreto de la eólica es la integración en la red eléctrica. Estos sistemas energéticos tienen, en función del país en el que se instalan, unas obligaciones diferentes con el operador del sistema. Últimamente las normativas de cada país se están endureciendo en lo relativo a la conexión de generación de carácter renovable a sus redes de transmisión de energía. Estas normativas están apuntando todas en la misma dirección: garantizar la calidad de suministro. Para esto, todo sistema de generación de ener-

gía que se conecte a la red debe ser capaz de “ayudar” a la red en los momentos en los que ésta sufra perturbaciones, sin ser un estorbo en estos momentos críticos. Aquí entran en juego los FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Tipos de sistemas de generación eólica

Las turbinas eólicas se pueden clasificar de acuerdo a sus principios de operación y control. En función de esto se pueden encontrar:

De acuerdo a su velocidad:

1. De velocidad fija: operan con su velocidad de giro en un estrecho margen de velocidad, ligeramente por encima de su velocidad de sincronismo.

2. De velocidad variable: operan con su velocidad de giro dentro de un gran margen de variación por encima y debajo de su velocidad de sincronismo. En este tipo de generadores la velocidad de giro es optimizada para conseguir la mayor cantidad de potencia en función del viento que reciben las palas.

De acuerdo a su modo de control de pitch (giro de la pala alrededor de su eje longitudinal):

1. Pitch fijo: el pitch de cada pala no varía en función del viento que recibe la pala.

2. Pitch variable: cada pala varía su pitch en función del viento que recibe cada pala, con la finalidad de optimizar la potencia aprovechando la energía del viento que incide sobre cada pala.

De acuerdo a la existencia o no de convertidores de potencia:

1. Generadores asíncronos sin compensador de carga, con el rotor cortocircuitado.

2. Generadores asíncronos doblemente alimentados, controlados con un convertidor de frecuencia de carga parcial.

3. Generadores síncronos multipolo, con convertidores de frecuencia de carga total.

De acuerdo a su conexión a la red eléctrica:

1. Directamente conectados a la red eléctrica.

2. Conectados a la red eléctrica a través de convertidores de frecuencia.

Actualmente, en el sistema eléctrico español, la variedad más común dentro de los sistemas de generación eólica son los de velocidad variable, pitch variable, generadores asíncronos doblemente alimentados, conectados a la red eléctrica por medio de un convertidor de potencia de carga parcial.



AGE FOTOSTOCK

Perturbaciones que afectan a los sistemas de generación eólicos

Las características ideales (amplitud, forma, frecuencia y simetría) de la onda de tensión producida por las centrales generadoras pueden verse alteradas por diversas causas. Estas desviaciones de alguno de los parámetros de la onda sinusoidal ideal se conocen como *perturbaciones*. Estas perturbaciones pueden llegar a los sistemas de generación eólica causando diferentes consecuencias.

Huecos de tensión: Un hueco de tensión es una súbita reducción de la tensión de alimentación a un valor entre un 90% y un 1% de la tensión nominal, seguida de una recuperación luego de un período corto de tiempo. Convencionalmente la duración de un hueco de tensión es entre 10 mseg y 1 minuto. La profundidad de un hueco de tensión se define como la diferencia entre el valor RMS mínimo durante el hueco y la tensión nominal. Cambios de tensión que no reducen la tensión de alimentación a menos del 90 % de la tensión nominal no se consideran como huecos.

Microcortes: Interrupción del suministro entre algunos milisegundos hasta 10 s. Suelen ocurrir por faltas en la red cercana.

Impulsos: Elevaciones bruscas del valor instantáneo de duraciones inferiores a algunos milisegundos. Pueden ser causados por maniobras en la red de alimentación o por conexión de baterías de condensadores en la red.

Sobretensión temporal: Una sobretensión temporal es una sobretensión, en algún punto, de relativamente larga duración, a la frecuencia de 50 Hz. Las sobretensiones temporales usualmente se originan por cierre o apertura de interruptores, o fallas (por ejemplo, reducción súbita de carga, fallas asimétricas o conexión de carga no lineales).

Sobretensión transitoria: Es una sobretensión de corta duración, oscilatoria o no, usualmente muy amortiguada, y con una duración de algunos milisegundos. Las sobretensiones transitorias son causadas usualmente por rayos, conmutación u operación de fusibles. El tiempo de establecimiento de una sobretensión transitoria puede variar desde menos de un microsegundo hasta algunos milisegundos.

Subtensión: Es un descenso del valor eficaz de la tensión por debajo del valor especificado en la Norma de Niveles de Tensión. También se puede definir como variación del valor rms por más de 10 segundos.

Flicker: Las fluctuaciones de tensión pueden causar cambios de luminancia de lámparas incandescentes, las cuales pueden crear el fenómeno visual llamado *flicker* (parpadeo). Por encima de cierto umbral el *flicker* se vuelve perceptible. Dicha percepción crece muy rápidamente con la amplitud de la fluctuación. A ciertas frecuencias del fenómeno aún muy pequeñas amplitudes pueden ser percibidas. Puede definirse como variación del valor rms, varias veces por segundo.

Armónicos de tensión: Es una tensión sinusoidal de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (50 Hz) de la tensión de suministro.

Los armónicos de tensión pueden ser calculados y evaluados:

1. Individualmente, por su amplitud relativa, u_h , relacionada a la tensión de la componente fundamental u_1 , donde h es el orden del armónico.

2. Globalmente, por ejemplo mediante el cálculo de la distorsión armónica total, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=1}^{40} u_h^2}$$

Siendo:

THD: Tasa de distorsión armónica total.

RESUMEN

El constante incremento de la actual demanda eléctrica unido a la liberalización de la actividad de generación y al fomento de las energías renovables (especialmente la eólica), junto con la dificultad creciente de construcción de nuevas líneas eléctricas, actúan como impulsores en la búsqueda de equipos que permitan aumentar la capacidad de transporte de potencia de las actuales redes. Para superar estas limitaciones se plantea la utilización de nuevas tecnologías como los FACTS (sistemas de transporte flexible en corriente alterna). Los FACTS designan una familia de equipos que pueden utilizarse de manera individual o conjunta basados en electrónica de potencia y que permiten controlar, por una parte, el flujo de potencia por las redes y, por otra parte, corregir diversas perturbaciones de la red eléctrica.

U_h : Componente de la tensión de orden h .

Los armónicos de la tensión de suministro son causados principalmente por cargas no lineales pertenecientes a los clientes, conectadas a cualquier nivel de tensión.

Armónicos de corriente: Es una corriente sinusoidal de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (50 Hz). Los armónicos de corriente que fluyen a través de la impedancia del sistema dan lugar a armónicos de tensión. Los armónicos de corriente y las impedancias del sistema, y en consecuencia los armónicos de tensión en los terminales de suministro, son variables en el tiempo.

Desequilibrios de tensión: En un sistema trifásico, es una condición en la cual los

valores eficaces de las tensiones de fase o los ángulos entre fases consecutivas no son iguales.

Corte de suministro: Interrupción del suministro por un tiempo superior a 10 segundos. Suelen ser causados por indisponibilidades forzadas o programadas en la red de alimentación.

Variación de frecuencia: Frecuencia distinta de 50 Hz. Se producen por grandes desequilibrios entre generación y demanda.

Normativa española referente a perturbaciones en la red eléctrica

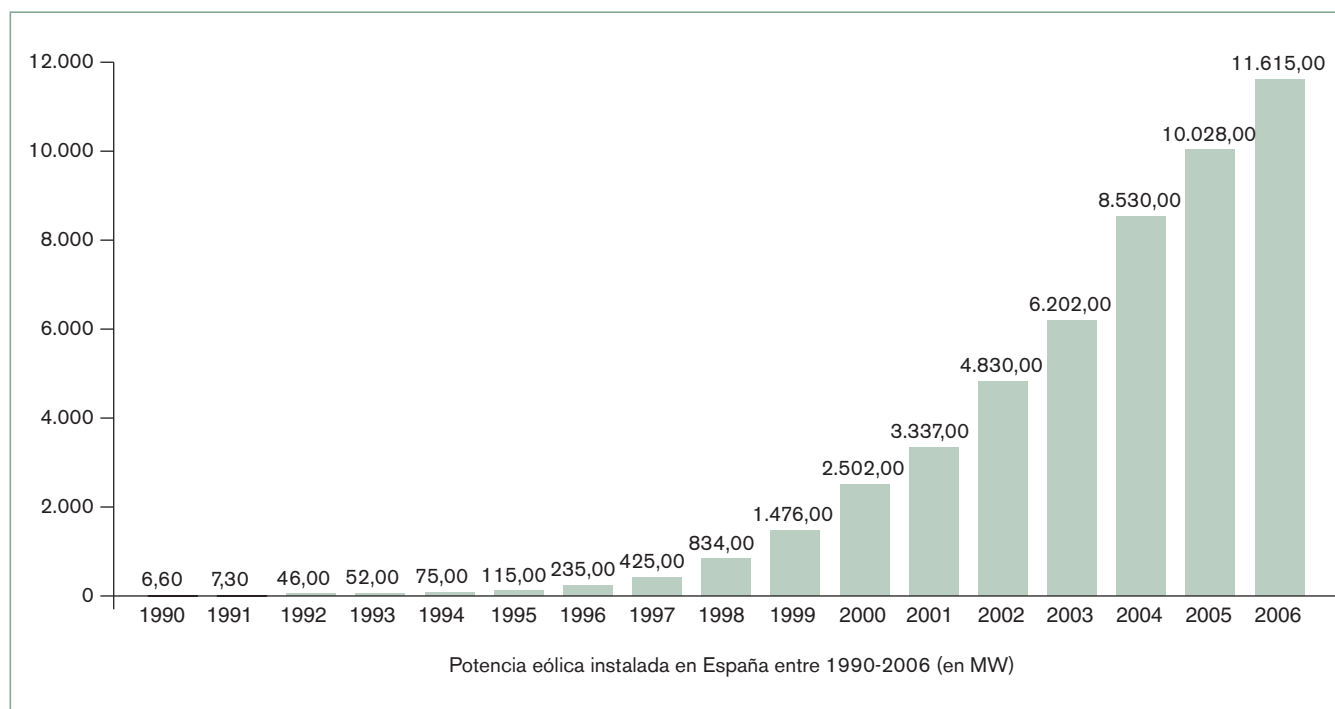
España es un país destacado dentro de Europa en la redacción de un procedimiento de cumplimiento de la generación distribuida ante perturbaciones existentes en la red eléctrica. En concreto, en España

es el Procedimiento de Operación 12.3 de REE el que establece los requisitos que han de cumplir las distintas instalaciones de producción en régimen especial a efectos de garantizar la continuidad de suministro frente a huecos de tensión, en cumplimiento de lo establecido en la disposición adicional cuarta del Real Decreto 436/2004. Este procedimiento de operación se centra fundamentalmente en los huecos de tensión estableciendo lo siguiente en la respuesta frente a cortocircuitos:

El titular de la instalación deberá adoptar las medidas de diseño y/o control necesarias para que todas las instalaciones de generación bajo su titularidad que estén incluidas en el ámbito de aplicación del presente procedimiento, se mantengan acopladas al sistema eléctrico, sin sufrir desconexión por causa de los "huecos de tensión" directamente asociados a la existencia de cortocircuitos correctamente despejados que puedan presentarse en el sistema eléctrico.

La propia instalación de producción y todos sus componentes deberán ser capaces de soportar sin desconexión huecos de tensión, en el punto de conexión a red, producidos por cortocircuitos trifásicos, bifásicos a tierra o monofásicos, con los perfiles de magnitud y duración indicados en la *figura 2*. Es decir, no se producirá la desconexión de la instalación para huecos de tensión en el punto de conexión a red incluidos en el área sombreada de la mencionada *figura 2*.

Figura 1. Evolución de la potencia eólica en España.



En el caso de cortocircuitos bifásicos aislados de tierra, el área sombreada de hueco de tensión en la que no se deberá producir la desconexión de la instalación será de forma semejante a la de la figura 2, pero estando situado el valor del límite inferior de tensión en 0,6 p.u., en lugar de en 0,2 p.u.

FACTS: tecnología actual y diferentes configuraciones de los dispositivos

El término FACTS se hizo oficial a finales de 1980 por el EPRI (Electric Power Research Institute) después de varios años desarrollando elementos de electrónica de potencia para la transmisión de potencia en corriente continua (HVDC) y para la compensación de potencia reactiva en corriente alterna.

Objetivos de los FACTS

Los objetivos de los FACTS son, por una parte, aumentar la capacidad de transmitir potencia en los sistemas eléctricos de distribución y, por otro lado, aumentar el margen de estabilidad controlando el flujo de potencia activa y reactiva.

Los principales beneficios de usar dispositivos FACTS son:

1. Mejor control sobre el flujo de potencia, guiándola a través de determinados caminos (menos cargados...)
2. Posibilidad de operación con niveles de carga seguros (sin sobrecarga) y cercanos a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
3. Mayor capacidad de transferencia de potencia en áreas controladas, con la consiguiente reducción del margen de reserva en generación.
4. Aumento de la seguridad del sistema, aumentando el límite de estabilidad transitoria y restringiendo las corrientes de cortocircuito y las de sobrecarga.
5. Atenuación de las oscilaciones de potencia del sistema, las cuales son dañinas para los sistemas y equipamientos conectados a la red.
6. Actuación rápida ante cambio en las condiciones de la red, proporcionando un control del flujo de la potencia real y efectivo.
7. Mayor seguridad en las conexiones entre líneas de distintas compañías y diferentes áreas.

Principales sistemas FACTS

Static Var Compensator (SVC)

Los compensadores estáticos reactivos son los comienzos de los dispositivos FACTS actuales. Un SVC está com-

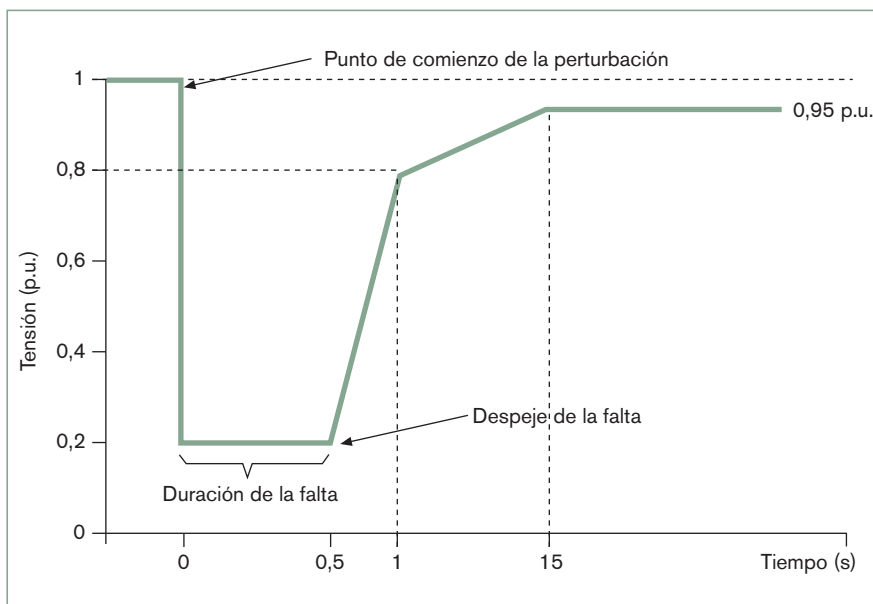


Figura 2. Curva tensión-tiempo que define el área del "hueco de tensión": Tensión fase-tierra correspondiente a las fases en falta.

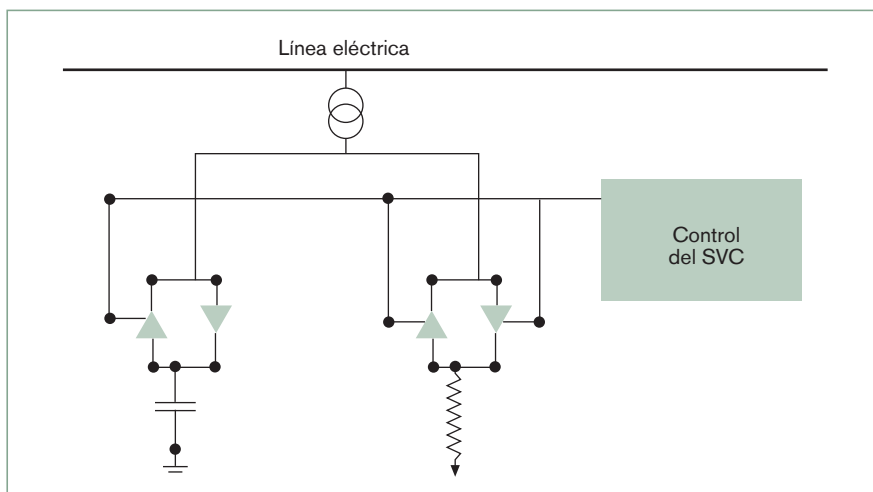
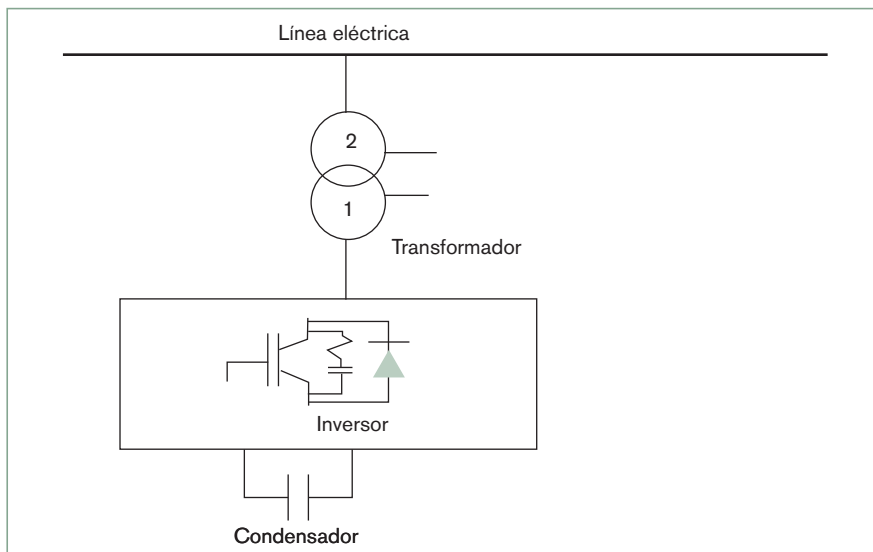


Figura 3. Esquema eléctrico del Static Var Compensator.

Figura 4. Esquema eléctrico del STATCOM.



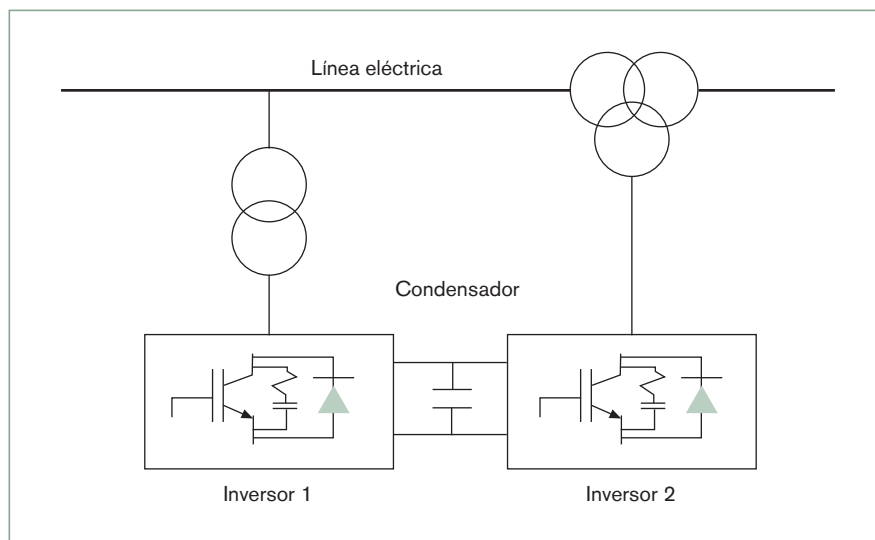


Figura 5. Esquema eléctrico del UPFC.

puesto por condensadores e inductancias controlados por tiristores, como muestra la *figura 3*:

Este dispositivo genera o absorbe potencia reactiva de la red, controlando el flujo de potencia activa y reactiva a lo largo de la línea a la que está unido.

STATCOM

El STATCOM o compensador estático se coloca en paralelo con la línea eléctrica a compensar. Su principal objetivo es controlar la potencia reactiva inyectada o consumida por la línea. Esta acción permite el control del nivel de tensión de la línea y también aumenta el ángulo de estabilidad de la misma consiguiendo con esto que el flujo de potencia en la línea aumente. Un STATCOM puede llevar a cabo dos tareas fundamentalmente:

1. Controlar el nivel de tensión en la línea inyectando energía reactiva a la red.
2. Aumentar la estabilidad de la red, junto con el aumento de la transmisión de potencia a través de la misma.

Unified Power Flow Coverter (UPFC)

La potencia que fluye en la red eléctrica puede ser variada controlando la impedancia de línea, el nivel de tensión o bien el ángulo de fase. El nivel de tensión está fijado por el generador, por lo tanto, es fijo y no puede ser modificado. El UPFC consta de dos inversores unidos por medio de un condensador, actuando este último como fuente de tensión. Por medio de estos dos inversores se genera una onda sinusoidal modificable en magnitud con la que se consigue controlar la potencia en la red. El esquema eléctrico del UPFC se observa en la *figura 5*.

El UPFC es capaz de aumentar la impedancia de línea, causando por lo tanto una disminución en la cantidad de potencia transmitida. Por otra parte, el UPFC también puede disminuir la impedancia de línea, con lo cual la potencia transmitida aumenta.

Esto es muy útil porque, controlando dos variables independientes (tensión y ángulo de fase), dos variables dependientes pueden ser controladas (potencia activa y reactiva).

La potencia transmitida por la línea eléctrica es una función que depende en relación inversa (hiperbólicamente) con la impedancia de línea. El dispositivo UPFC modifica la impedancia total de línea, inyectando una onda de tensión en serie con la línea a la que está unida, y sincronizada con la misma. De esta manera el UPFC controla activamente la potencia transmitida por la línea en la que está conectado.

Principal aplicación de los FACTS en generación eólica: solución ante huecos de tensión

La presencia de una perturbación en la red eléctrica puede causar el desacople de un aerogenerador de la red eléctrica a la que evacua la energía generada. Si es un único el aerogenerador que se desacopla de la red, el daño no es cuantioso, pero si hablamos de todo un parque eólico, las consecuencias pueden ser fatales. Hay momentos puntuales en los que la generación eólica es fundamental (por ejemplo en épocas en las que la demanda de energía es altísima, como invierno o verano) y los picos de demanda de energía son abastecidos por generación eólica. En esos casos, la desconexión de un par-

que eólico puede generar un fallo en cadena, por la insuficiencia de energía ante tal demanda.

La principal aplicación de los dispositivos FACTS en la generación eólica es la solución de los generadores eólicos ante huecos de tensión. Durante el hueco de tensión se producen unas corrientes extremadamente elevadas que pueden dañar partes sensibles de electrónica de potencia. Antes de que suceda esto, el aerogenerador pasa a estado de emergencia, estado en el que se desacopla de la red eléctrica. Este estado no es deseado por las últimas normativas europeas de integración de parques de generadores eólicos en la red. Para que el aerogenerador no se desacople de la red eléctrica ante una corriente elevada caben dos posibilidades: colocar un dispositivo integrado en cada aerogenerador, o bien colocar un dispositivo FACTS en el punto donde todo el parque eólico se conecta a la red eléctrica donde se evacua la energía, en el punto de conexión a red.

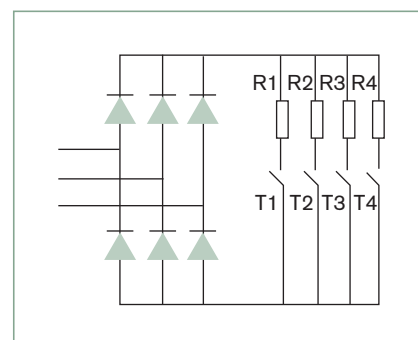
Dispositivo integrado

Si se coloca un dispositivo FACTS en cada aerogenerador, el dispositivo más rentable puede ser el TCR (Tiristor Controlled Resistor). Un TCR es un tipo de SVC (Static Var Compensator). Son unas resistencias controladas por tiristores. El esquema puede verse en la *figura 6*.

El TCR debe llevar a la corriente que circula por el estátor del generador a una situación controlada, durante el momento de producirse un hueco de tensión de unas características determinadas. El objetivo del dispositivo TCR es que el generador pueda seguir acoplado a la red mientras se produce el hueco de tensión.

La conexión se realiza al rotor del generador. Controlando los interruptores T1, T2, T3 y T4, con lo cual equivale a cortocircuitar el rotor del genera-

Figura 6. FACTS integrado en aerogenerador.



dor a través de la resistencia equivalente en cada momento, es el método para llevar la corriente del estátor del generador a una situación controlada. El TCR actúa en el momento en el que la corriente por el estátor del generador supera un valor determinado. Es en este momento en el que se comienza a actuar sobre los diferentes interruptores.

Ventajas e inconvenientes del uso del dispositivo integrado

Entre las ventajas del uso del dispositivo FACTS integrado en cada aerogenerador podemos destacar:

1. Protección de los aerogeneradores deseados frente a posibles perturbaciones existentes en la red eléctrica. Dentro de un mismo parque eólico pueden existir diferentes tipos de aerogeneradores (es común que existan ramales de aerogeneradores que producen 2.000 kW y otros que generen 850 kW) e incluso diferentes tecnologías, lo que implica que unos sean más sensibles que otros a ciertas perturbaciones. De ahí que pueda ser posible que únicamente sea necesario proteger algunos aerogeneradores y no todo el parque eólico. Mediante el uso de FACTS integrados esto es posible, se pueden proteger únicamente algunos aerogeneradores, con el consecuente ahorro de dinero.

2. También se puede dar el caso de que en un mismo parque eólico haya aerogeneradores de dos empresas distintas, lo que implica que no se llegue a un acuerdo de instalación de FACTS en todo el parque.

3. Con la utilización de este tipo de FACTS conseguimos que todo aerogenerador con FACTS instalado esté protegido frente a perturbaciones. Se consigue que el aerogenerador no se desacople de la red eléctrica a pesar de ocurrir, por ejemplo, un hueco de tensión debido a un cortocircuito en un punto cercano. Incluso si la perturbación se genera dentro del parque eólico, no todos los aerogeneradores del parque se desacoplan de la red eléctrica. Hasta ahora los aerogeneradores se desacoplan de la red eléctrica ante la presencia de un hueco de tensión, para autoprotgerse de las corrientes generadas en el rotor del generador.

Entre los inconvenientes de la utilización del dispositivo integrado tenemos:

1. La aplicación de este dispositivo es más caro que la de un dispositivo a nivel de subestación. La utilización de 50 TCR (en un típico parque de 50 aerogeneradores) es más caro que la utilización de un dispositivo en subestación.

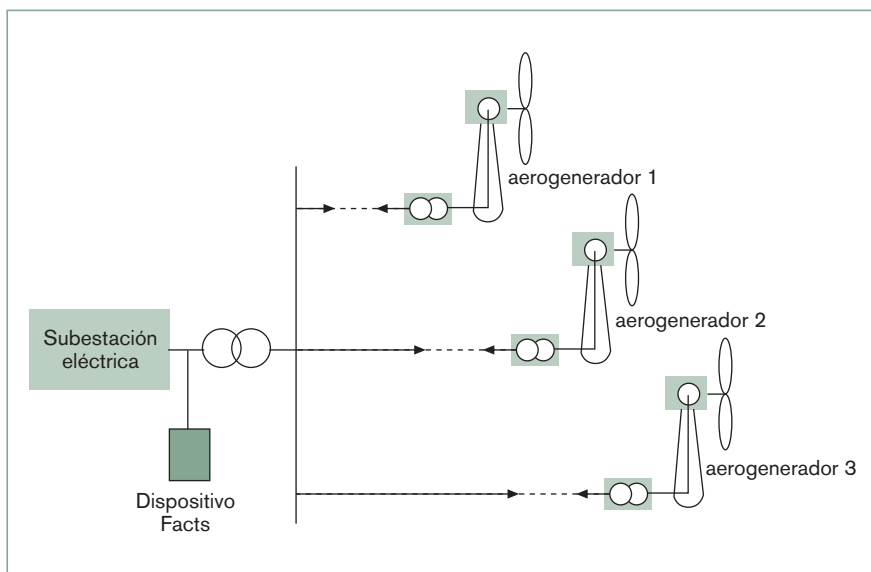


Figura 7. Dispositivo FACTS en subestación.

Dispositivo FACTS en subestación

Otra solución puede ser compensar los huecos de tensión allí donde se evacua toda la energía del parque eólico. En este caso el dispositivo FACTS más adecuado puede ser el STATCOM (STATIC COMPENSATOR).

Ventajas e inconvenientes del dispositivo a nivel de subestación

Entre las ventajas del uso del dispositivo FACTS a nivel de subestación podemos destacar:

1. Ante una perturbación en la red, el parque eólico en su conjunto está más protegido. La perturbación no llega al parque, se queda en la entrada, en la subestación, con lo que ningún componente del parque (transformadores, generadores, etc.), ven la perturbación. Esto disminuye el fallo de algún componente (sobre todo de electrónica de potencia) que se encuentra entre la subestación y el aerogenerador, que con el dispositivo integrado puede verse afectado.

La principal desventaja de este tipo de dispositivo es la siguiente:

1. Si la perturbación se produce dentro del parque eólico, este tipo de FACTS no puede corregirla, con lo que la desconexión de algunos generadores (principalmente los del ramal donde ocurre la perturbación) es casi segura. De todas maneras, que ocurra una perturbación dentro de un parque eólico es bastante improbable.

Bibliografía

Edson h. Watanabe, "New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads", IEEE transactions on power delivery, vol 8, no 2, abril 1993.

J. Amantegui, L. Zabalza y J.R. Torrealday, "Comportamiento de los accionamientos de velocidad frente a los huecos de tensión". Energía. Noviembre-Diciembre 1994.

Código de red de REE, P.O.12.3 "Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas", propuesta enviada al ministerio, Enero 2006

E. H. Wataba, R. M. Stephan, M. Aredes, "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8. no. 2, April 1993

L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, and B. Bak-Jensen, "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines." Technical Report Risø-R-1205(EN), Risø National Laboratory.

AUTOR

José Luis Olabarrieta Rubio
joseolabarrieta@hotmail.com

Ingeniero industrial, especialidad en Electricidad, por la Universidad del País Vasco (UPV-EHU). Ingeniero técnico industrial, especialidad en Electrónica industrial, por la Universidad del País Vasco. Máster en Prevención de Riesgos Laborales. Ha trabajado como investigador en proyectos de desarrollo de energías renovables. Actualmente trabaja como *project manager* en Alstom Power Systems, desarrollando proyectos nacionales e internacionales de rehabilitaciones de centrales hidroeléctricas.