

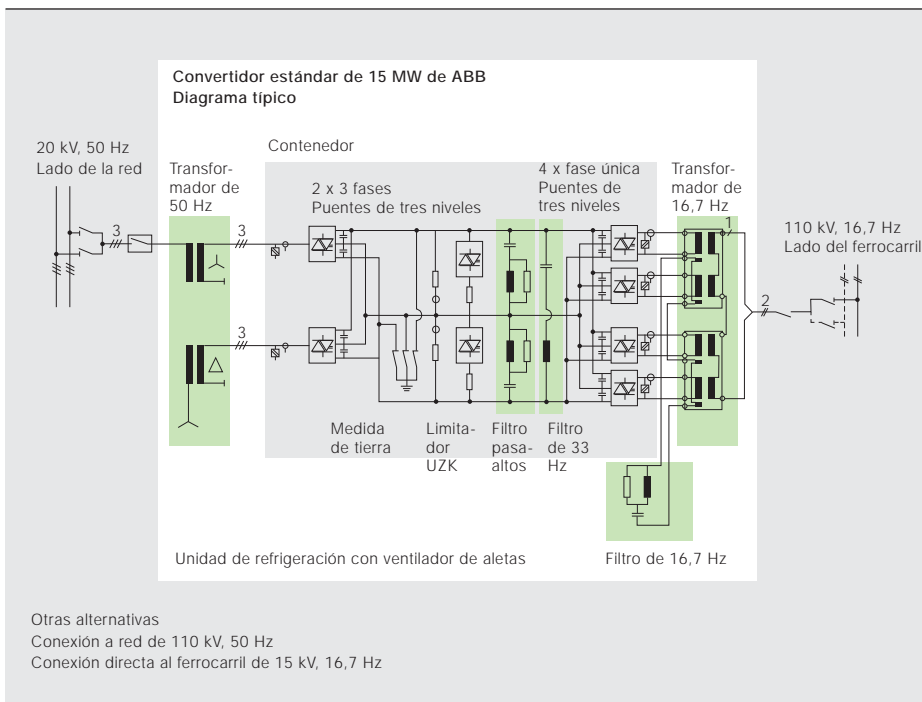


Convertidores estáticos para prestaciones dinámicas

La frecuencia correcta para las redes eléctricas ferroviarias

GERHARD LINHOFER, PHILIPPE MAIBACH, NIKLAUS UMBRICHT – Hay diferencias sustanciales entre la electrificación de los ferrocarriles y las redes nacionales. Una de ellas es que los ferrocarriles electrificados con CA suelen utilizar sólo una fase, al contrario de las redes nacionales que generan, transmiten y distribuyen alimentación trifásica. Además, las frecuencias son, en muchos casos, distintas a las de la red nacional. Y aunque utilicen la misma frecuencia, no necesariamente tiene por qué estar sincronizada. Actualmente se utilizan grandes convertidores de frecuencia basados enteramente en electrónica de potencia para transferir electricidad entre las redes nacionales y las ferroviarias. ABB ha instalado numerosos convertidores de frecuencia de 15 MW, por ejemplo en la alimentación eléctrica de los ferrocarriles del nuevo túnel suizo de Lötschberg. Ahora se pueden hacer instalaciones de potencia aún mayor, como la estación de 413 MW que se está construyendo para E-On en Alemania (el convertidor estático más potente construido hasta la fecha).

1 Esquema de una línea de una estación convertidora



Los ferrocarriles eléctricos necesitan mucha electricidad. De hecho, muchos de ellos explotan sus propias redes eléctricas de alta tensión e incluso algunos poseen sus propias centrales de generación. Sin embargo, pocos son totalmente autónomos. Deben intercambiar energía con las redes nacionales. Hoy en día, en los ferrocarriles eléctricos se emplean tres sistemas de alimentación distintos.

- En los países o regiones donde las líneas de ferrocarril se electrificaron hace relativamente poco, las catenarias se alimentan a menudo desde la red pública a una frecuencia de 50 Hz (o 60 Hz), casi siempre con una tensión de línea de 25 kV.
- En algunos países, en los que los ferrocarriles se electrificaron mucho antes, optaron por la corriente continua (CC), por lo general con tensiones de 1,5 y 3 kV.
- Otros países utilizan corriente alterna monofásica con una frecuencia de alimentación baja. Entre ellos se encuentran la costa oriental de Estados Unidos, donde se utilizan 25 Hz, y Noruega, Suecia, Alemania, Austria y Suiza, que utilizan 16,7 Hz (antes 16 2/3 Hz).

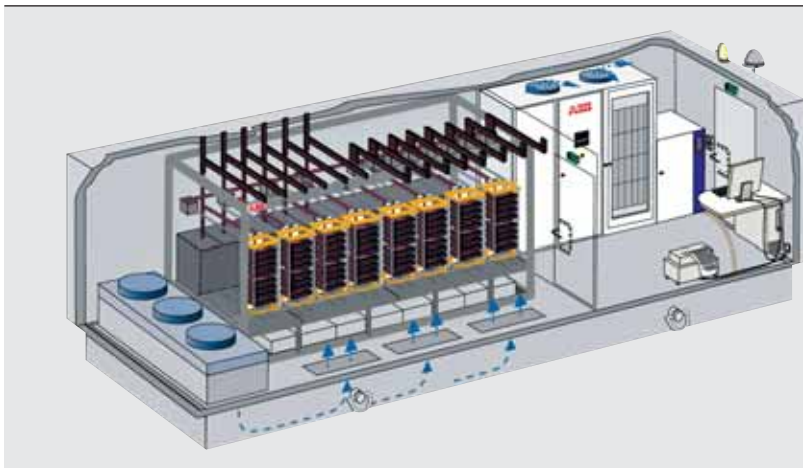
En el pasado se utilizaban convertidores rotativos para intercambiar electricidad entre las redes ferroviarias monofásicas y las

redes nacionales trifásicas. Consistían básicamente en dos máquinas eléctricas con distinto número de pares de polos montadas sobre un eje mecánico común. Recientemente se han desarrollado convertidores de frecuencia basados en electrónica de potencia para desempeñar esta función. De hecho, la potencia total de convertidores estáticos de frecuencia de este tipo que se ha puesto en servicio durante los últimos 15 años asciende a unos 1.000 MW. Aproximadamente dos tercios de ellos fueron suministrados por ABB. En la actualidad se están construyendo o se han pedido convertidores que totalizan otros 800 MW.

Desde el punto de vista del convertidor (sea rotativo o estático), la interconexión de una red trifásica y una monofásica es más difícil que la de dos redes trifásicas. Una de las razones principales es que la potencia de la red monofásica oscila a dos veces la frecuencia de la red, mientras que en la red trifásica es prácticamente constante. En el caso de los convertidores rotativos, las fluctuaciones consiguientes del par y la potencia se absorben y amortiguan mediante masas giratorias. Pero hay que absorber las vibraciones resultantes mediante anclajes mecánicos y cimentación. La consecuencia es una mayor complejidad de diseño, tanto de la máquina como de su cimentación.

En el caso de los convertidores estáticos de frecuencia, la oscilación se filtra em-

El diseño compacto condujo al desarrollo de módulos de convertidor normalizados y permitió fabricar convertidores de distintas clases de potencia.



El contenedor del convertidor tiene los componentes siguientes:

- Sistema de refrigeración
- Módulos de convertidor y limitador de tensión con electrónica de control junto al convertidor
- Barras de bus del enlace de CC y condensadores detrás de los módulos del convertidor
- Alimentadores de las barras de bus a los transformadores
- Distribución de energía auxiliar e instrumentación y sistema de control (control, mediciones y protección)
- Toma de corriente no interrumpible para instrumentación y sistema de control
- Manejo local por medio de HMI e impresora de sucesos

pleando una batería de condensadores y una inductancia que se sintonizan al doble de la frecuencia de trabajo de la red de la línea férrea.

Otro problema reside en el hecho de que el convertidor estático, no sólo tiene que actuar como fuente de tensión y energía reactiva, sino que también debe poder tratar sin interrupciones la transición desde el funcionamiento de sistema interconectado al trabajo aislado en caso de perturbación en la red. Además, debe ser capaz de actuar como la única fuente de alimentación de una sección aislada de la línea del ferrocarril y poder resincronizarse posteriormente con el resto de la red de alimentación ferroviaria una vez eliminada la perturbación.

Larga tradición de convertidores estáticos

ABB puede apoyarse en una larga historia de tecnología de convertidores estáticos.

El convertidor estático no sólo tiene que actuar como fuente de tensión y energía reactiva, sino que también debe manejar la transición desde el funcionamiento en un sistema interconectado al aislado en caso de algún problema.

Los primeros convertidores para la alimentación de ferrocarriles con potentes semiconductores desactivables en forma de

GTO (tiristores desactivables por puerta) entraron en servicio en Suiza en 1994. Desde entonces, se ha desarrollado un nuevo elemento semiconductor, el tiristor conmutado por puerta integrada (IGCT), que incorpora una capacidad de conmutación mucho más avanzada, menores pérdidas y una unidad de puerta de pequeña inductancia como "componente" integrado. El diseño compacto condujo al desarrollo de módulos de convertidor normalizados y permitió fabricar convertidores de distintas clases de potencia. En la actualidad, hay en servicio más de veinte convertidores de la gama de 15 a 20 MW que funcionan a completa satisfacción de los clientes.

15-20 MW: la estación convertidora del túnel de Lötschberg

Uno de estos suministros fue la estación convertidora de Wimmis para el nuevo túnel de ferrocarril de Lötschberg (Suiza)¹, por el que pueden circular los trenes a 200 km/h. En 2005, ABB suministró cuatro unidades de convertidor para este ferrocarril. El cliente fue la compañía Bernese Power Utility (BKW), que era entonces la responsable de suministrar energía eléctrica al ferrocarril. Cada una de las cuatro baterías de convertidores, con una potencia de 20 MW, convierte

inicialmente en CC (corriente continua) la alimentación trifásica de la red de 50 Hz. La energía se almacena brevemente en un

enlace de CC antes de ser convertida por un inversor en tensión alterna monofásica con una frecuencia de 16,7 Hz.

En → 1 se muestra un esquema de una estación convertidora completa como la instalada para el túnel de Lötschberg en Suiza. Tiene los siguientes componentes:

Convertidor de 50 Hz

El convertidor de 50 Hz está formado por dos unidades trifásicas estándar de tres niveles. Se combinan dos fases en una pila para formar un módulo bifásico. El convertidor se construye en una configuración real de 12 impulsos. Por tanto, solamente se generan armónicos característicos de 12 impulsos ($n = 12k \pm 1$; $k = 1, 2, 3, 4 \dots$).

Convertidor de 16,7 Hz

Este convertidor se compone de cuatro unidades bifásicas estándar de tres niveles. Se combinan dos fases en una pila para formar un módulo bifásico. El convertidor de 16,7 Hz se dispone en una configuración de ocho escalones. Los niveles de tensión de salida del convertidor se agregan por medio de la conexión en serie de los devanados del transformador en el lado de la línea en los cuatro puentes H de tres niveles con impulsos desfasados.

Limitador de tensión

Si la tensión en el enlace de CC supera un límite superior, se descarga a través de una resistencia hasta alcanzar un umbral inferior. El control del limitador de tensión actúa de forma independiente del sistema

Nota a pie de página

¹ Véase también "Suiza en tren" en la página 31 de este número de la *Revista ABB*.



El convertidor y el sistema de control asociado se entregan completamente conectados y probados en un contenedor estanco.

de control del convertidor para la CA bifásica (lado de la línea férrea) y la CA trifásica (lado de la red). Así se asegura que la tensión del enlace de CC permanezca en todo momento dentro del margen fijado.

Enlace de CC

Todos los módulos bifásicos del convertidor se conectan entre sí en el lado de CC por medio de una barra bus común. Ésta lleva las conexiones de los módulos individuales del convertidor con los condensadores del enlace de CC conectados directamente, las baterías de filtros del enlace de CC y las mediciones de tensión.

El enlace de CC constituye la conexión entre los convertidores de 50 Hz y de 16,7 Hz. Incluye los siguientes componentes principales:

- Batería de condensadores conectados directamente que se emplea para almacenar la energía.
- Filtro de 33,4 Hz que absorbe las fluctuaciones de energía de la red de la línea férrea.
- Filtro pasa-altos que absorbe los armónicos de las frecuencias más altas desde la red de la línea férrea, en particular los armónicos tercero y quinto de la misma.

Contenedor del convertidor

El convertidor y el sistema de control asociado se entregan completamente conec-

tados y probados en un contenedor estanco. El sistema de refrigeración está situado en un contenedor distinto. Ambos contenedores se montan sobre una base de apoyo común. En → 2 se ilustra una vista en sección del contenedor del convertidor.

La mayor estación convertidora ferroviaria del mundo se está construyendo actualmente en Datteln, Renania del Norte-Westfalia, Alemania. Entregará una potencia nominal de 413 MW.

Transformador de 50 Hz

El transformador del convertidor de 50 Hz alimenta los dos puentes trifásicos basados en IGCT. Un transformador trifásico se compone de un núcleo de tres ramas en un diseño de capa doble con un yugo in-

termedio o de dos núcleos de tres ramas encerrados en un depósito.

Transformador de 16,7 Hz

El transformador del convertidor de 16,7 Hz sirve para sumar las cuatro tensiones parciales en una tensión monofásica prácticamente sinusoidal con una frecuencia nominal de 16,7 Hz. El transformador se compone de cuatro unidades monofásicas. Las tensiones parciales rectangulares se generan en una fuente de tensión de CC (enlace de CC) con ayuda de cuatro puentes de convertidores monofásicos IGCT empleando el método de modulación de amplitud de impulso y se alimentan a los cuatro devanados del lado de la válvula del transformador. La suma y adaptación a la tensión de la red ferroviaria se efectúan en el devanado de alta tensión. Se conecta un filtro a los devanados terciarios conectados en serie o a la red de la línea férrea.

Filtro de línea

En el lado de los 16,7 Hz se emplea un filtro para reducir la distorsión de armónicos producida por el convertidor, ya muy baja, a valores aún menores. Esto también puede ser necesario en ocasiones en el lado de los 50 Hz.

Control remoto

En el caso de los convertidores estáticos del proyecto suizo de Lötschberg, todo el



El ALR calcula de forma continua la utilización óptima de las unidades de salida disponibles (convertidores estáticos y rotativos) en función de la demanda de potencia de la red ferroviaria o de ajustes manuales.

sistema se controla a distancia mediante un ordenador de control del sistema de ABB, conocido como ALR², que captura y analiza mediante interfaces normalizadas los datos procedentes de los cuatro convertidores de 20 MW y los dos convertidores rotativos. El ALR calcula de forma continua la utilización óptima de las unidades de salida disponibles (convertidores estáticos y rotativos) en función de la demanda de potencia de la red ferroviaria o de ajustes manuales. Por tanto, la reserva de potencia necesaria se puede conectar o desconectar de la red en unos pocos segundos mediante el ordenador de control.

Todas las funciones de control, regulación y seguridad están equipadas con el sistema PSR³ de ABB, íntegramente digital y ya probado. Este sistema está diseñado para su uso en servomecanismos muy rápidos y precisos para sistemas de convertidor/inversor. Los terminales de operador del sistema de control de potencia MicroSCADA de ABB de la sala de control central garantizan la visualización fiable de los valores medidos y cálculos, así como el funcionamiento de los circuitos y secuencias de supervisión de todas las partes del sistema. El funcionamiento de reserva en caliente de los componentes de supervisión del sistema de control de potencia (ALR y terminales de operador) garantiza una disponibilidad muy alta del sistema.

La instalación se ilustra en → 3. En el lado izquierdo se puede ver el transformador de 50 Hz, incluido el circuito del filtro de 50 Hz sobre el transformador (montado en un pórtico). El transformador monofásico de 16,7 Hz está en el lado derecho y el contenedor del convertidor está en el centro, entre los transformadores.

Aumento de la potencia de la unidad a 30 MW

Se pueden montar con mucha facilidad otras clases de potencia (en saltos de 15 MW) gracias a su diseño modular. Los módulos adicionales del convertidor se conectan en paralelo. Esta generación de convertidores establece nuevas referencias en términos de prestaciones, espacio ocupado y tiempos reducidos para su instalación y puesta en servicio. Las opiniones positivas demuestran que el convertidor normalizado para líneas férreas de ABB se adapta bien a las necesidades de los clientes.

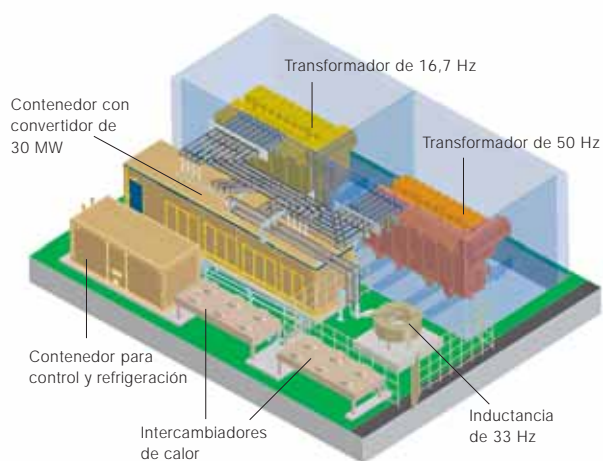
Después de la presentación con éxito de los convertidores de 15–20 MW, los clientes han pedido un nuevo aumento de la potencia de la unidad. Es así como ABB ha desarrollado otro convertidor de frecuencia estándar para 30 MW con una capacidad de sobrecarga opcional, dependiendo de la aplicación y de las condiciones ambientales. Se pueden combinar en paralelo dos o más unidades de 30 MW para conseguir mayores valores de potencia por estación.

30 MW: estación convertidora de Timelkam

A finales de 2007, la red de los ferrocarriles austriacos ÖBB encargó una nueva estación convertidora para instalarla cerca de la ciudad de Timelkam, en la provincia de la Alta Austria. La estación incluye dos estaciones convertidoras independientes

Notas a pie de página

- 2 ALR es la sigla de Anlagentechniker (ordenador de control del sistema).
- 3 En instalaciones anteriores: PSR (Programmierbarer Schneller Rechner, ordenador rápido programable); en instalaciones actuales: AC 800 PEC.

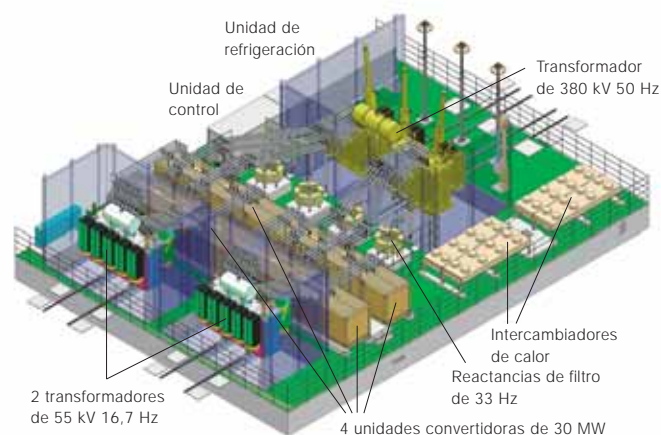


de 30 MW que se alimentan de la red nacional a 50 Hz/110 kV y la convierten a 16,7 Hz/110 kV. De esa forma se dispone de un total de 60 MW de energía eléctrica para la red ferroviaria sin pérdidas de transporte, gracias a su proximidad a la central de generación. El primer convertidor de 30 MW entró en servicio comercial en julio de 2009 → 4.

413 MW: estación convertidora de Datteln

La mayor estación convertidora ferroviaria del mundo se está construyendo actualmente en Datteln, Renania del Norte-Westfalia, Alemania. La estación fue encargada por la compañía suministradora de electricidad E.ON en 2007 y entregará una potencia nominal de 413 MW. Reemplazará a los convertidores rotativos actuales, que han llegado al final de su vida económica y técnica. La estación convertidora recibirá alimentación a 50 Hz de la nueva central eléctrica de Datteln, situada en las cercanías, y suministra corriente a 16,7 Hz a la red de 110 kV de los ferrocarriles alemanes (DB). El nodo de Datteln es uno de los "puntos de suministro" más importantes de la red de DB. Por lo tanto, la estación convertidora debe tener una fiabilidad muy alta. ABB es responsable de toda la ingeniería de este proyecto, es decir, del diseño del sistema convertidor, de las especificaciones de todos los componentes y del desarrollo del software de control y protección. Dado que se trata de un proyecto llave en mano, la instalación y la puesta en servicio forman también parte del proyecto.

El suministro de ABB incluye cuatro estaciones de convertidor independientes, cada una de ellas con una potencia nomi-



nal de 103 MW, obtenida con cuatro convertidores estándar de 30 MW. La capacidad de sobrecarga incorporada permite al cliente seguir recibiendo la potencia nominal de 413 MW, incluso si una de las cuatro estaciones convertidoras no está en servicio. Cada unidad convertidora tiene los siguientes componentes principales:

- 1 convertidor/transformador en el lado de 50 Hz
- 4 contenedores de convertidor con los filtros del circuito intermedio
- 1 contenedor de control
- 1 contenedor de refrigeración (que aloja el sistema de refrigeración)
- 4 intercambiadores de calor agua/aire
- 2 transformadores convertidores montados en serie en el lado de la línea férrea de 16,7 Hz

Además de la dificultad técnica representada por este importante proyecto, la logística y una buena planificación son esenciales para entregar a tiempo el equipo. Una característica peculiar es la larga duración del contrato (su finalización está prevista para 2011) unida a una programación estricta. Este proyecto puede también ser la avanzada de otras aplicaciones: cuatro baterías de convertidores de 103 MW cada una establecen una nueva referencia de potencia en convertidores estáticos de frecuencia → 5.

Resumen

ABB es líder en este tipo de sistemas. El enfoque modular permite una respuesta flexible a los diversos requisitos de potencia. En los próximos años habrá una mayor demanda de unidades convertidoras de 15 MW, a medida que vayan llegando al final de su vida útil muchos convertidores rotativos. ABB está realizando esfuerzos

enormes para seguir teniendo éxito en el mercado con esta tecnología tan exigente.

Gerhard Linhofer

Philippe Maibach

Niklaus Umbricht

ABB Automation Products

Turgi, Suiza

gerhard.o.linhofer@ch.abb.com

philippe.maibach@ch.abb.com

niklaus.umbricht@ch.abb.com

Referencias

- [1] Gaupp, O., Linhofer, G., Lochner, G., Zanini, P. "Powerful static frequency converters for transalpine rail routes". *Revista ABB* 5/1995, pp. 4-10.
- [2] Lönard, D., Northe, J., Wensky, D. "Statische Bahnstromrichter - Systemübersicht ausgeführter Anlagen". *Elektrische Bahnen* 6/1995, pp. 179-190.
- [3] Mathis, P. "Statischer Umrichter Giubiasco der Schweizerischen Bundesbahnen". *Elektrische Bahnen* 6/1995, pp. 194-200.
- [4] Steimer, P., Grüning, H., Werninger, J., Dähler, P., Linhofer, G., Boeck, R. "Acoplamiento en serie de tiristores GTO para convertidores de alta potencia". *Revista ABB* 5/1996, pp. 14-20.
- [5] Steimer, P., Grüning, H. P., Werninger, J., Carroll, E., Klaka, S., Linder, S. "IGCT, nueva tecnología para convertidores de alta potencia y bajo coste". *Revista ABB* 5/1998, pp. 34-42.
- [6] Meyer, M., Thoma, M. "Netzkompatibilitätsstudie und -messungen für die Umrichteranlage Wimmis". *Elektrische Bahnen* 12/2006, pp. 567-574.
- [7] Jampen, U., Thoma, M. "Statische Frequenzumrichteranlage Wimmis". *Elektrische Bahnen* 12/2006, pp. 576-583.