

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



INTERCONEXIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS

COMPLETAMENTE ESTÁTICOS DE 100 MW, APLICADO AL

SISTEMA DE TRANSPORTE ELÉCTRICO DE BREMEN -

ALEMANIA

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

WILMER AMÉRICO ROJAS BULLÓN

PROMOCIÓN

1988 - I

LIMA-PERU

2006

**INTERCONEXION DE SISITEMAS ELÉCTRICOS
COMPLETAMENTE ESTÁTICOS DE 100 MW,
APLICADO AL SISTEMA DE TRANSPORTE
ELÉCTRICO DE BREMEN-ALEMANIA**

A Maritza y Wendy,
mi querida madre Marcela,
A mis hermanos Carlos y
Miguel, por su amor, cariño y
apoyo de siempre.

SUMARIO

En el presente informe, se describe el diseño del convertidor estático de frecuencia Bremen, con una potencia nominal de 100 MW, siendo esta la instalación de tecnología de los tiristores GTO más grande del mundo. Este equipo de tecnología de punta, se utiliza para el intercambio de energía entre una red eléctrica de ferrocarril y la red nacional,

Se inicia con la historia del desarrollo de la electrónica de potencia, cuyo principio se basa en la técnica de conversión. En Alemania se emplean las conversiones masivamente en tracción eléctrica, como rectificadores de subestaciones de ferrocarriles, para el acoplamiento de redes (convertidores ferroviarios), entre los más importantes.

La parte principal del informe es describir los criterios de Diseño del Convertidor Estático Bremen; de elevada potencia, con frecuencias de $16 \frac{1}{3}$ Hz - 50 Hz, el cual tiene conmutación en serie de tiristores GTO, y una potencia de conversión de 100MW en ambas direcciones. Se conoce el principio de funcionamiento y diseño del lado del ferrocarril, el circuito intermedio y del convertidor del lado de corriente trifásica y dispositivos de compensación.

Se completa con las aplicaciones de los IGCT (Integrated Gate Conmutated Thyristor), que son una nueva generación de tiristores para alta potencia a menor costo, mejorando la fiabilidad por MVA y reduciendo el número de componentes y la complejidad de los mismos.

Espero con este **Informe de Sustentación**, motivar a los alumnos y profesionales de las universidades, a conocer el diseño y las aplicaciones de los convertidores estáticos de frecuencia..

INDICE

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
ANTECEDENTES HISTÓRICOS	
1.1 Historia evolutiva del desarrollo	3
1.2 Aplicaciones de los convertidores en tracción eléctrica	7
1.3 Uso del acoplamiento de frecuencias y protección del medio ambiente	10
CAPÍTULO II	
FUNDAMENTO TEORICO	
2.1 El Convertidor estático de frecuencia	12
2.2 Conversión de energía y los tiristores desconectables GTO	14
2.3 Conexión en serie de tiristores GTO	17
2.4 Desconexión absolutamente simultanea	19
2.5 Modulo de fase de baja inductancia	20
CAPÍTULO III	
DISEÑO DEL CONVERTIDOR ESTATICO DE FRECUENCIA DE 100 MW	
3.1 De las máquinas rotativas a los convertidores estáticos	22
3.2 Bremen: Elevada potencia con un solo convertidor	23
3.3 Conmutación y disposición del acoplamiento de frecuencias	26
3.4 Principio de funcionamiento y diseño del lado del ferrocarril	28
3.5 Procedimiento de mando y tensión de salida	31
3.6 Convertidor del lado ferroviario	32

3.7 Transformadores del lado ferroviario	36
3.8 Diseño del circuito intermedio	38
3.9 Convertidor del lado de corriente trifásica	39
3.10 Sistema electrónico cercano al convertidor	40
3.11 Técnica de control - mando	40
3.12 Dimensionado, verificación y puesta en servicio	44
CAPÍTULO IV	
OTRAS APLICACIONES	
4.1 Los IGCT, nueva generación de tiristores para alta potencia a menor costo	48
4.2 Más fiabilidad por MVA	49
4.3 Aplicaciones comerciales	50
4.4 Nuevas Aplicaciones para la Electrónica de Potencia.	51
CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFIA	54

INTRODUCCIÓN

La Electrónica de Potencia se ha desarrollado en base a la técnica de conversión. En los años treinta en Alemania, ya había en servicio un gran número de instalaciones convertidoras con válvulas de vapor de mercurio, sobre todo en forma de rectificadores no controladas. Al comienzo de los años sesenta los trabajos de investigación produjo un perfeccionamiento constante de los componentes semiconductores y de la correspondiente técnica de circuitos, lo que originó un desarrollo rápido y una ampliación de los convertidores clásicos.

A medida que la electrónica de potencia iba demostrando su eficacia y especialmente desde la introducción exitosa de los tiristores desconectables GTO (Gate – Turn – Off), significó un importante paso adelante en el desarrollo de los convertidores de alta potencia. Para el intercambio de energía entre una red eléctrica de ferrocarril y la red nacional, se utilizan actualmente los convertidores estáticos de frecuencia. El acoplamiento de frecuencias completamente estático **Bremen**, con potencia nominal de 100 MW, es la instalación de tecnología GTO más grande del mundo.

El perfeccionamiento específico de los tiristores GTO, el nuevo tipo de mando y la conexión en serie de estos componentes han permitido construir económicamente un acoplamiento de frecuencias completamente estáticos de $16 \frac{2}{3}$ Hz – 50Hz.

El objetivo de este informe es conocer el diseño y las aplicaciones del convertidor completamente estático de 100 MVA en Bremen (Alemania), destinado al sistema de tracción ferroviaria. La instalación se encuentra en servicio desde el año 1997, siendo el gran aumento de potencia fruto de varios avances importantes de los tiristores desconectables GTO y los IGCT (Integrated Gate – Commutated Thyristor).

El método del trabajo es descriptivo y basado en los informes de las revistas ABB y el fundamento teórico en libros de electrónica de potencia.

En el primer capítulo se desarrolla la historia de los dispositivos aplicados a los convertidores, desde las válvulas a vapor, los primeros semiconductores aplicados en rectificadores, hasta los dispositivos conmutados por red (tiristores y diodos).

El segundo capítulo contiene el fundamento teórico de los convertidores de frecuencia, los dispositivos GTO para alta potencia, el desarrollo de su acoplamiento en serie, una tecnología que mejora la disponibilidad y la rentabilidad.

El tercer capítulo abarca el diseño de este equipo, sus componentes y puesta en servicio. Es importante señalar el uso del gas de alto horno en la producción del acero para la generación de electricidad, lo que es muy provechosa para el medio ambiente y como tal la reducción de emisiones de dióxido de carbono.

Se completa con las aplicaciones de los IGCT (Integrated Gate Conmutated Thyristor), que son una nueva generación de tiristores para alta potencia a menor costo, mejorando la fiabilidad por MVA y reduciendo el número de componentes y la complejidad de los mismos. **Los convertidores ACS 1000**, es el primer accionador estándar de CA para aplicaciones de media tensión; comercializado por ABB con éxito para aplicaciones de 0.5 a 6 MVA; varias unidades están ya funcionando en la industria.

Termino animando a los jóvenes universitarios y profesionales, se interesen en la investigación de estos equipos de electrónica de potencia, como es el caso de los acoplamientos de redes, sistemas electrónicos de potencia denominados FACTS (Flexible AC Transmisión Systems), variadores de velocidad para motores eléctricos, etc.

CAPITULO I

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1.1 Historia Evolutiva del Desarrollo

La electrónica de potencia se ha desarrollado en base a la técnica de conversión. Ya en los años treinta había en servicio gran número de instalaciones convertidores con válvulas de vapor de mercurio, sobretodo en forma de rectificadores no controlados, en potencias de hasta el margen de los megavatios. Inicialmente se trataba de los convertidores más simples, a saber, rectificadores no controlados desarrollados a principios de este siglo para cargas de batería con redes de corriente monofásica y trifásica [2].

En el transcurso del desarrollo surgieron otros campos de aplicación, a saber, la alimentación de consumidores de corriente continua de potencia media (el llamado servicio de alumbrado y fuerza) mediante subestaciones rectificadores y redes urbanas de corriente continua, además del servicio ferroviario con este mismo tipo de corriente y la electrolisis.

En los ferrocarriles de corriente continua se trata de tranvías municipales, ferrocarriles elevados y metropolitanos, así como suburbanos, en los que se utilizan motores de continua por sus favorables características de arranque y fácil control.

En la tabla N° 1.1, se relacionan las distintas clases constructivas de válvulas convertidores verdaderos. Estas son válvulas de alto vacío, descarga de gases y materiales semiconductores. Estos últimos se han impuesto casi plenamente en la electrónica de potencia, frente a los otros tipos constructivos.

Tabla 1.1 Tipos constructivos de válvulas convertidores verdaderas.

DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	PROPIEDADES
1. Válvula de alto vacío	con cátodo incandescente
2. Válvulas de descarga	
3. Válvulas de gas noble	- Con cátodo incandescente y carga. - De gas noble.
4. Válvulas de vapor de mercurio	- Con cátodo incandescente y carga. - De vapor de mercurio (tiratrón). - Con cátodo líquido (cátodo de mercurio). - Con varilla de encendido (ignitrón).
5. Válvulas semiconductores	
6. Semiconductores policristalinos	- Rectificadores oximetálicos - Rectificadores de selenio
7. Semiconductores monocristalinos	- Diodos semiconductores - Tiristores - Transistores

En toda una serie de países europeos se realizó la electrificación de los ferrocarriles de largo recorrido, así como también con redes de tensión continua alimentados por medio de rectificadores de vapor de mercurio.

Disponiendo de estas válvulas de descarga técnicamente maduras, la técnica de convertidores alcanzó gran importancia al final de los años veinte. Las válvulas de vapor de mercurio se emplearon principalmente para la transformación de corriente alterna y trifásica en corriente continua controlada y regulable. Ya en los años treinta se intentó resolver el problema de la generación de corriente alterna monofásica a $16 \frac{2}{3}$ Hz, para la alimentación de redes ferroviarias, partiendo de la red trifásica de 50 Hz.

Para la rectificación en el margen de potencias bajas, en 1930 se pusieron en servicio los primeros rectificadores de semiconductores, a saber; primero, rectificadores oximetálicos y, poco después, de selenio, cuya base de partida es material semiconductor tetracristalino.

Los rectificadores de selenio se han ido perfeccionando paulatinamente y tienen aun hoy día muchos campos de aplicación como pequeños rectificadores (por ejemplo, rectificadores de alta tensión en aparatos de televisión).

En los años cincuenta se logró desarrollar diodos semiconductores de material monocristalino, primero como diodos de germanio y algunos años después también como diodos de silicio, en los que pueden alcanzarse tensiones elevadas. En 1958 la General Electric desarrolló en Estados Unidos los primeros tiristores, denominados entonces SCR (Silicon Controlled Rectifier). Estos nuevos tipos de semiconductores de potencia jugaron un papel importante en la técnica de energía eléctrica comparable al de los transistores en la telecomunicación, un decenio antes. Al comienzo de los años sesenta los trabajos de investigación condujeron a un perfeccionamiento constante de los componentes semiconductores y de la correspondiente técnica de circuitos, lo que originó un desarrollo rápido y una ampliación de los convertidores clásicos. Junto a los circuitos con válvulas de vapor de mercurio técnicamente maduras, se consiguieron nuevos tipos de circuitos y aplicaciones. Esto se vio favorecido por dos factores: por la mejora de las características eléctricas de los semiconductores de potencia que, respecto a las válvulas de vapor de mercurio, presentan considerables ventajas, sobre todo en lo que respecta a la baja tensión de disparo y ausencia de reencendido, y muy en particular en lo concerniente al comportamiento dinámico de conexión y desconexión, así como por los avances en el campo de los componentes utilizados en la parte de control y regulación, que además permitieron la realización de complejas funciones de control y regulación. La fase presente del desarrollo se caracteriza por la introducción cada vez mayor de circuitos integrados en la parte de control y regulación [2].

A mitad de los años sesenta se amplió el concepto de técnica de convertidores a la de electrónica de potencia. Durante los últimos 50 años, las aplicaciones de conversión de energía han experimentado un gran auge, hasta el punto que hoy en día, cerca del 15% de la energía eléctrica generada se convierte, de una u otra forma por medio de los dispositivos electrónicos.

Generalmente, los dispositivos de electrónica de Potencia se han venido utilizando en aquellos campos en que tienen mayor interés económico. Entre las primeras aplicaciones se cuentan el suministro eléctrico, los cargadores de baterías y los accionamientos para motores. Durante los años sesenta se introdujeron los dispositivos conmutados por la red (tiristores y diodos) en las aplicaciones de tracción y, en la década de los setenta, los

tiristores y diodos rápidos en aplicaciones autoconmutadas (mandos por impulsos y convertidores). Los años ochenta fueron testigos de una rápida expansión de los accionamientos de motores industriales gracias al desarrollo de los transistores bipolares darlington y triplington, de los GTO (gate turn – off tiristor) y de los IGBT (insulated gate bipolar transistor).

Durante los primeros años del ochenta, las estructuras basadas en transistores desplazaron a las estructuras basados en tiristores (tiristores rápidos y GT) hacia potencias más altas, y al iniciarse los años noventa, los GTO, se convirtieron en “dispositivos de muy alta potencia”, indicados para la tracción y para los accionamientos industriales de alta potencia ($> 1 \text{ MW}$) o tensión media ($> 2.3 \text{ KV}$)

Para el intercambio de energía entre una red eléctrica de ferrocarril y la red nacional, se utilizan actualmente los convertidores estáticos de frecuencia. El acoplamiento de frecuencia completamente estático Bremen, con una potencia nominal de 100 MW, es la instalación de tecnología GTO más grande del mundo.

El perfeccionamiento específico de los tiristores GTO, el nuevo tipo de mando y la conexión en serie de los GTO han permitido construir económicamente un enlace de frecuencias completamente estático de 16 – 2/3 Hz y 50 Hz de gran potencia. El acoplamiento se caracteriza por una curva de rendimiento muy superior a los equipos anteriormente diseñados, en toda la gama de potencias, así como por su elevada disponibilidad.

Por motivos históricos, las redes eléctricas de ferrocarril se explotan en muchos países por corriente continua o también con frecuencia distinta que la red eléctrica nacional. Por su parte las compañías de ferrocarril poseen centrales eléctricas propias, aunque debido a las oscilaciones del consumo eléctrico a lo largo del tiempo, generalmente están conectadas a la red eléctrica nacional.

En Alemania hay unos 40 acoplamientos, esto es, enlaces entre la red eléctrica ferroviaria y la alimentación pública de energía eléctrica. A través de estos acoplamientos, los ferrocarriles cubren una cuarta parte aproximadamente de su demanda energética. Los acoplamientos sirven para estabilizar la red eléctrica ferroviaria. Dado que la mayoría de los acoplamientos de red permiten el intercambio energético en ambas direcciones, esto es desde la red eléctrica nacional hasta la red ferroviaria y viceversa, la generación de corriente de la red ferroviaria puede resultar más económica.

1.2 Aplicaciones de los Convertidores en Tracción Eléctrica.

La electrónica de potencia se emplea en aquellos campos en los que existen problemas de transformación, control o maniobra sin contactos de energía eléctrica.

Los motivos por lo que cada vez se utilizan más los convertidores estáticos son sus características técnicas y de explotación.

Sus características técnicas más importantes son la capacidad de transformación de la energía eléctrica por tensión, frecuencias, número de fases, su facultad de control y regulación rápido, sin escalonamiento, así como su buen rendimiento.

En lo que respecta a las características de explotación de los convertidores estáticos hay que citar su fiabilidad, su reducido mantenimiento y su desgaste mínimo.

Las conversiones se emplean masivamente en tracción eléctrica, a saber, como rectificadores de subestaciones de ferrocarriles, para el acoplamiento de redes (convertidores ferroviarios), para la alimentación de redes a bordo, como aparatos de carga y como convertidores de calefacción. Además se emplean tiristores en antiparalelo como equipo de conmutación para interruptores de escalonamiento en transformadores de locomotoras para la conmutación externa del arco.

Los accionamientos alimentados por convertidor desplazan cada vez en mayor medida en la tracción a otras soluciones. En tranvías y metropolitanos se utilizan reguladores de corriente continua en lugar de combinadores mecánicos y resistencias, así como en automotores y locomotoras conexiones en puente semicontrolados y motores de corriente mixta. También existen en servicio de prueba locomotoras con convertidores pulsatorios y motores asíncronos de tracción.

Los convertidores se emplean también para el acoplamiento de redes, por ejemplo, para el acoplamiento elástico de frecuencias de redes de corriente trifásica con redes monofásicas ferroviarias. La figura 1.1, se muestra un acoplamiento elástico en la red trifásica nacional de 50 Hz., y la monofásica de $(16 - 2/3)$ Hz de los Ferrocarriles Federales Alemanes. Para ello se utiliza un convertidor rotativo con un motor asíncrono y un generador síncrono monofásico. La potencia variable de deslizamiento del motor de anillos rozantes se expide a la red trifásica por medio de un convertidor de control. Los convertidores con tiristores en antiparalelo en conexión puente trifásico son alimentados por tres transformadores propios (cada uno de 1.250 kVA) que están conectados a la red nacional de 50 Hz mediante el transformador de las máquinas. El generador síncrono monofásico es excitado por medio de un convertidor de tiristores, al igual que el generador de eje.

Este permite un servicio, independiente de la red nacional de 50 Hz, del generador síncrono como desplazador de fase.

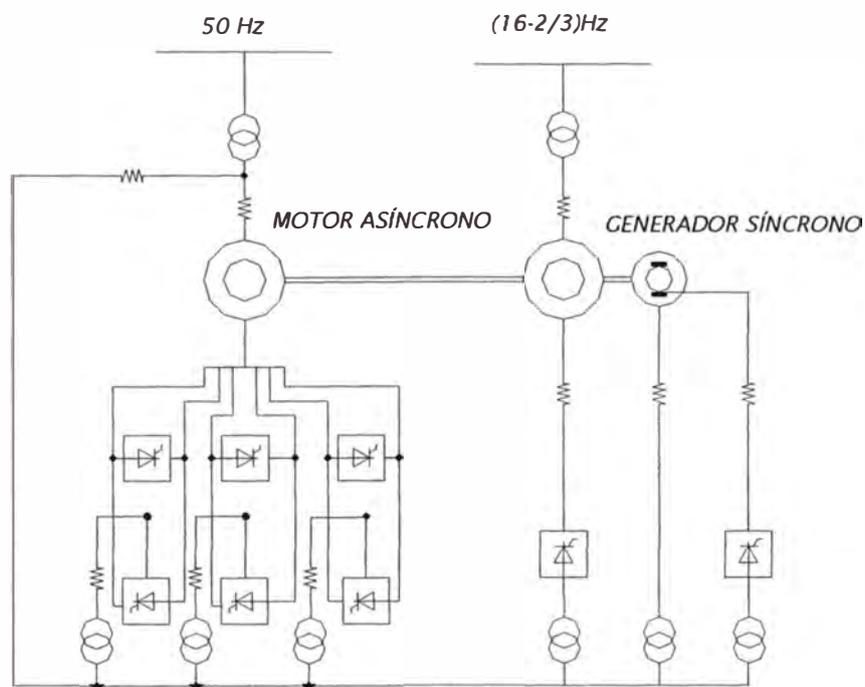


Fig. 1.1 Acoplamiento elástico de redes de 50 Hz 3 ~ /16-2/3 Hz 1 ~

Como un ejemplo más de la aplicación de los convertidores en tracción, la figura 1.2, muestra el equipo de una conexión en *punte semicontrolado* asimétrico con un dispositivo de apagado. En los dos puentes 1 y 2 accionados por conexión de sucesión puede interrumpirse previamente la corriente en los tiristores principales HT1 o HT2 del puente 2 mediante los tiristores de apagado LT1 o LT2 y los condensadores C1 o C2. La energía magnética de las inductancias de la red se acumula primero en el condensador de tensión continua CO en forma de energía eléctrica, y al finalizar el proceso de apagado se descarga sobre la carga de corriente continua.

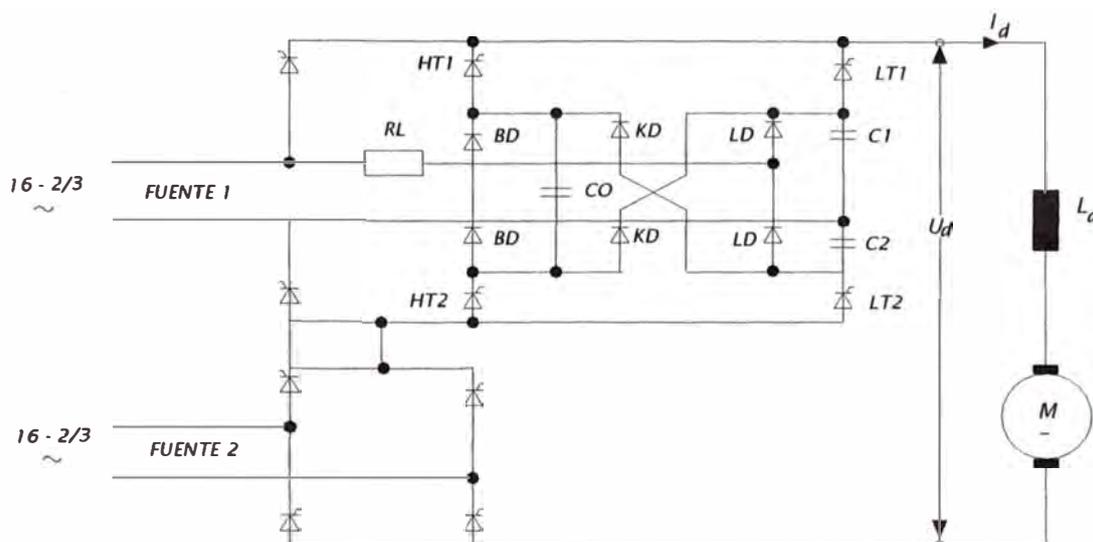


Fig. 1.2 Dos puentes asimétricos semicontrolados en conexión sucesiva con dispositivo de apagado para puente 2.

En la figura anterior se tiene los siguientes componentes

HT1, HT2 Tiristores principales.

BD Diodos de bloqueo.

LT1, LT2 Tiristores de apagado.

C1,C2 Condensadores de apagado.

KD Diodos de conmutación.

LD Diodos de carga

RL Resistencia de carga

CO Condensador de tensión continua.

Este circuito (conexión en puente trifásico asimétrico apagable LUB) permite evitar por control de seccionamiento la potencia reactiva que aparecía en caso de utilizar el control por corte. También puede evitarse la potencia reactiva de conmutación. EL factor de potencia λ alcanza valores superiores a 0,95.

La figura 1.3, muestra el esquema de principio de una locomotora diesel-eléctrica con ondulator pulsatorio y motores asíncronos de tracción. El generador trifásico accionado por el motor Diesel produce la energía eléctrica, que alimenta las barras colectoras de corriente continua pasando previamente por un rectificador. Un total de cuatro onduladores pulsatorios generan un sistema trifásico de frecuencia y tensión variable, al que están

conectados los motores de tracción. El accionamiento corresponde al convertidor de circuito intermedio.

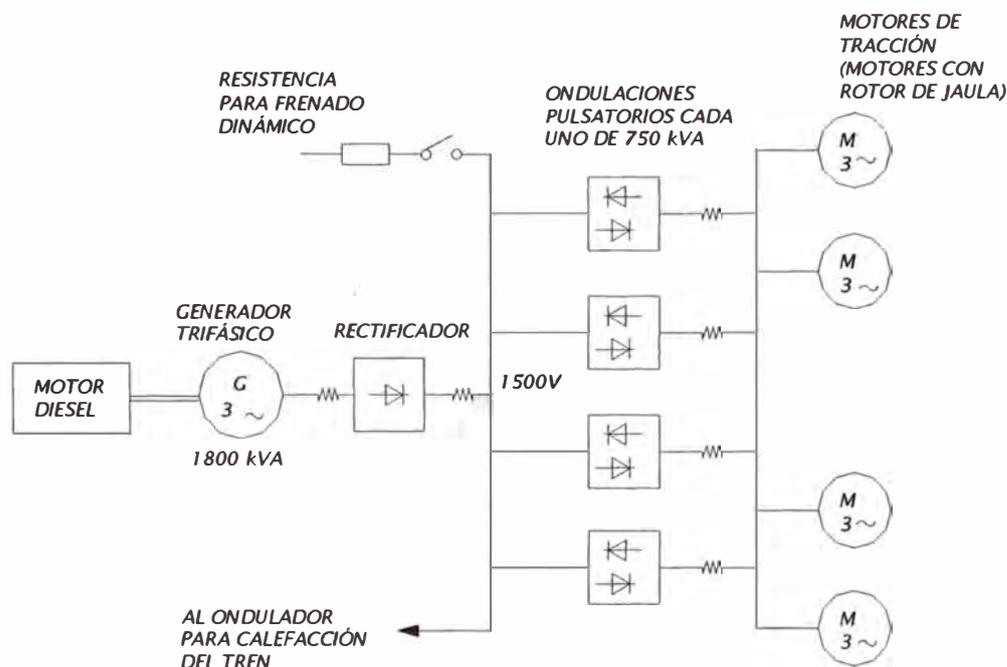


Fig. 1.3 Locomotora Diesel-eléctrica con ondulador pulsatorio y motores asíncronos

Si una locomotora de este tipo con motores asíncronos debe alimentarse desde la red de corriente alterna monofásica, habrá que acoplar ésta al cortocircuito intermedio de tensión continua. Para ello se emplean convertidores pulsatorios en conexión puente monofásico.

. 3 Uso del Acoplamiento de Frecuencias y Protección del Medio Ambiente.

En la producción de hierro bruto de la acería Stahlwerke Bremen GMBH, se obtienen considerable cantidades de gas de alto horno, las cuales son conducidas por gasoductos con diámetro de hasta 1.8 metros hasta la central eléctrica cercana de Mittelsburen y utilizadas por la compañía eléctrica municipal Stadwerke de Bremen AG para generar corriente eléctrica ferroviaria para los ferrocarriles alemanes Deutsche Ban AG. Esta cooperación en el aprovechamiento del gas de alto horno, practicada con gran éxito desde 1964, es también muy provechosa para el medio ambiente, ya que permite ahorrar carbón en otras centrales térmicas, lo que a su vez reduce las emisiones de dióxido de carbono.

Sin embargo y dado que la demanda de corriente eléctrica ferroviaria – corriente de tracción - suele disminuir los fines de semana, debía hasta ahora quemarse un parte del gas de alto horno. El acoplamiento completamente estático de frecuencias de 100MW, puesto ahora en servicio en Mittelsburen, permite a Stadtwerke Bremen convertir la corriente de tracción en corriente trifásica y viceversa, optimizando así enormemente el uso del gas de alto horno. En el futuro podrá utilizarse casi la totalidad del gas de alto horno para la generación de electricidad. La parte no utilizada por los ferrocarriles alemanes Deutsche Ban AG, será transformada y devuelta a la red de Stadtwerke Bremen AG.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

Hoy en día, no existe prácticamente ningún accionamiento que funcione sin un convertidor de frecuencia. Y es que, con el impulso adecuado en el momento preciso se ahorra energía y se reducen los costos de explotación.

2.1 El Convertidor estático de frecuencia

Son equipos de electrónica de potencia que realiza la conversión de corriente alterna (AC) en corriente continua (DC) y DC en AC. Esto consiste de un puente rectificador de 6 ó 12 pulsos y transformador con taps regulables y neutro aislado que suministra el nivel adecuado para el convertidor. Con esta configuración el sistema dc se podrá establecer su propia referencia a tierra y aterrando el terminal positivo o negativo del convertidor.

2.1.1 Rectificadores Controlados

Su función es convertir la corriente AC en DC (rectificadores) o convertir la DC en AC (inversores) regulando el nivel de la tensión de salida a través del control de fase. Los convertidores son considerados como matrices de llaves de potencia cuya tensión da salida se construye a partir de segmentos de la tensión de entrada dando como resultado la producción de armónicos en la entrada y en la salida del mismo. Los convertidores son considerados amplificadores de potencia con alta ganancia, con baja pérdida en los dispositivos semiconductores lo que hace que el convertidor presente alta eficiencia típicamente en el orden de 98%. La operación de los dispositivos como interruptores hacen que el convertidor sea tratado como un sistema discreto y no lineal.

El control de fase consiste en variar la tensión de salida retrasando la entrada en conducción del tiristor (ángulo de disparo). El tiristor es encendido aplicando un pulso corto al terminal de puerta y es desconectado por conmutación natural o conmutado por línea; en el caso de cargas altamente inductivas, la desconexión es obtenida disparando otro tiristor del rectificador durante el semiciclo negativo de la tensión de entrada.

Los convertidores pueden clasificarse dependiendo de la alimentación en dos tipos (1) convertidores monofásicos, (2) trifásico. Cada tipo a su vez puede sub dividirse en (a) convertidor semi controlado, (b) convertidor total controlado y (c) convertidor dual.

El convertidor semi controlado opera en un Π solo cuadrante teniendo una sola polaridad para la tensión y corriente de salida. El convertidor total controlado (puente completo) puede operar en dos cuadrantes pudiendo tener tensión de salida con polaridad positiva o negativa sin embargo la polaridad de la corriente de salida será única. El convertidor dual puede operar en cuatro cuadrantes y la tensión y corriente de salida podrán invertir sus polaridades. En algunas aplicaciones los convertidores son conectados en serie para operar en altas tensiones y mejorar el factor de potencia de la entrada.

2.1.2 Convertidores de 6 pulsos

Utilizado ampliamente en aplicaciones industriales hasta el nivel de 220 KW, en las que se requiere de operación en dos cuadrantes. Los tiristores se disparan a intervalos de 60° . La frecuencia de la tensión de salida es 6 veces la frecuencia de red, siendo menor la necesidad de filtraje que en los convertidores trifásicos semicontrolados y de media onda.

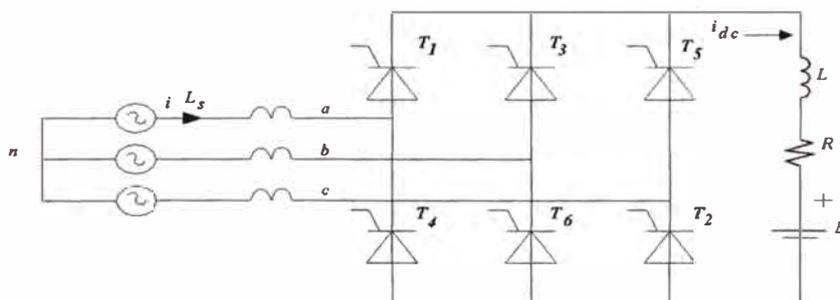


Fig. 2.1 Rectificador trifásico.

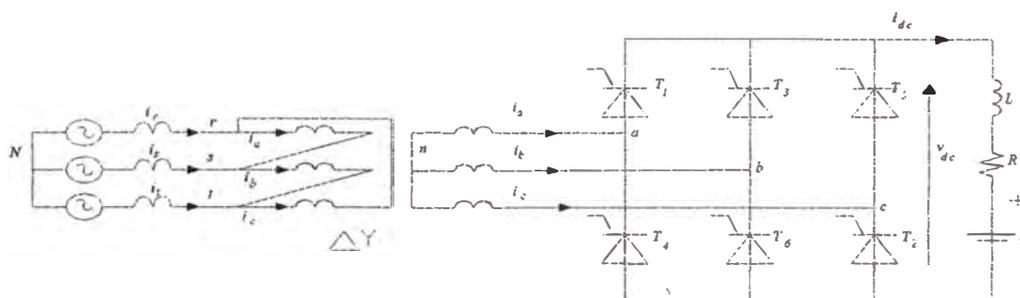


Fig. 2.2 Convertidor de 6 pulsos acoplados por transformador

2.1.3 Convertidores de 12 pulsos

Dos o más convertidores son conectados en serie para obtener las altas tensiones en DC. Los convertidores están en serie en el lado DC y en paralelo en el lado AC. Un banco de transformadores es conectado entre la red y el convertidor, cuya relación de transformación es ajustado bajo carga. En el convertidor de 12 pulsos se conectan en serie dos convertidores de 6 pulsos, cada uno con dos transformadores uno conectado en estrella – estrella y el otro en estrella – delta. En este tipo de conexión debido al desfase de 30 grados introducido, produce la cancelación de términos armónicos de baja orden en el lado AC [4].

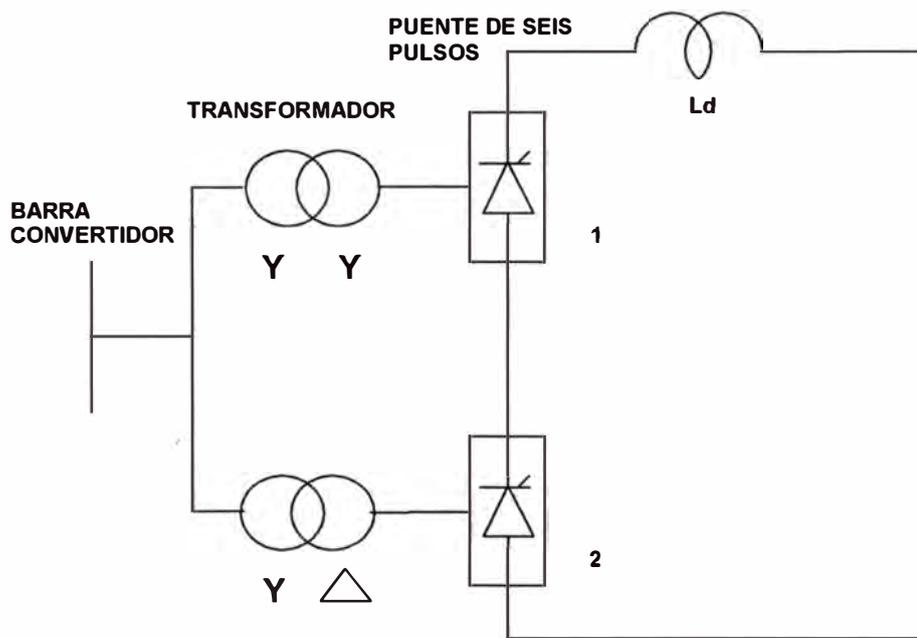


Fig. 2.3 Convertidor de 12 pulsos.

2.2 Conversión de energía y los tiristores desconectables GTO

Tradicionalmente la conversión electrónica de la energía de alta potencia ha aplicado el principio de conversión de frecuencia con conmutación de línea utilizando tiristores para controlar el flujo de corriente. El tiristor es equivalente a una válvula de corriente binaria con dos estados discretos, el primero de conducción y el segundo del bloqueo de la corriente. El encendido se realiza mediante la inyección de una corriente de puerta y se

corta en función del paso por el valor cero de la tensión de la línea a 50/80 Hz. Sin embargo, el hecho de que el tiristor no puede ser cortado con el terminal de puerta limita la gama de aplicaciones de este dispositivo [3].

El corte controlado por puerta fue introducido a finales de los años sesenta con el tiristor de corte de puerta (GTO), o llamados también tiristores GTO desconectables (Gate – Turn – off). Al hacer posible la construcción de **convertidores eficientes** para controlar la frecuencia de salida, más adelante significó un importante paso adelante en el desarrollo de los convertidores de alta potencia. La empresa ABB ha desarrollado el acoplamiento en serie de tiristores GTO, una tecnología que mejora la disponibilidad y la rentabilidad.

Los tiristores GTO son convertidores de conmutación automática que pueden utilizarse para la alimentación redes en islote que solo tiene su alternador propio. Se puede regular a voluntad la posición de fase de la corriente y de la tensión de los cuatro cuadrantes, de modo que se pueden ajustar las potencias activas y reactivas independientemente una de otra. **Conectando en serie** módulos controlados escalonadamente, o aumentando la frecuencia del ciclo, se puede conseguir una tensión de salida prácticamente senoidal.

2.2.1 Convertidores tensión o corriente

Los convertidores de conmutación automática pueden realizarse con circuitos intermedios con tensión o corriente continua independiente de la carga. Puesto que los convertidores con circuito intermedio de tensión son de uso más universal y aprovechan mejor los componentes de semiconductores, en las explicaciones que siguen nos limitaremos a ellos.

2.2.2 Configuraciones y funciones de los convertidores GTO

Un convertidor GTO está constituido por módulos de fase, cada uno de ellos formado por dos ramas. En la figura 1, se muestra en forma muy simple su funcionamiento como interruptor. Dos o tres módulos de fase conectados en puente constituyen el elemento fundamental del Convertidor GTO para una red monofásica o trifásica. Así se puede conectar una tensión, positiva, negativa o nula, a la salida del convertidor (devanados de transformadores, motores, etc.). Los tiristores GTO más usados actualmente permiten transmitir como máximo 5 MVA por puente [3].

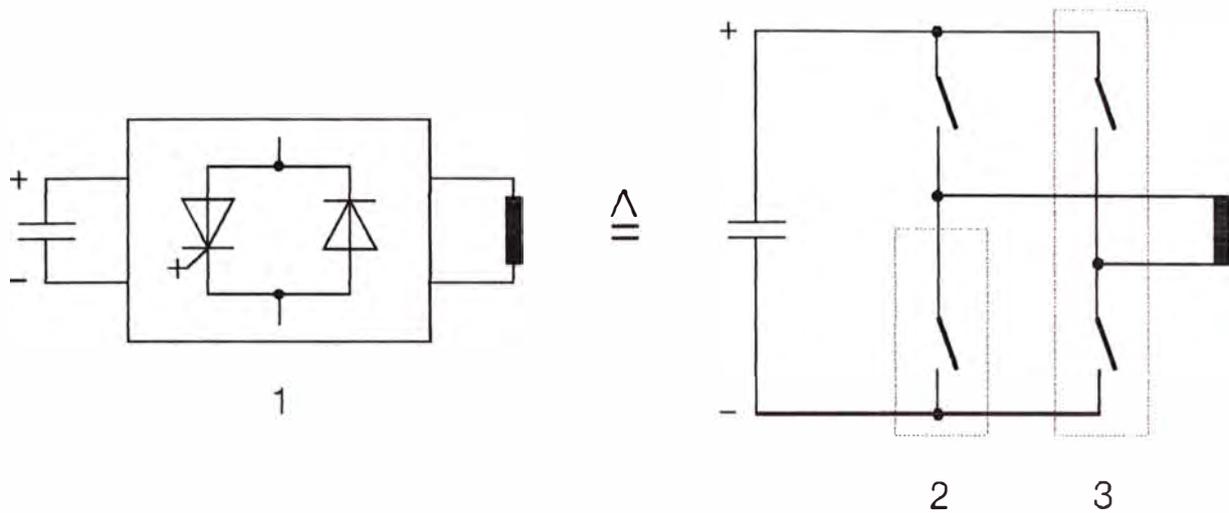


Fig. 2.4 Componente de un convertidor

1. Puente H para convertidor monofásico
2. Rama
3. Módulo de fase

2.2.3 Circuitos para convertidores de alta potencia

Por razones físicas y económicas, el desarrollo de los semiconductores de potencia de tipo bloqueo avanzan con lentitud, al menos en cuanto al incremento de las potencias de desconexión. El manejo de potencias elevadas se hace repartiendo la potencia total entre varias instalaciones parciales, mucho más costosas que las que tienen un solo gran convertidor. Tienen un precio de compra más alto, su explotación es más cara, su rendimiento es menor, tienen menor disponibilidad a plena potencia y, además, necesitan más espacio. Otra posibilidad es acoplar en paralelo o en serie varios montajes en puente de tiristores GTO.

En la figura 2.5, se muestra los componentes de un convertidor de alta potencia:

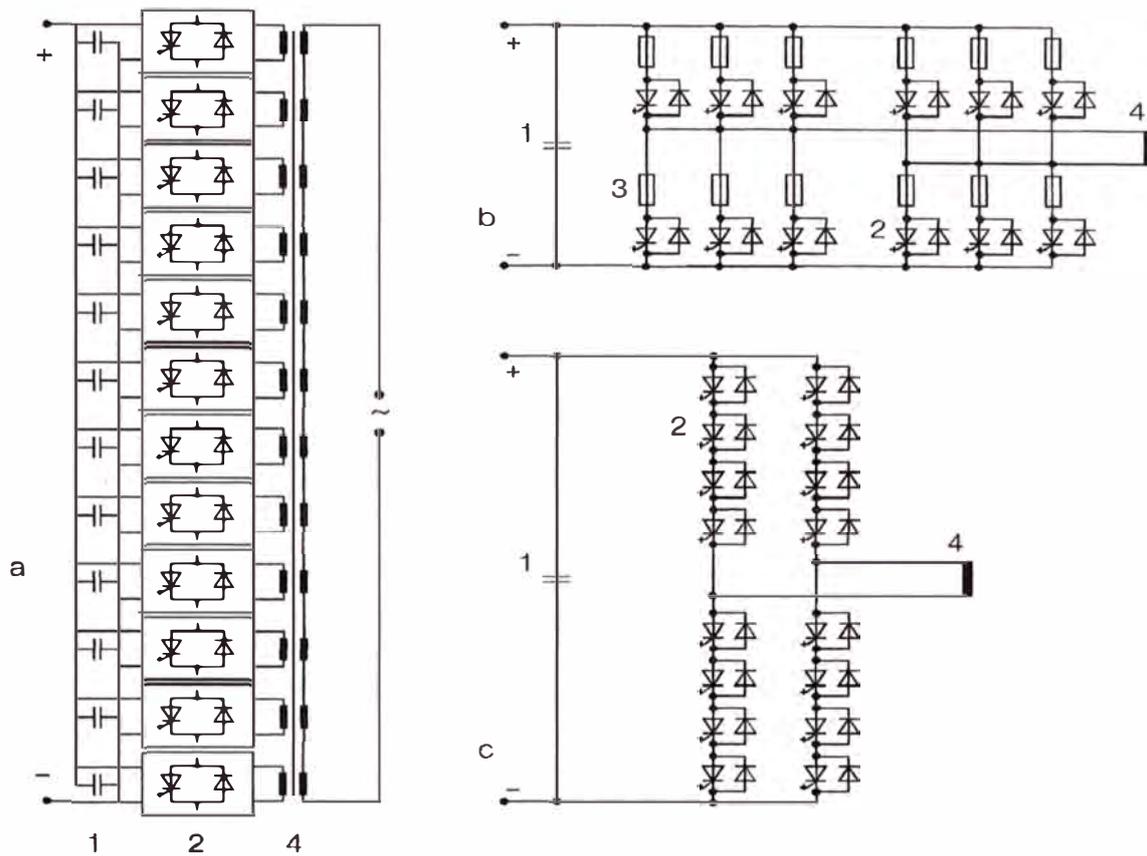


Fig. 2.5 Componentes de un convertidor de alta potencia

- a. Acoplamiento paralelo / serie de la instalación de Giubiasco.
- b. Tiristores GTO acoplados en paralelo.
- c. Tiristores GTO acoplados en serie.
- d. Acoplamiento paralelo / serie de la instalación de Giubiasco.
- e. Tiristores GTO acoplados en paralelo.
- f. Tiristores GTO acoplados en serie.
1. Condensador del circuito intermedio de tensión continua.
2. Convertidores GTO (puente H).
3. Cortocircuitos con semiconductores de alta tensión
4. Transformador de red

2.3 Conexión en serie de tiristores GTO

La conexión en serie de los tiristores ha demostrado su eficacia durante décadas en las instalaciones de transporte de corriente continua de alta tensión. Análogamente, la conexión en serie de los GTO, comparada con las otras posibilidades de acoplamiento, es

la que tiene costos más favorables, tanto de instalaciones como de explotación. En principio es posible aumentar la tensión del circuito intermedio en función del número de GTO conectados en serie, pero hay que conceder una gran importancia a la homogeneidad del reparto de la tensión entre los semiconductores. El hecho de que hasta ahora no se haya utilizado la conexión en serie de los GTO se debe a los distintos tiempos de retardo y a la irregularidad de la tensión durante el proceso de desconexión.

La figura 2.6, muestra las condiciones reinantes durante la desconexión, cuando no se toman medidas especiales. Ha sido necesario conseguir varios avances importantes para garantizar la fiabilidad y el alto rendimiento que se necesitan.

Proceso de desconexión de tres tiristores GTO acoplados en serie (figura 3) sin que se hayan adoptado medidas para mejorar el reparto de la tensión. En el primer GTO desconectado, la corriente circula por el circuito de protección y carga al condensador con $I_c = C_s du/dt$. Se produce una sobretensión transitoria en el tiristor GTO.

U_1, U_2, U_3 Tensiones parciales RCD (R_s, C_s, D_s) Circuito de acoplamiento y
D Diodos antiparalelos.

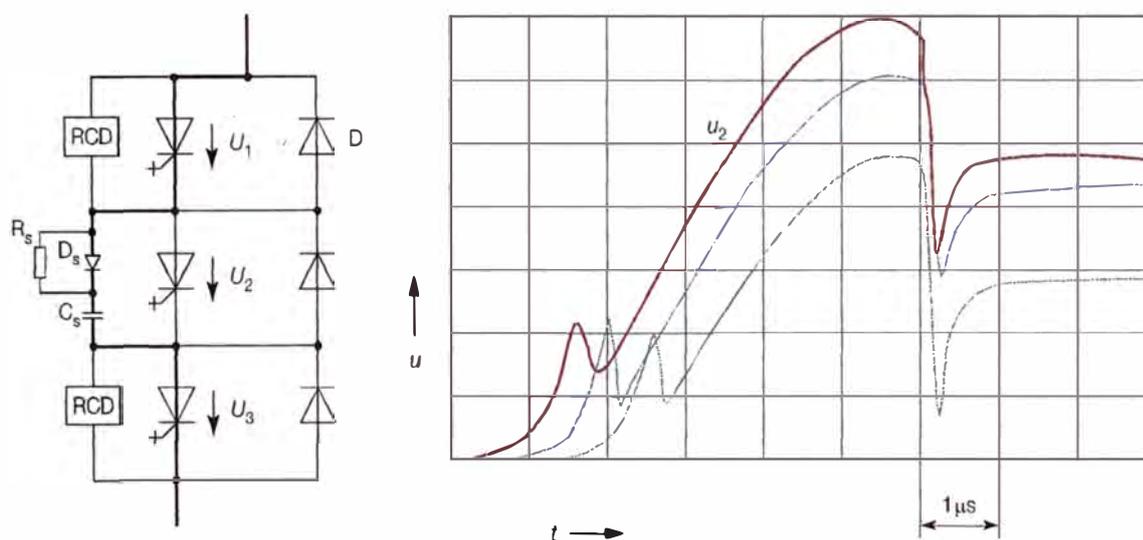


Fig. 2.6 Desconexión de tres tiristores GTO acoplados en serie

2.4 Desconexión absolutamente simultánea

Durante la desconexión, la tensión del circuito intermedio se reparte entre los GTO. Para que ninguno de los semiconductores esté solicitado más allá de su tensión máxima admisible, los GTO acoplados en serie han de ser desconectados exactamente al mismo tiempo. Para ello se dispone de las posibilidades siguientes:

- * Selección de los semiconductores: se combinan sólo elementos con características muy parecidas. La gestión del almacenaje se hace más complicada.

- * Adaptación de las unidades de mando: se obtiene un resultado análogo al conseguido con la selección de los semiconductores.

- * Mando regulado: la simultaneidad de los procesos de desconexión puede conseguirse también con un mando regulado. En este método se emiten una a una las órdenes de desconexión de cada GTO, de modo que la entrada en tensión de todos los GTO se produce en menos de 500 ns.

Los cuidadosos ensayos de laboratorio han demostrado que este procedimiento funciona con los GTO no agrupados según sus características, e incluso con los GTO de otros proveedores. El método, sin embargo exige una compleja unidad electrónica para cada tiristor, así como una puesta especial en servicio del convert

El mando duro de los tiristores GTO desarrollado por ABB, es mucho más sencillo; porque, es el método mejor adaptado a los procesos de conmutación de los GTO. Mando duro quiere decir que la corriente de compuerta I_g (ver fig. 2.7), tiene una pendiente mucho mayor (3000 A/us) y más amplitud (30A/us) que con los mandos convencionales.

Un vistazo al interior de un tiristor GTO muestra las ventajas del mando duro: un elemento semiconductor está formado por varios miles de GTO conectados en paralelo sobre la superficie de un disco de silicio. Con un mando convencional, en el momento de la desconexión la corriente se concentra en unos pocos de los tiristores que aún están en estado conductor. El resultado es que se aprovecha mal la superficie del disco de silicio y que existe el riesgo del sobrecalentamiento local (hot spot).

Las investigaciones han demostrado que con un mando duro la desconexión se produce prácticamente de modo simultáneo en toda la superficie del disco, y que si se emplean elementos idénticos es posible desconectar corrientes muchos mayores. La superficie del disco de silicio se aprovecha mucho mejor.

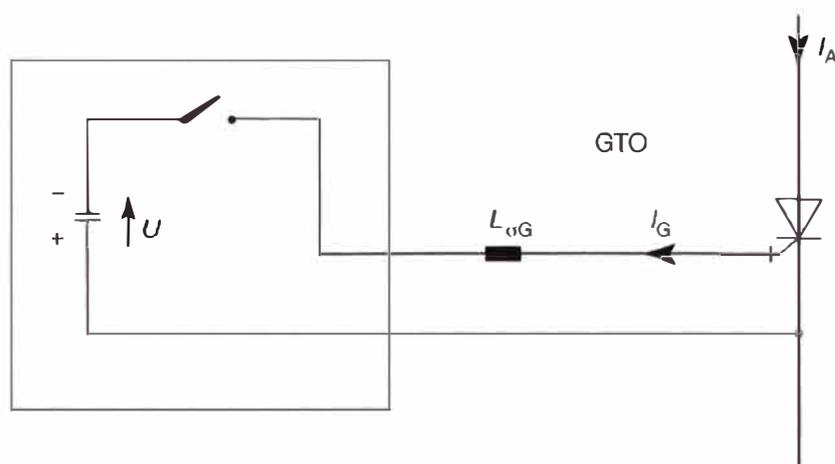


Fig. 2.7 Circuito equivalente para el mando de un tiristor GTO

GU: Unidad de mando (Gate Unit)

I_A : Corriente de fase del tiristor GTO

U : Tensión de alimentación del mando

I_G : Corriente de compuerta

$L_{\sigma G}$: Inductancia de dispersión del circuito de compuerta.

2.5 Módulo de fase de baja inductancia

Desde el punto de vista constructivo, el módulo de fase constituye el elemento fundamental del convertidor. Actúa como interruptor que alimenta la carga alternativamente en positiva y negativa.

En el momento de la conmutación, la energía acumulada en la inductancia de huida es

$W = \frac{1}{2} L_{\sigma G} I_A^2$, debe ser absorbida por el circuito de protección contra sobretensiones. Para mantener baja las pérdidas resultantes también se construye módulo de fase con la inductancia más baja posible, por ejemplo con una disposición en U de poca superficie, esto se puede apreciar en la gran columna de la Fig. 2.8.

En la construcción considerada el módulo de fase contiene dos ramas. Cada una de ellas está representada por dos pilas horizontales de semiconductores, por la unidad de mando y por el circuito de protección. Esta disposición permite sustituir los semiconductores con gran facilidad. Una de las pilas contiene los GTO, la otra los diodos antiparalelos y los diodos de rueda libre. El circuito de protección y las inductancias de limitación de corrientes, se encuentran debajo de las pilas, mientras que las unidades de control (Gate Unite) están dispuestas encima.

En la fase de diseño constructivo se concedió gran importancia a la modularidad. Esto está formada por dos GTO, por diodos antiparalelos, y por el circuito de protección.

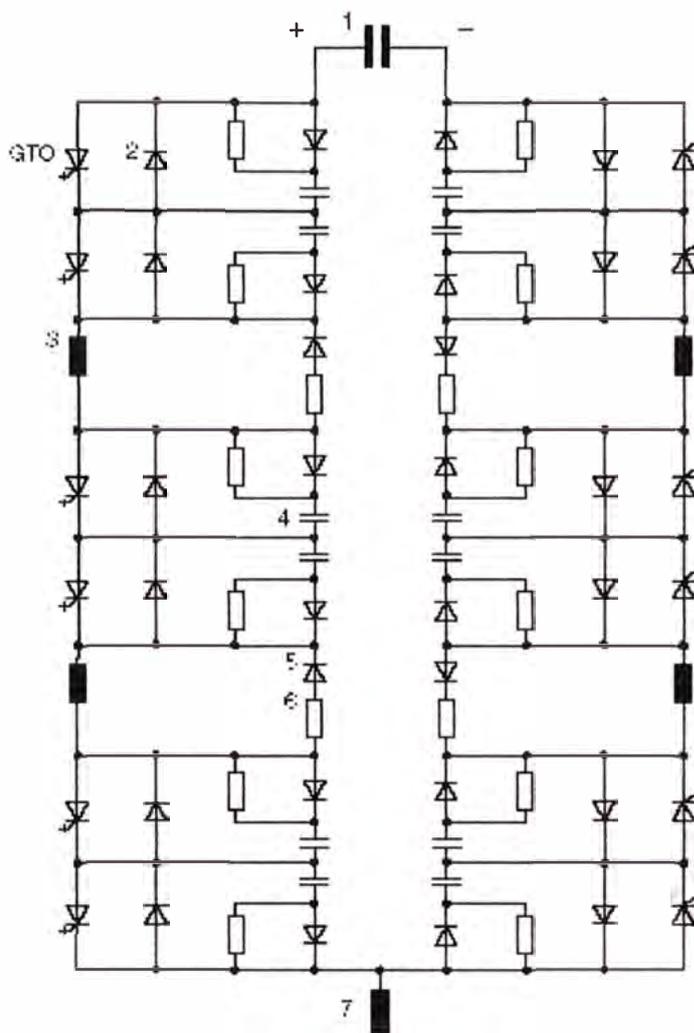


Figura 2.8 Esquema de conexión del módulo de fase

1. Bateria de condensadores del circuito intermedio
2. Diodo antiparalelo
3. Bobina de limitación de corriente
4. Circuito de protección
5. Diodo de rueda libre
6. Resistencia de rueda libre
7. Devanado del transformador

CAPITULO III

CRITERIOS DE DISEÑO DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FRECUENCIA DE 100 MW Y SU PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Por motivos históricos, las redes eléctricas del ferrocarril se explotan en muchos países con corriente continua o bien con frecuencia distinta a la red eléctrica nacional.

Por su parte las compañías de ferrocarril, poseen sus propias centrales eléctricas, pero debido a las oscilaciones del consumo eléctrico a lo largo del tiempo, generalmente están conectadas a la red eléctrica nacional.

En Alemania hay unos 40 acoplamientos, esto es, enlaces entre la red eléctrica ferroviaria y la alimentación pública de energía eléctrica. A través de dichos acoplamientos, los ferrocarriles cubren una cuarta parte de su demanda energética. Los acoplamientos sirven especialmente para estabilizar la red eléctrica ferroviaria. Dado que la mayoría de los acoplamientos de red permiten el intercambio energético en ambas direcciones, esto es desde la red nacional hasta la red ferroviaria y viceversa, la generación de corriente de la red ferroviaria puede resultar más económica [1].

3.1 De las máquinas rotativas a los convertidores estáticos

En el pasado, las estaciones de conversión entre las redes eléctricas ferroviarias y la red eléctrica nacional estaban equipadas con máquinas rotatorias. A medida que la electrónica de potencia ha demostrado su eficacia, y especialmente desde la introducción exitosa de los tiristores desconectables (GTO), se recurre preferentemente a los equipos de conversión estáticos, los cuales ofrecen las siguientes ventajas:

- * Curva de rendimiento mejorada en aproximadamente el 5% en toda la gama de potencias.
- * Menores costes de inversión, pues se suprimen los costosos cimientos para los equipos rotatorios.

* Menos trabajo de mantenimiento y tiempos de parada más corto, lo que supone un a disponibilidad mayor.

* Servicio más sencillo, gracias al diseño modular, con componentes fáciles de manejar.

Los acoplamientos de frecuencias estáticos para redes ferroviarias utilizados hasta ahora consisten en unidades convertidoras de un máximo de 15 MVA para la compañía de ferrocarriles Schweizer Bundesbahnen (SBB) en Giubasco, explotado comercialmente desde 1994.

3.2 Bremen: Elevada potencia con un solo convertidor

En 1991, la empresa eléctrica municipal Starwerke Bremen AG había encargado a ABB Kraftwerke AG y ABB industrial AG realizar un estudio de factibilidad para un convertidor de alta potencia, de 16 2/3 Hz y 50 Hz con conmutación en serie GTO y una potencia de conversión de hasta 100 MW en ambas direcciones. El estudio mostró que un perfeccionamiento específico de los GTO, una actuación dura novedosa y la conmutación en serie de los tiristores, permiten construir un acoplamiento económico y completamente estático de frecuencias 16 2/3 – 50 Hz de elevada potencia [1].

En la tabla 1 se muestra los datos principales del acoplamiento de frecuencia Bremen. El equipo consiste de un solo convertidor de 100 MW/MVA. El gran aumento de potencia logrado con ello ha sido gracias a los avances tecnológicos GTO, y que garantizan una fiabilidad máxima. En comparación con los convertidores integrados por varias instalaciones parciales, la elevada potencia concentrada en un solo convertidor ofrece un rendimiento mayor. El número menor de componentes significa a la vez una disponibilidad elevada y menor costo de inversión y explotación. Otra característica esencial del equipo Bremen es que la redundancia necesaria viene garantizada en el propio convertidor.

Tabla 3.1 Datos principales del acoplamiento de frecuencias Bremen

Potencia nominal permanente	
Transporte de energía en ambas direcciones, medido en el lado ferroviario	100 MVA, $\cos \theta = 0,8$ 100 MVA, $\cos \theta = 1,0$
Red trifásica	
Tensión de servicio	112Kv $\pm 5\%$
Frecuencia de servicio	50Hz $\pm 0,5 \%$
Repercusión en la red de corriente trifásica	
Armónicos de tensión	según VDEW
Red ferroviaria	
Tensión nominal de servicio (S =100MVA)	121 KV
Gama de la tensión de servicio	97...123 KV
Gama de la frecuencia de servicio	$16^{2/3}$ Hz $\pm 2\%$
Repercusiones en la red ferroviaria	
Armónicos de tensión	
Distorsión total P_n	DU 150 $\leq 0,5 \%$
Rendimiento garantizado	
Potencia en la barra colectora de 16,7 Hz	
Dirección de la potencia $16^{2/3}$ Hz \rightarrow 50Hz	
72 MW, $\cos \theta = 0,8$	94,9%
90MW, $\cos \theta = 1,0$	95,6%

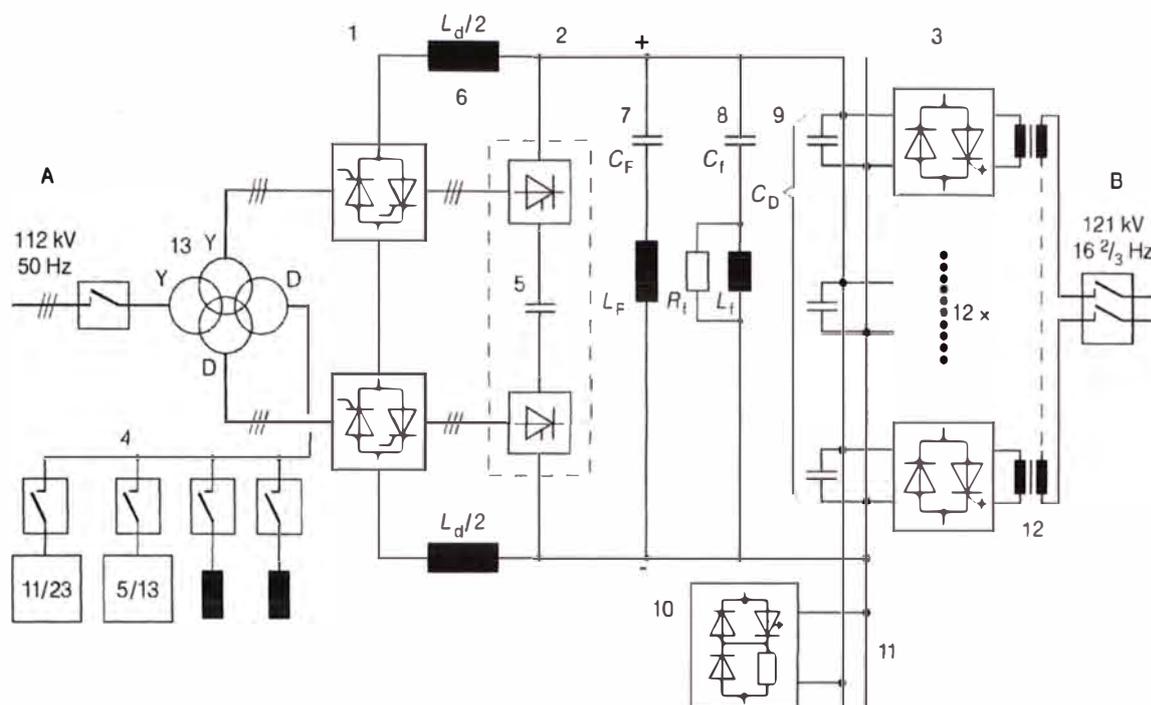


Fig. 3.1 Esquema de conexiones del acoplamiento de frecuencias totalmente estático Bremen de 100 MW

A Red de corriente trifásica

B Red de corriente ferroviaria

1. Convertidor de tiristores

2. Circuito intermedio de tensión continua

3. Convertidor GTO (12 veces)

4. Equipo filtrador y compensador (11/23, 5/13; filtros)

5. Circuito totalizador de desconexión (SLK)

6. Inductancia de alisado

7. Filtro de 33Hz

8. Filtro de paso alto

9. Condensadores de circuito intermedio cercanos al convertidor

10. Limitador d tensión

11. Barras colectoras del circuito intermedio

12. Transformador sumador, red de corriente ferroviaria

13. Transformador de convertidor, red trifásica

3.3 Conmutación y disposición del acoplamiento de frecuencias

El circuito de corriente principal del acoplamiento Bremen consiste en primer lugar en el convertidor de tiristores en el lado de la corriente trifásica, el circuito intermedio de corriente continua y el convertidor GTO en el lado de la Red de tracción, así como los transformadores de convertidor. Se señalan asimismo los dispositivos filtradores y de compensación para la red de corriente trifásica y en el circuito intermedio, así como los aparatos protectores más importantes contra sobretensiones en el circuito intermedio y para la protección del equipo durante la inversión del convertidor (SLK). En la red de Stadtwerke Bremen AG, la tensión y la frecuencia son prácticamente constantes. Por el contrario, en la red de tracción puede haber oscilaciones pronunciadas de la tensión (97 – 123kV) y de la frecuencia (16,3 – 17Hz) durante el servicio normal. La tensión y las corrientes nominales del circuito Intermedio ascienden a 10kV y 10,5 kA.

El equipo fue instalado directamente de la instalación de distribución de 110 kV de Stadtwerke Bremen AG, en posición adyacente a la instalación de distribución de 110kV de la Deutsche Ban AG. Un edificio de dos pisos alberga los convertidores, el mando, la regulación y la vigilancia. Asimismo debido al clima marítimo y a la polución causada por la acería, todos los bancos de condensadores se encuentran alojados en el edificio. Únicamente los transformadores, las bobinas de compensación, las inductancias de alisado y las bobinas de circuito filtrante se encuentran instalados delante el edificio ver figura 2.

El edificio tiene una planta de 54 x 15 m. La distribución de los locales en la planta superior es básicamente la misma que en la planta baja, dado que los componentes principales (ambos convertidores, loa condensadores de circuitos intermedio y los circuitos totalizadores de desconexión) se encuentran repartidos en ambos pisos, dispuestos de forma idéntica. Esta disposición fue elegida para obtener los recorridos más cortos posibles de las barras de conexión.

Se atribuyó gran importancia a una disposición clara de la instalación y a la fácil accesibilidad de sus componentes. Con ello, la instalación aprovecha plenamente las ventajas inherentes al diseño modular de los convertidores estáticos: mantenimiento fácil, bajos gastos de entretenimiento, cortos periodos de recambios y de reparación en caso de averías, así como una disponibilidad excelente. El local para el convertidor en le lado ferroviario ha sido dimensionado para garantizar una buena accesibilidad a todos los

componentes. En cada uno de los pisos se encuentra la mitad de los módulos de convertidor y de limitadores de tensión.

Los armarios de control – mando se encuentran alojados en el piso superior, rodeados por los componentes de potencia, por lo que los recorridos de cables son cortos. Asimismo, en el piso superior se halla un puesto para la interfaz hombre – máquina, para los posibles casos de manejo local.

Los transformadores así como las bobinas de compensación, filtración y alisado se encuentran fuera del edificio, en la proximidad inmediata de los correspondientes elementos de potencia.

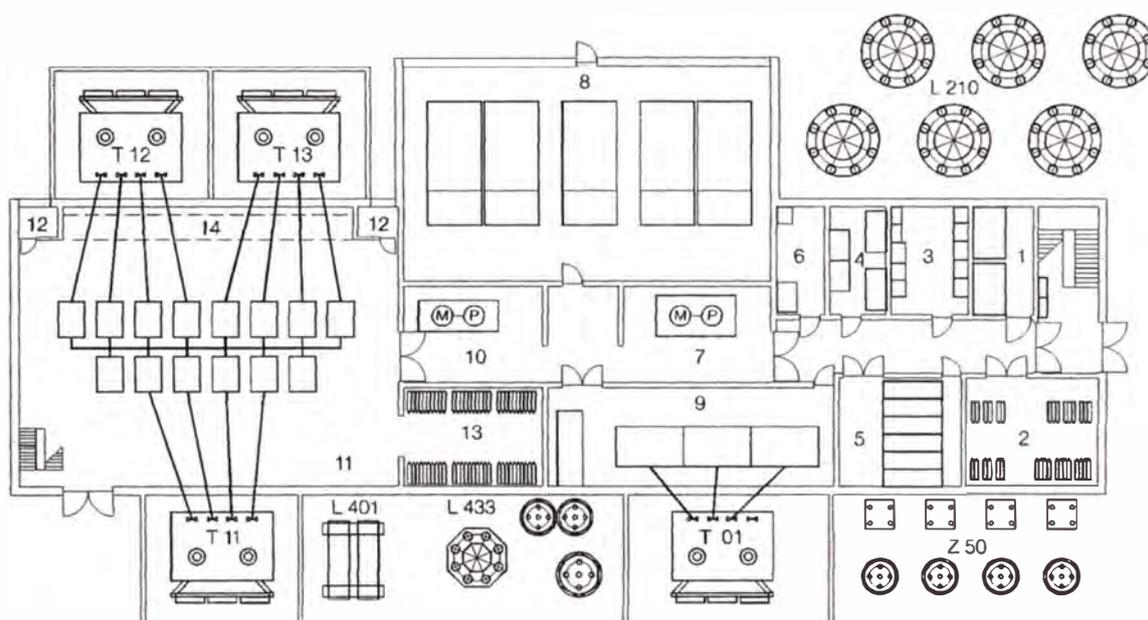


Fig. 3.2 Proyección horizontal del acoplamiento de frecuencias con planta baja del edificio de convertidores

- 1 Sala de transformadores auxiliares
- 2 Sala de filtros de 50 Hz
- 3 Distribución de fuentes de corriente a prueba de interrupción (USV) y de corriente alterna AC.
- 4 Sala de baterías
- 5 Instalación de distribución de 20 kV
- 6 Distribución de corriente continua (DC)

7 Refrigerador de retorno de 50 Hz	T11–T13 Transformadores de 16 2/3 Hz.
8 Intercambiador de calor agua/aire	T01 Transformador de 50 Hz
9 Sala del convertidor de 50 Hz y del SLK	L210 Compensación de potencia reactiva de 50 Hz
10 Refrigerador de retorno de 16 2/3 Hz	
11 Sala de convertidor de corriente de (16 2/3 Hz)	L401 Inductancia de alisado
12 Ventilación	L433 Inductancia del filtro de 33 Hz
13 Condensadores del filtro de 33 Hz	
14 Tubos de ventilación	

3.4 Principio de funcionamiento y diseño del lado del ferrocarril

La tensión continua del circuito intermedio es mantenida a un nivel constante por el convertidor del lado de corriente trifásica. El convertidor GTO genera una tensión interna regulable libremente, cuya frecuencia es determinada por el servicio combinado. Los valores de referencia para las magnitudes de ajuste son la tensión y la posición de fase en el punto de conexión de la red de tracción.

En el diagrama vectorial (Fig. 3.4) se muestra el funcionamiento básico del convertidor GTO. La reactancia de cortocircuito X_T del transformador monofásico de convertidor, Y que desempeña un papel importante al respecto.

La tensión interna del convertidor U_{hi} puede ajustarse fácilmente dentro de determinados límites (en gris). Con ello se fija la tensión dU_T y por lo tanto la amplitud y fase de la intensidad I_B . La disponibilidad de potencia reactiva en apoyo de la tensión está limitada por el valor máximo ajustable de la tensión interna. Este resulta de la tensión continua del circuito intermedio y del procedimiento de regulación del convertidor GTO, que se describe a continuación. A este respecto debe tenerse en cuenta que, debido a las restricciones del tiempo de conmutación, no puede aprovecharse la plena tensión de mando U_{ST} (el factor máximo de modulación es de 0.96).

La potencia aparente S_B está limitada por la corriente máxima I_B que puede franquear el convertidor GTO y su respectivo transformador (circuito pequeño en Fig. 3.4). Mientras que en el transformador, este límite sólo está condicionado térmicamente, en el convertidor GTO ha de tenerse en cuenta también la capacidad de desconexión de los semiconductores. Existe además un límite para la potencia activa (límite vertical de la zona gris), dado por el diseño de la alimentación del lado de corriente trifásica (convertidor de tiristores, etc.).

El diagrama PQ del lado del ferrocarril (Ver Fig. 3.5), corresponde a los lados de rendimiento determinados (Tabla 2). El circuito $U_B = 121$ kV, que contiene los tres puntos

de trabajo especificados, A, B, y C, corresponde a la corriente máxima admisible del convertidor GTO. El circuito determina también la potencia máxima en caso de baja tensión en la red ferroviaria. En la zona sobreexcitada se determina, en el punto B, el límite de la potencia impuesta por la tensión máxima.

Dado que existe un convertidor de tiristores antiparalelo de la misma potencia, los puntos de trabajo simétricos A'', B'', C'', son válidos desde la red eléctrica de tracción a la red de corriente trifásica.

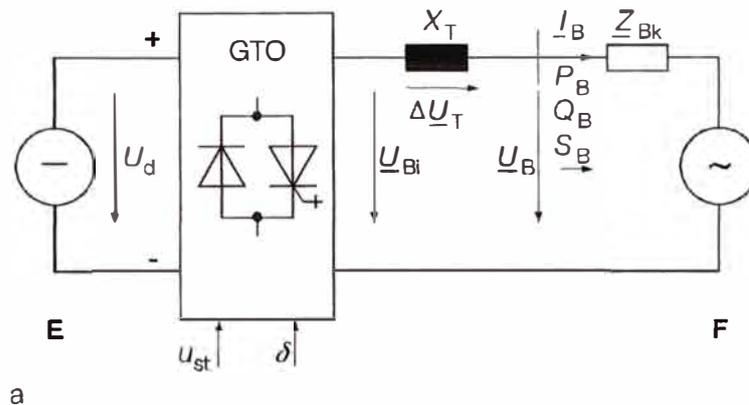


Figura 3.3. Principio funcional del convertidor GTO

A	Esquema equivalente
E	Circuito intermedio de tensión continua
F	Red ferroviaria
U_d	Tensión continua
U_{Bt}	Tensión interna del convertidor
X_T	Reactancia de cortocircuito de transformador ferroviario
ΔU_T	Caída de tensión en X_T
U_B	Tensión de red ferroviaria en el punto de conexión
Z_{BK}	Impedancia de cortocircuito de la red ferroviaria
P_B, Q_B, S_B	Potencias alimentadas en la red ferroviaria.
I_B	Corriente de salida del convertidor GTO
$U_{st} \delta$	Magnitudes de ajuste de la regulación

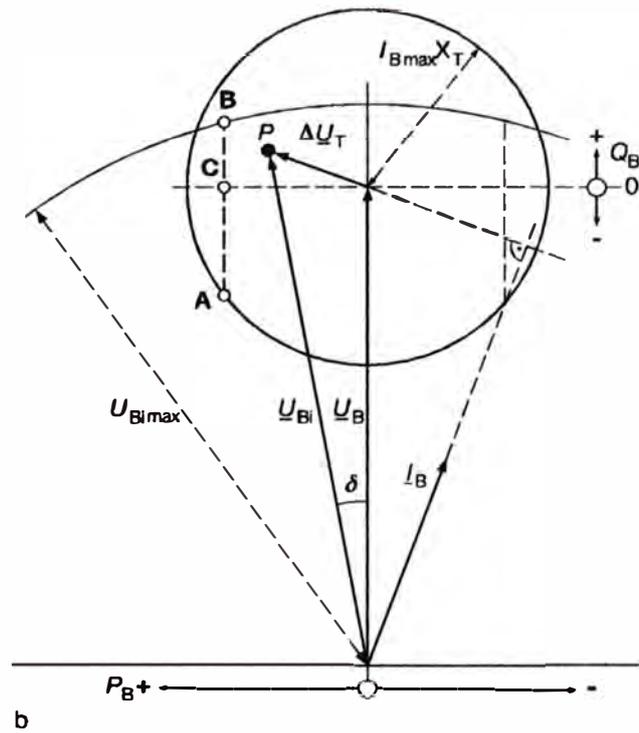


Fig. 3.4 Diagrama vectorial simplificado del convertidor GTO
A, B; C Puntos de trabajo especificados

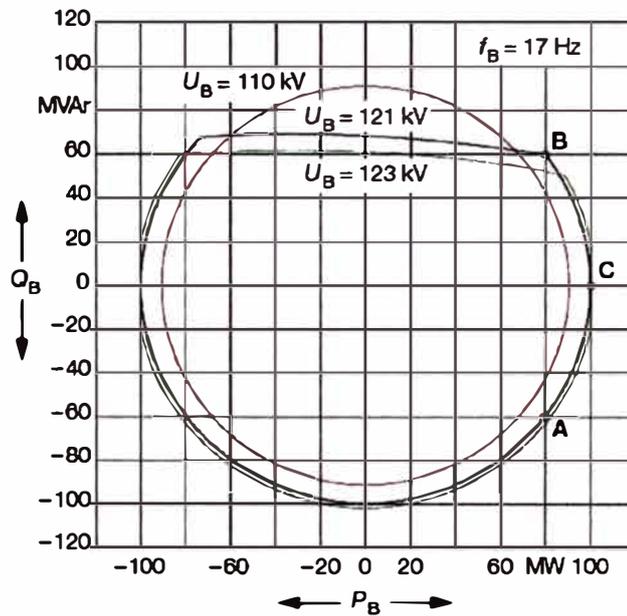


Fig. 3.5 Diagrama PQ del lado ferroviario

- P_B Potencia activa, positiva para flujo energético 50Hz \Rightarrow 16 2/3 Hz.
 Q_B Potencia reactiva, positiva en caso de sobreexcitación
 U_B Tensión de la red ferroviaria en el punto de conexión
 f_B Frecuencia de la tensión de la red ferroviaria
 A,B,C Puntos de trabajo especificados

Tabla 2: Datos de potencia en el punto de conexión de la red ferroviaria

	A (subexcitado)	Punto de trabajo B (sobrecitado)	C
Tensión ferroviaria U_B	121 kV	121kV	121kV
Frecuencia ferroviaria f_B	16,2...17Hz	16,2...17Hz	16,2...17Hz
Potencia activa P_B	80MW	80MW	100MW
Potencia reactiva Q_B	-60 MVAr	+60 MVAr	0 MVAr
Potencia aparente S_B	100 MVAr	100 MVAr	100 MVAr
Cos φ	0,8	0,8	1

3.5 Procedimiento de mando y tensión de salida

Para el mando se ha elegido un procedimiento de modulación de duración de impulsos (MDI) de eficacia probada, conocido en la tecnología de accionamientos. Las órdenes de conmutación para los diferentes módulos U se obtienen mediante comparación de los valores momentáneos de la tensión de mando sinusoidal u_{st} y de las tensiones portadoras triangulares (tensiones auxiliares de mando u_{hm} y u_{hp}). La frecuencia portadora corresponde a tres veces la frecuencia de red eléctrica ferroviaria. Por consiguiente, cada GTO realiza tres ciclos de conmutación por periodo de la red eléctrica ferroviaria.

Los doce puentes GTO son activados mediante este procedimiento MDI, de modulación de duración de impulsos, si bien las señales portadoras están desfasadas eléctricamente en 15° ($180/12^\circ$ referido al periodo de la tensión portadora). Con ello resultan doce tensiones escalonadas desfasadas entre si. La adición de dichas tensiones escalonadas, hecha por la conmutación en serie en el transformador de la red de corriente ferroviaria, suministra una tensión de salida aproximadamente sinusoidal con contenido muy bajo de armónicos. Por ello no se requieren filtros adicionales.

El mando de la tensión de salida tiene lugar mediante regulación de la amplitud de la tensión de mando u_{st} y de su posición de fase δ , respecto de la tensión de red ferroviaria U_B en el punto de conexión del acoplamiento de frecuencias.

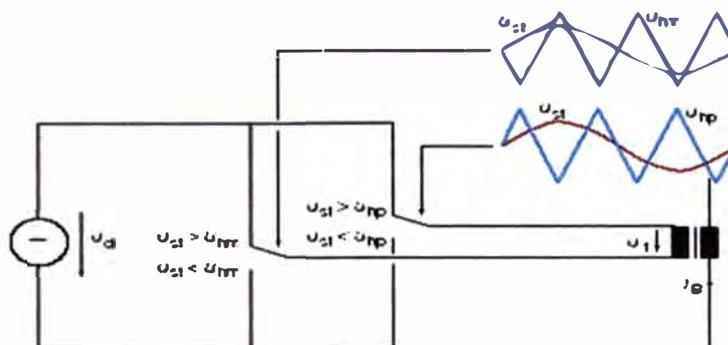


Fig. 3.6 Principio del procedimiento de mando MDI (modulación de duración de impulsos)

U_d	Tensión continua
U_{st}	Tensión de mando
U_{hm}, U_{hp}	Tensiones auxiliares de mando
U_1	Tensión de salida de un escalón
i_B	Corriente de salida del convertidor GTO

3.6 Convertidor del lado ferroviario

La tecnología GTO del convertidor del lado ferroviario contiene los decisivos avances que han permitido la realización de la elevada potencia del acoplamiento de frecuencias Bremen.

El convertidor comprende, según la Fig. 3.1:

- Doce puentes H, cada uno con dos módulos de fase (módulos U), conectados en paralelo al circuito intermedio,
- Cuatro limitadores de tensión en el circuito intermedio,
- Un circuito intermedio acoplado directamente, constituido por una barra colectora de baja inductancia y por condensadores de circuito intermedio,
- La electrónica cercana al convertidor.

3.6.1 Módulo de fase de baja inductividad.-

En cada módulo de fase se encuentran conectados en serie seis GTO. El módulo de fase con barra al circuito intermedio y los condensadores conectados directamente han sido diseñados con muy baja inductividad a fin de reducir al mínimo la energía acumulada en la inductancia de huida, y con ello las solicitaciones de tensión que surgen durante la conmutación

El módulo de fase de baja inductividad está conformado por:

1. Unidad de mando
2. Pila de semiconductores, y
3. Modo de conexión..

Los condensadores de circuito intermedio cercanos al convertidor se utilizan equipos de alta tensión de inductividad muy baja (200 nH por unidad de 10kV). Las bobinas de condensadores han sido concebidas en tecnología seca autorregeneradora.

En caso de un defecto interno de aislamiento, la capa metálica se evapora localmente sin que se produzca un cortocircuito.

La refrigeración de los semiconductores de potencia, de las resistencias de conmutación y de las bobinas de limitación de corriente se realiza con agua pura desionizada. En el convertidor no se requiere ventilación forzada mediante ventiladores, lo que a su vez aumenta la fiabilidad operacional

3.6.2 Conexión en serie y redundancia

La conexión en serie de los GTO exige que las operaciones de conmutación estén muy bien sincronizadas. Se requiere que todos los GTO conectados en serie conmuten en un intervalo de 200 ns. Con este fin, ABB ha desarrollado el llamado mando duro, caracterizado por una corriente de compuerta con pendiente y amplitud mucho mayores que las de los mandos convencionales [4]. Para ello debe reducirse la inductividad de la unidad de mando en un factor aproximado de 1000, lo que ha exigido un diseño completamente nuevo. El GTO y la unidad de activación forman una unidad constructiva compacta.

La tensión continua nominal del circuito intermedio es de 10 kV. Por ello serían suficiente cuatro GTO conectados en serie en cada rama del puente. En caso de seis GTO conectados en serie puede fallar un semiconductor sin que ello perjudique el equipo. En caso de fallo de un segundo GTO en la misma rama, el equipo se desconecta de manera controlada. La incorporación de puestos de semiconductores redundantes permite reducir la carga de

tensión de todos los componentes, prolongando con ello considerablemente la vida útil del equipo.

Los cálculos basados en los datos de campo muestran que, gracias a la conexión en serie y a la redundancia incorporada, el convertidor GTO tendrá un fallo total sólo cada siete años. Esto requiere realizar mantenimientos anuales, en que se sustituyen los componentes redundantes defectuosos registrados durante el servicio. Si estos se recambian a intervalos más cortos aumentará la disponibilidad.

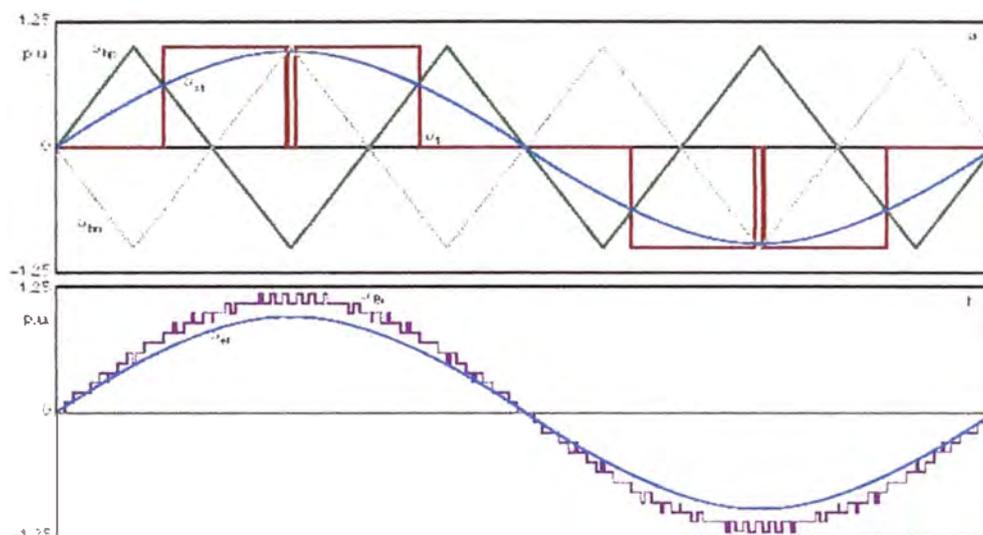


Fig. 3.7 Formación de tensión del convertidor GTO

La tensión del convertidor GTO está formado por:

- Desarrollo de la tensión u_1 de un escalón
- Tensión interior resultante de convertidor, u_{Bi} , a la salida del transformador sumador para una tensión de mando de $u_{st} = 0,9$
 U_{tm} , U_{hp} Tensiones auxiliares de mando.

3.6.3 Barras del circuito intermedio

La necesidad de la ejecución de baja inductividad rige también para la parte del circuito intermedio cercana al convertidor. Los dos conductores del circuito intermedio están formados, por tanto, por dos barras planas adyacentes separadas sólo por una capa aislante de MICADUR. Si se producen cortocircuitos internos, pueden aparecer elevadas sollicitaciones mecánicas. La construcción ha sido concebida de tal manera que permite

controlar todos los fallos imaginables. La solicitud fue calculada y simulada, pero además fue comprobada en el laboratorio de alta tensión.

3.6.4 Limitador de tensión

La tensión continua es mantenida en un valor constante mediante circuitos reguladores rápidos del convertidor de tiristores para la alimentación. A pesar de ello, los fallos en las redes intervinientes pueden provocar sobretensiones transitorias. Por esta razón, y para proteger al convertidor GTO, se ha incorporado un limitador de tensión que, al alcanzar la tensión límite admisible en el circuito intermedio, activa rápidamente una resistencia de potencia. Este limitador de tensión consiste en cuatro interruptores GTO paralelos con resistencias de potencia. Se trata aquí de cuatro ramas ligeramente modificadas del módulo de fase del convertidor GTO, completados por la resistencia y los diodos de marcha libre.

3.6.5 Protección

El concepto de protección abarca tres niveles: prevención, encendido de protección y limitación de daños en caso de emergencia.

Lo fundamental es percibir todas las posibilidades de evitar perturbaciones. Para ello se ha recurrido a GTO redundantes, así como a la desconexión controlada en caso de un fallo del segundo GTO de una rama.

Además, el bloqueo de las dos ramas de una fase GTO impide que estas puedan estar al mismo tiempo en situación de paso.

En caso de fallo de las medidas preventivas, toda interrupción eléctrica será registrada por un dispositivo medidor rápido y redundante en unos pocos microsegundos.

Para aliviar la fase GTO defectuosa se encienden las demás fases GTO del convertidor (encendido de protección). El convertidor ha sido concebido de tal manera que no surgirá daño alguno. Gracias a las medidas preventivas, sólo en casos muy aislados se produce el encendido de protección.

Por lo demás, el convertidor GTO ha sido concebido de tal manera que también resiste a un fallo de la protección. Si la corriente entera de fallo fluye a través de un punto defectuoso central, pueden quedar destruidos todos los semiconductores de la fase defectuosa (GTO y diodos), pero no se producirán daños secundarios mecánicos o térmicos. No se forma plasma alguno, ni tampoco habrá explosión de componentes aislados.

3.6.6 Verificación

Dado que el convertidor GTO Bremen constituye la primera realización de una tecnología en gran parte nueva, la verificación de todos los elementos y grupos constructivos reviste gran importancia. La protección tiene lugar en forma recíproca y complementaria, en dos niveles: mediante simulación en modelos altamente desarrollados y por comprobación en laboratorio de los componentes del equipo. Para la simulación se dispuso de un nuevo programa de simulación con modelos optimizados de los semiconductores de potencia.

Los parámetros necesarios fueron tomados de mediciones especiales del hardware. Esto permitió asegurar, entre otras cosas, las interrupciones eléctricas y los encendidos protección, teniendo en cuenta tanto los componentes como las redes. Asimismo pudo aclararse la influencia de las tolerancias dimensionales, realizándose investigaciones «worst case».

Se han realizado los siguientes ensayos, prescritos por las normas:

- Investigación de los fenómenos en la gama de alta frecuencia durante los fallos transitorios de la red de corriente ferroviaria,
- Ensayos con choques de corriente: no debe producirse daño mecánico alguno de los componentes, incluso aunque fallen todos los niveles de protección.
- Otros ensayos con choques de corriente, para comprobar que las características de los elementos semiconductores no se modifican ni siquiera después de 100 impulsos de encendido de protección.
- Ensayos de larga duración, de más de 100 h, con 150% de la corriente nominal, 120% de la tensión nominal, 150% de la frecuencia nominal y supresión de la redundancia.

3.7 Transformadores del lado ferroviario

El transformador sumador del lado ferroviario está integrado por seis unidades bifásicas con núcleo de retorno. Este desacopla magnéticamente las dos fases de modo que los núcleos actúan como transformadores individuales.

Las bobinas secundarias de las dos fases son alimentadas por puentes GTO próximos en cuanto a modulación. Si bien sus componentes fundamentales están en fase, el patrón de impulsos, desfasado, hace que los armónicos sean de fase desplazada, resultando durante el servicio estacionario un flujo magnético en el núcleo de reflujo con un valor aproximado del 10% del flujo principal de los núcleos bobinados. A pesar de ello, el núcleo de reflujo tiene las mismas dimensiones transversales que los núcleos principales, con el fin de

permitir transitoriamente, por ejemplo en caso de fallos de la red, una cadencia lo más independiente posible de los dos puentes GTO, sin que se produzcan fenómenos de saturación en el transformador.

En consecuencia, para la unidad bifásica se utilizó un núcleo convencional de transformador de corriente trifásica, de chapa de transformador de grano orientado, en el que sólo los núcleos exteriores llevan bobinados.

A cada núcleo se asignó un bobinado primario (del lado ferroviario) y un núcleo secundario, ambos concéntricos. Todos los bobinados primarios fueron aislados para la tensión total de ensayo. Cada par de unidades bifásicas se encuentran en un recipiente común.

Se dedicó atención especial a conseguir una dispersión lo más pequeña posible de las impedancias de marcha en vacío de los diferentes sistemas de fases, ya que, si las válvulas GTO están bloqueadas, estas impedancias determinan el reparto de la tensión de la red ferroviaria a los transformadores y con ello a los puentes GTO. Un reparto muy desigual podría provocar que en los puentes con la mayor parte de la tensión la amplitud de la tensión alterna fuera mayor que la tensión del circuito intermedio, de modo que este resultaría sobrecargado a través de los diodos de los puentes H.

Es bien conocido el problema de la componente de tensión continua en la tensión de salida de los puentes GTO, provocada por instantes de conmutación no ideales. Ya una proporción relativamente baja de esta componente de tensión continua puede provocar fenómenos de saturación en el transformador y cargar los puentes con corriente de magnetización, llegando incluso a impedir su funcionamiento.

Este problema es más grave a medida que aumenta el tamaño del equipo y, además, se agrava con la conexión en serie de los GTO. En la instalación Bremen, un error constante de sólo $1 \mu\text{s}$ por fase produciría una parte de tensión continua de 33 mV, la cual premagnetizaría desequilibradamente el transformador con una inducción de 1,4 T aproximadamente. Efectivamente, la inducción de servicio con tensión de salida máxima es de 1,55 T. Para limitar una posible componente de tensión continua se ha desarrollado un nuevo sistema de registro y regulación que compensa tal componente a tiempo, reduciéndolo a valores bajos y admisibles.

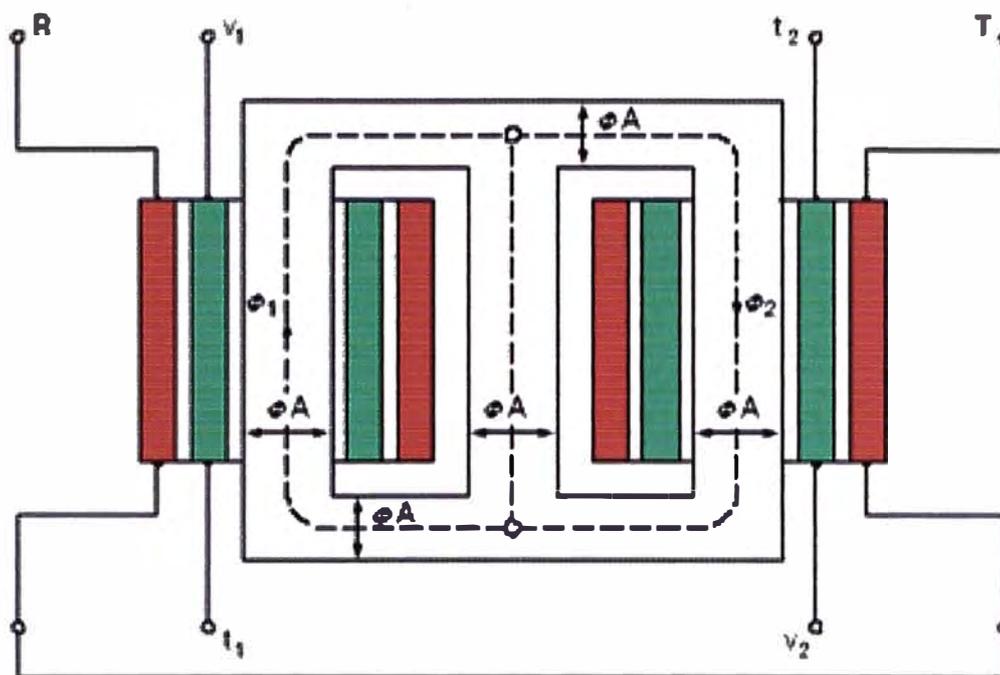


Fig. 3.8 Esquema de una unidad de transformador sumador

R, T Fases F: Flujo de inducción

3.8 Diseño del circuito intermedio

El circuito intermedio de corriente continua debe desacoplar la red de corriente trifásica y la red eléctrica ferroviaria. Ha de alimentar el convertidor GTO con una tensión continua tan constante como sea posible, protegiendo asimismo la red de corriente trifásica de armónicos de la red eléctrica ferroviaria.

A este respecto debe tenerse en cuenta que, por motivos de protección, la capacidad CD repartida y acoplada rígidamente en el convertidor GTO ha de reducirse a un mínimo.

Como consecuencia del carácter monofásico de la red eléctrica ferroviaria se produce una oscilación de potencia con frecuencia doble que la de la red de tracción. Por ello, el circuito intermedio cuenta con un filtro ajustado de 33 Hz. Su potencia resulta de la ondulación admisible de la tensión continua, en caso de una desviación máxima de frecuencia de la red eléctrica ferroviaria, y de un ajuste fino poco favorable del filtro.

Debe ser posible utilizar el convertidor de corriente ferroviaria también en caso de una tensión ferroviaria con distorsión previa relativamente pronunciada. Especialmente el tercer y el quinto armónicos pueden tener valores elevados. Por lo tanto, el convertidor

debe reaccionar a estos armónicos con tan poca sensibilidad como sea posible. Por esta razón, el circuito intermedio contiene, además de un filtro de 33 Hz, un filtro amortiguado de paso alto.

3.9 Convertidor del lado de corriente trifásica

La alimentación a partir de la red de la compañía municipal de Bremen tiene lugar a través de un convertidor de tiristores de 12 impulsos, conmutado por la red. Es una solución más económica que usar un convertidor de corriente de conmutación automática.

Debido al denso cableado de la red, existe un exceso de potencia reactiva. En caso de carga reducida, esta debe ser compensada por reactancias. Las bobinas de inductancia también pueden permanecer conectadas cuando el acoplamiento de frecuencias no se encuentra en servicio. La gama exigida de potencia reactiva se consigue económicamente mediante reactancias y filtros de conmutación mecánica. Además, los filtros han sido diseñados de tal manera que pueden cumplirse los límites prescritos para la distorsión de la tensión ($<1,5\%$).

Los datos nominales del circuito intermedio tienen consecuencias para el diseño del convertidor de tiristores: de un lado un acoplamiento en serie de cuatro tiristores y del otro acoplamiento en paralelo de tres ramas. Análogamente al convertidor GTO, la instalación puede seguir funcionando sin restricción alguna en caso de fallo de un tiristor por rama. En caso de fallo de un segundo tiristor en la misma rama, se desconectará la instalación entera. Esto tampoco supone peligro alguno para la parte intacta de la rama. Se vigila el reparto correcto de la corriente entre las ramas paralelas. Si una sola rama deja de intervenir en el guiado de la corriente (por ejemplo a causa de un fallo en la excitación), la corriente del circuito intermedio quedará limitada correspondientemente.

Si la red eléctrica ferroviaria tiene energía en exceso, el excedente se alimentará a la red de Stadtwerke Bremen a través de un segundo convertidor antiparalelo de tiristores que actúa como ondulator. El mando del convertidor permite invertir rápidamente la potencia.

Se concedió una especial atención a la protección del convertidor en funcionamiento de ondulator. Para ello se empleó el llamado circuito totalizador de desconexión (SLK), un equipo estático para la conmutación forzada (Ver Fig. 3.1)

Contrariamente a lo usual en los equipos convencionales de transmisión de corriente continua de alta tensión, con convertidores de corriente regulada a ambos lados de la red, no es posible controlar la corriente en diente de sierra en el circuito intermedio. Incluso si se ha diseñado prudentemente el mando del ondulator (ángulo de extinción) jamás pueden

excluirse totalmente los errores de conmutación, por ejemplo en caso de procesos transitorios en la red de corriente trifásica.

El desenganche del ondulator es registrado por dos circuitos de medición independientes e inmediatamente después se bloquean ambos convertidores. La válvula del ondulator de conducción errónea recibe una contracorriente negativa que la borra. Todo el proceso de extinción ocupa un periodo de red. Después de un intervalo de tiempo corto, de 1 s aproximadamente, requerido para restablecer la capacidad desbloquear, se reanuda automáticamente la transmisión de corriente. La disponibilidad de servicio del circuito totalizador de desconexión SLK es vigilada de modo continuo.

3.10 Sistema electrónico cercano al convertidor

Cada convertidor de corriente cuenta con un sistema electrónico cercano al convertidor. Este genera los telegramas de impulsos a partir de las órdenes de encendido de la regulación y los transmite por medio de conductores de fibras ópticas hasta los diversos puestos de semiconductores, donde la electrónica de los tiristores los transforma en impulsos eléctricos de encendido (encendido óptico indirecto). Dicho sistema electrónico vigila también, con ayuda de mensajes de control de la electrónica de los tiristores, la redundancia de los semiconductores conectados en serie. Si se pierde redundancia, se produce una alarma o una señal de desconexión. Los semiconductores que fallan quedan registrados para ser sustituidos la próxima vez que se hagan trabajos de mantenimiento.

Adicionalmente, la electrónica cercana al convertidor de corriente controla en el convertidor GTO el limitador de sobretensión del circuito intermedio. Así se garantiza, además, un registro redundante rápido de las disrupciones eléctricas así como el disparo del encendido de protección del convertidor GTO.

En el convertidor de tiristores, este sistema electrónico controla también el circuito totalizador de desconexión SLK. Sus controles de ejecución permiten a la regulación registrar muy rápidamente los fallos de conmutación en el régimen de ondulator.

3.11 Técnica de control-mando

Se utiliza un moderno sistema de comunicación hombre-máquina (S.P.I.D.E.R. MicroSCADA) basado en una estación de trabajo ALPHA (Ver Fig. 3.9) para vigilar y controlar la instalación, así como para registrar las modificaciones de estado y los fallos. El mando puede ejercerse desde un puesto local, desde la cercana central eléctrica de Mittelsbüren o bien desde el centro de distribución de cargas de la compañía municipal de

Bremen, que se encuentra a una distancia de unos 20 kilómetros, pudiendo fijarse libremente la jerarquía de mando. La instalación en si misma funciona sin necesidad de personal.

El mando y la regulación, así como la protección del acoplamiento de frecuencias, están basados en el sistema de regulación rápido y programable PSR2 (Programmierbares Schnelles Regelungssystem) de ABB

Dicho sistema de control-mando fue desarrollado especialmente para sistemas complejos de electrónica de potencia, prestándose por ello de manera ideal para el acoplamiento de frecuencias Bremen. El sistema combina una elevada velocidad de procesamiento y un lenguaje de programación gráfico, fácil de aplicar (FUPLA 2). La combinación de ambas características garantiza un alto grado de flexibilidad.

Para fines de diagnóstico puede accederse también, a través de una línea telefónica, a la superficie gráfica de programación del sistema y al sistema de comunicación hombre-máquina.

El sistema de control es responsable de las secuencias de arranque y paro de la instalación, mientras que el sistema de regulación garantiza la estabilidad de funcionamiento.

El concepto de regulación se representa de manera simplificada en la **Fig. 3.10**

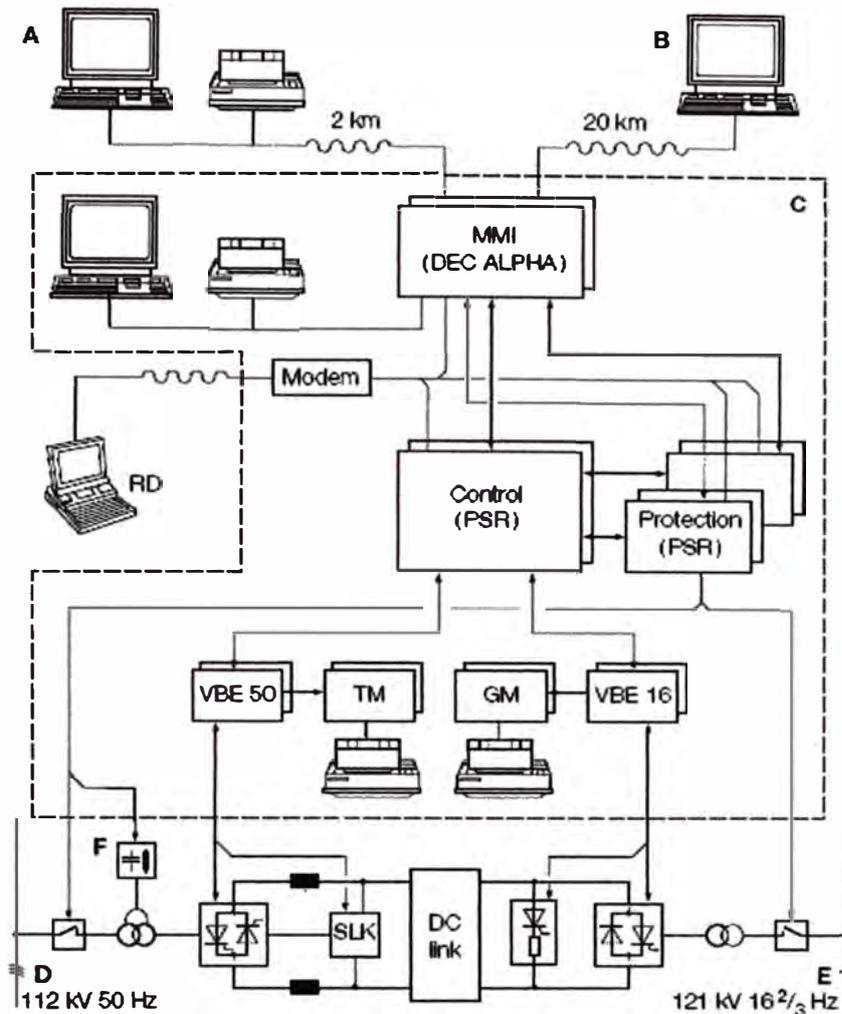


Fig. 3.9 Jerarquía de la técnica de control mando

- A Central eléctrica de la compañía eléctrica municipal de Bremen.
- B Centro de reparto de cargas de la compañía eléctrica municipal de Bremen
- C Técnica de control-mando del acoplamiento de frecuencias
- D Instalación de distribución de la compañía eléctrica municipal de Bremen.
- E Estación de distribución de los ferrocarriles alemanes.
- F Filtro.
- MMI Interfase hombre-máquina con estación de trabajo DEC basada en procesador ALPHA.
- RD Diagnostico a distancia.
- PSR Sistema rápido de regulación programable (mando, regulación y protección).
- VBE Electrónica cercana al convertidor del lado de 50 Hz y 16 2/3 Hz.
- TM, GM Control de fallos, protocolización del convertidor de tiristores o GTO.
- SLK Circuito totalizador de desconexión.
- DC Circuito intermedio (tensión continua).

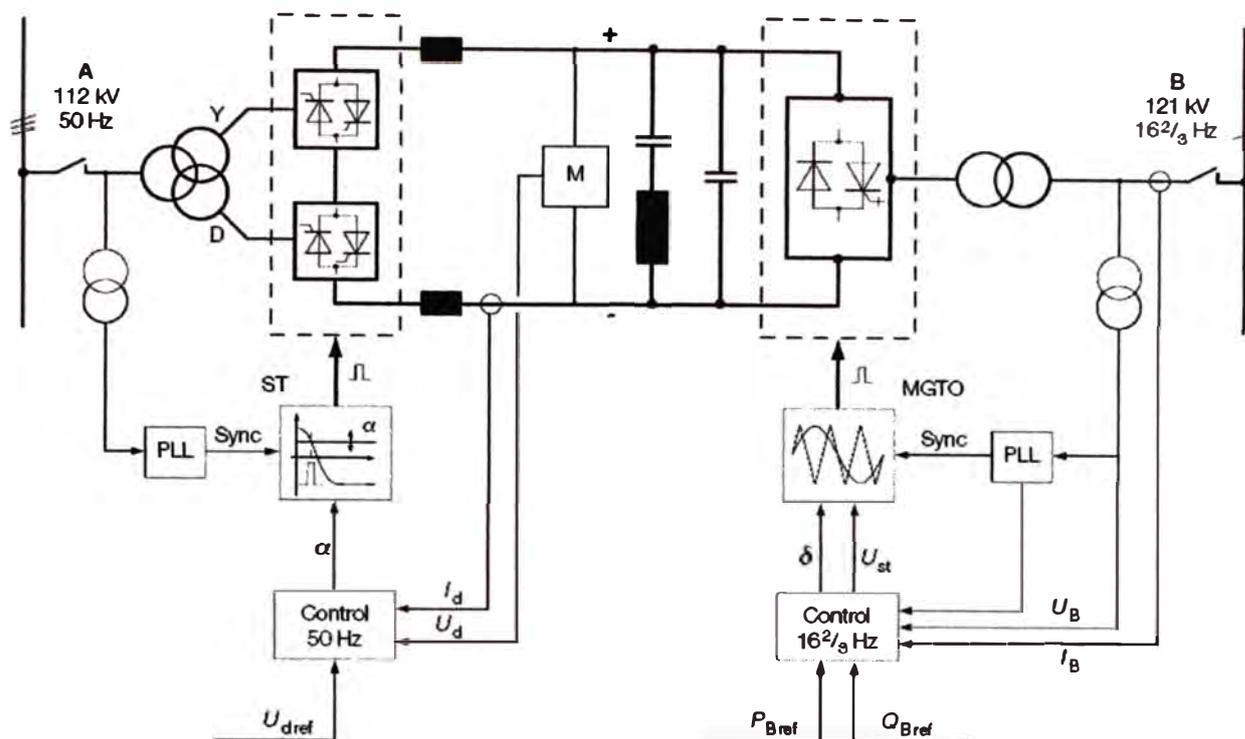


Fig. 3.10 Esquema del concepto de regulación del acoplamiento de frecuencias de 100 MW.

B	Lado de red ferroviaria
α	Ángulo de encendido
A	Lado de corriente trifásica
M	Mediciones
ST	Dispositivo de mando del convertidor de tiristores
MGTO	Modulador del convertidor GTO
PLL	Circuito de regulación de fase
U_d, I_d	Tensión y corriente en el circuito intermedio
U_{st}, δ	Tensión de mando y ángulo de fase (magnitudes de ajuste)
U_B, I_B	Tensión y corriente de lado de la red ferroviaria
$U_{dref}, P_{Bref}, Q_{Bref}$	Valores de referencia de tensión y potencia.

La regulación del lado de 50 Hz desempeña básicamente la tarea de mantener constante la tensión continua del circuito intermedio.

A fin de optimizar la dinámica, y también por motivos de protección, se aplicó una regulación en cascada con regulador de tensión superior y regulador de corriente continua inferior.

Además, el sistema de regulación del lado de 50 Hz controla la conmutación de los convertidores de tiristores en caso de inversión de la potencia. El bloque de mando está sincronizado, como suele hacerse en las instalaciones de transmisión de corriente continua de alta tensión, por medio de un circuito regulador de fases (PLL).

En el lado ferroviario se miden la corriente (I_B) y la tensión (U_B). A partir de estos valores se calculan la potencia activa y la potencia reactiva.

La potencia activa es regulada conforme a una línea característica de frecuencia-potencia, la potencia reactiva conforme a una línea característica tensión-potencia reactiva.

Se utiliza un circuito de regulación de fases (PLL), que sirve a la vez para medir la frecuencia ferroviaria y para sincronizar el modulador de duración de impulsos (MDI).

La protección ha sido concebida como sistema completamente redundante de dos canales. Si uno de los sistemas falla por avería de un aparato, sus canales de disparo se bloquean automáticamente. Sin embargo, la instalación sigue estando protegida integralmente.

El fallo es comunicado al personal de servicio con indicación del aparato defectuoso a través del sistema de comunicación hombre-máquina. La sustitución de aparatos, la parametrización y la comprobación de las funciones protectoras puede realizarse en cualquier sistema protector con la instalación en funcionamiento.

3.12 Dimensionado, verificación y puesta en servicio

El dimensionado y la verificación del acoplamiento de frecuencias Bremen se ha hecho con tres instrumentos distintos, aplicados en el siguiente orden:

- programas analíticos de ordenador,
- programas de simulación por ordenador,
- simulación física mediante el simulador de ABB, reducido a escala 50 W.

Los dos primeros instrumentos citados se distinguen por una elevada precisión y reproducibilidad en una amplia gama de frecuencias; el simulador tiene la gran ventaja de funcionar en tiempo real, lo que permite ensayar el sistema entero, sin peligro alguno, con la técnica de control-mando original.

Con este fin se desarrollaron las funciones principales de la técnica de control mando en el simulador físico, con los parámetros de circuito intermedio de 200 V /250 mA. Antes de la entrega, los armarios de control-mando fueron incorporados al simulador y ensayados, en cooperación con la compañía municipal de Bremen, en condiciones de servicio normal y defectuoso lo más reales posible.

3.11.1 Puesta en servicio

Durante la puesta en servicio se concedió gran importancia a proceder sistemáticamente en la verificación del diseño eléctrico, térmico y mecánico de todas las piezas de la instalación. Tras los ensayos habituales y antes de la puesta en servicio (ensayos de tensión, ensayos de la técnica de control mando y de protección, etc.) se ensayaron los subsistemas, comenzando con la alimentación desde el lado de la corriente trifásica, en el siguiente orden:

- Ensayo de marcha en vacío de la alimentación desde el lado trifásico

Los dispositivos de filtración y compensación, el transformador del convertidor, el convertidor de tiristores y el circuito intermedio de tensión continua fueron puestos bajo tensión por primera vez. Mediante una carga óhmica elevada del convertidor se comprobaron también los componentes de control-mando cercanos al convertidor (por ejemplo el bloque de mando).

- Ensayo de cortocircuito de la alimentación desde el lado trifásico

Mediante un ensayo permanente con corriente continua máxima de 10,5 kA se demostró la adecuación del diseño térmico de todos los subsistemas y especialmente la del equipo refrigerador de 50 Hz. También se ensayaron la regulación y la técnica de control-mando, cercana al convertidor de tiristores.

- Ensayo de marcha en vacío del convertidor GTO

La formación de tensión del convertidor GTO fue ensayada esta vez con tensión reducida del circuito intermedio y con interruptor automático abierto desde el lado ferroviario.

- Ensayos de protección

Las funciones protectoras vitales, como el encendido de protección del convertidor GTO, la limitación de sobretensión en el circuito intermedio y la función del circuito totalizador de desconexión SLK durante la inversión del ondulator fueron ensayadas bajo condiciones reales.

- Ensayo de cortocircuito del convertidor GTO

Con un ensayo permanente, hecho con red eléctrica ferroviaria cortocircuitada y corriente de carga máxima correspondiente a 100 MVA, se demostró la corrección del diseño térmico del convertidor, del transformador del lado ferroviario y del equipo refrigerador.

- Ensayos del sistema en la red ferroviaria, esto es en el marco de estos ensayos se comprobó y optimizó la regulación del equipo bajo condiciones de servicio reales. Asimismo se comprobaron todos los valores de garantía, como datos de rendimiento, eficiencia y repercusiones en la red.

El oscilograma representado en la figura muestra a título de ejemplo la tensión (u_d) y la corriente (i_d) del circuito intermedio, así como la tensión (u_B) y la corriente (i_B) en el punto de conexión de la red ferroviaria en el instante en que se conmuta de régimen de transporte normal a régimen de modificador de fases.

Esta secuencia se activa automáticamente si falla la red de corriente trifásica. En la parte derecha del oscilograma se representa la secuencia de inversión correspondiente, que también se realiza automáticamente una vez que la red trifásica se encuentra de nuevo disponible.

Una vez concluida con éxito la fase de prueba, se entregó finalmente el acoplamiento de frecuencias a la compañía municipal de Bremen para su explotación comercial.

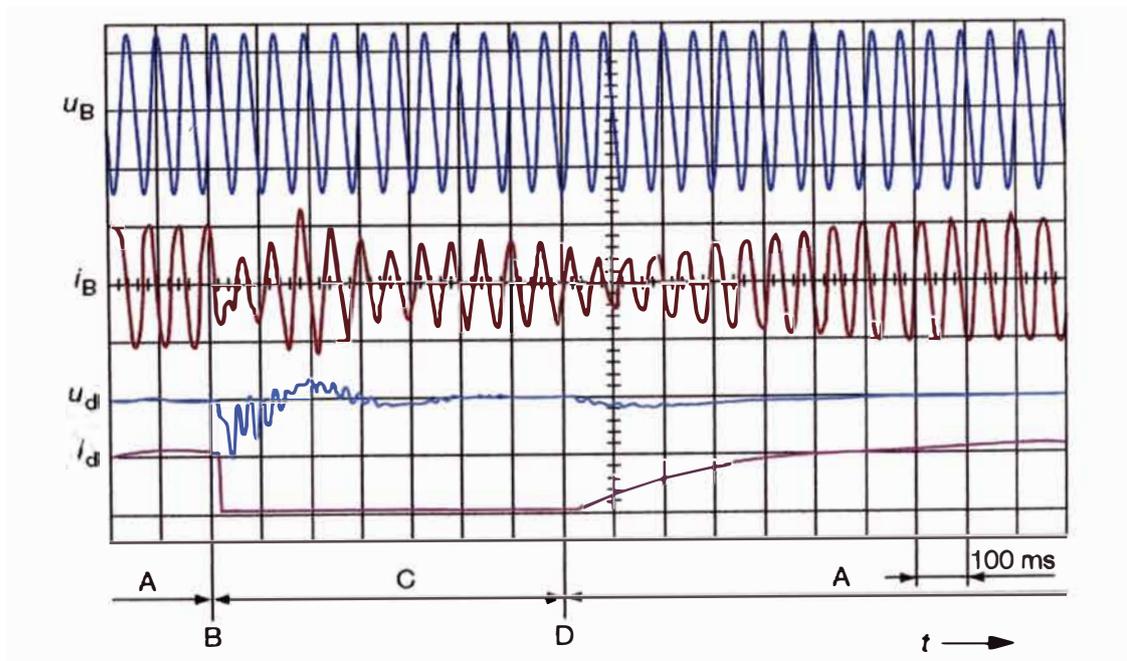


Fig. 3.11 Oscilograma de una interrupción corta de 700 ms en el lado de 50Hz

- A Transmisión de potencia a la red ferroviaria: 121 kV, 30 MW, 20 Mvar subexitado
 - B Desconexión del convertidor de tiristores, conmutación automática en régimen de modificador de fase
 - C Lado trifásico desconectado: régimen de modificador de fase con 20 Mvar subexitado
 - D Reconexión del lado trifásico, aumento automático de la potencia activa
-
- U_B Tensión del lado ferroviario
 - i_B Corriente del lado ferroviario
 - U_B Tensión del circuito intermedio de 10kV, 1 unidad = 1,3 kV.
 - I_d Corriente de circuito intermedio.

CAPITULO IV

OTRAS APLICACIONES

4.1 Los IGCT, nueva generación de tiristores para alta potencia a menor costo.

En el tiristor IGCT (Integrate Gate – Commutated Tiristor) se encuentran integradas las excepcionales prestaciones de conmutación propias del tiristor GTO con mando integrado y diversos avances tecnológicos relativos al dispositivo mismo y mando por puerta, lo que abre interesantes perspectivas para muchas aplicaciones. La conmutación homogénea amplía el campo de funcionamiento seguro del IGCT hasta los límites de avalancha dinámica. Las cualidades intrínsecas del IGCT, hacen innecesarios los circuitos amortiguadores [5].

La reducción de las pérdidas abre un campo de aplicaciones de alta frecuencia, del orden de kHz. Se ha desarrollado una nueva gama de dispositivos IGCT con diodos de alta potencia integrados para aplicaciones de entre 0.5 y 6 MVA, extensible a varios centenares de MVA se emplean varios dispositivos en serie o en paralelo.

4.1.2 Características del tiristor IGCT

Los requisitos para el desarrollo del IGCT eran muy precisos, con un planteamiento semejante al adoptado para el IGBT. Los objetivos del desarrollo son los siguientes:

- Mejorar las características de conmutación de los GTO para un funcionamiento sin circuito amortiguador dv/dt con alta densidad de corriente.
- Reducir las pérdidas en estado pasante y durante la extinción reduciendo al mínimo el espesor de la pastilla de silicio.
- Reducir las necesidades del mando de puerta, sobre todo durante la conducción.
- Desarrollar diodos en antiparalelo adecuados para la extinción sin circuito amortiguador, con di/dt elevado.
- Funcionamiento de altas frecuencias en régimen permanente y transitorio.

- Integrar los principales componentes de conmutación (tiristor GTO y diodo) en una sola empaquetadura semiconductor.

Para las aplicaciones de alta potencia se determinaron otros objetivos complementarios:

- Mejorar la fiabilidad por MVA reduciendo el número de componentes y la complejidad de los mismos.
- Ampliar la gama de potencias a varios cientos de MVA por medio de los dispositivos en serie y en paralelos económicos y fiables.

4.2 Más fiabilidad por MVA

Con los dispositivos descritos, que pueden funcionar sin circuito amortiguador dv/dt , se han mejorado sensiblemente las prestaciones de los circuitos GTO clásicos. Al suprimir los condensadores del circuito amortiguador se evita que se produzca determinadas interacciones:

- Vibraciones entre el condensador y las inductancias del circuito amortiguador.
- Puesta en conducción de los diodos del circuito amortiguador gracias a los cambios en la tensión del bus dc.
- Vibraciones parásitas con puesta en conducción del dispositivos

El diodo en antiparalelo puede funcionar sin circuito amortiguador dv/dt para mantener la recuperación inversa del diodo en el dominio del funcionamiento seguro. Puesto que se trata de un tiristor, el GCT no tiene la capacidad de limitar el di/dt . Esta limitación la realiza un a inductancia enclavada con un diodo y una resistencia, como en los circuitos GTO estándar. Este enclavamiento di/dt suplementario limita la corriente en caso de disrupción, un fenómeno muy improbable.

Se puede construir un circuito ondulator trifásico muy simplificado con un solo limitador di/dt (Ver figura 4.1) para las tres fases. El ondulator trifásico ideal con tecnología IGCT estaría, por lo tanto, constituido por solo 11 elementos.

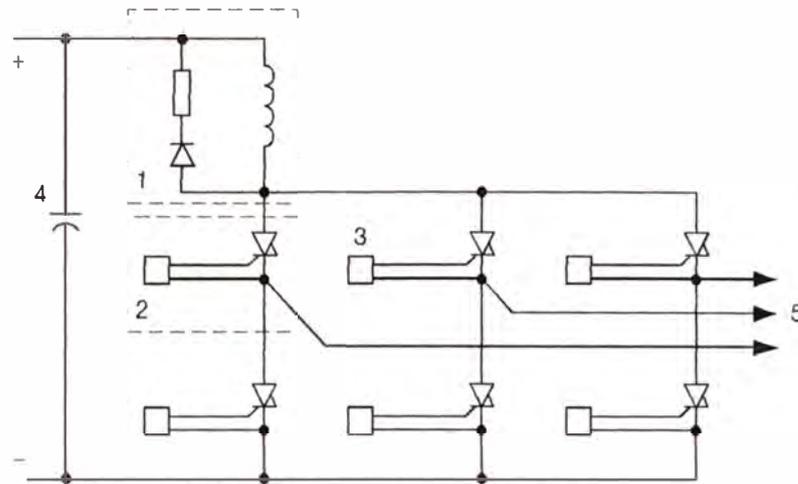


Fig. 4.1 Circuito de ondulador trifásico típico con tiristores IGCT

1. Circuito amortiguador di/dt
2. IGCT
3. Mando de puerta
4. Condensador del circuito intermedio de continua
5. Salida Trifásica.

4.3 Aplicaciones comerciales

La primera aplicación comercial de los módulos de onduladores con semiconductores IGCT de alta potencia, Ha sido una aplicación de 100 MVA

(Ver Fig. 4.2) que se encuentran en funcionamiento desde le verano de 1996.

Esto fue puesta a punto después de una amplia serie de simulaciones y controles de los cuales la experiencia de funcionamiento real de las instalaciones ha dado resultados excelentes. Hasta hoy, de los más de 300 IGCT instalados ha fallado uno solo, debido a un problema de contacto con un diodo luminoso. Los resultados han confirmado la altísima fiabilidad que se esperaba de la tecnología de IGCT (<400 FIT por nivel IGCT).

Este altísimo nivel de fiabilidad se debe en parte a la menor sollicitación eléctrica, conseguida por medio del montaje en serie de los IGCT en configuración redundante. LA fiabilidad seguirá aumentando gracias al menor número de elementos necesarios para el funcionamiento sin circuito amortiguador y se irá aproximado a la de la tecnología de tiristores clásicos (<100 FIT por nivel).

Es de esperar que los próximos años traigan los siguientes avances de la tecnología de IGCT :

- Reducción del número de circuitos amortiguadores du/dt en los dispositivos de extinción en serie, o incluso eliminación de los mismos.
- Frecuencias de conmutación aún más altas, de hasta 1 kHz o más.
- Alimentación del mando a través del ánodo, posible gracias a la menor necesidad de potencia de puerta de los IGCT con ánodo transparente.

4.4 Nuevas aplicaciones para la electrónica de potencia

Entre algunas de las aplicaciones más recientes tenemos:

- **STATCOM** (static compensator), para la compensación continua de la potencia reactiva, capacitiva o inductiva, con un mínimo de capacidad instalada, para mantener la tensión constante y adaptación a la carga.
- **Los convertidores ACS 1000**. primer accionador estándar de CA para aplicaciones de media tensión, comercializado por ABB con éxito para aplicaciones de 0.5 a 6 MVA; varias unidades están ya funcionando en la industria.

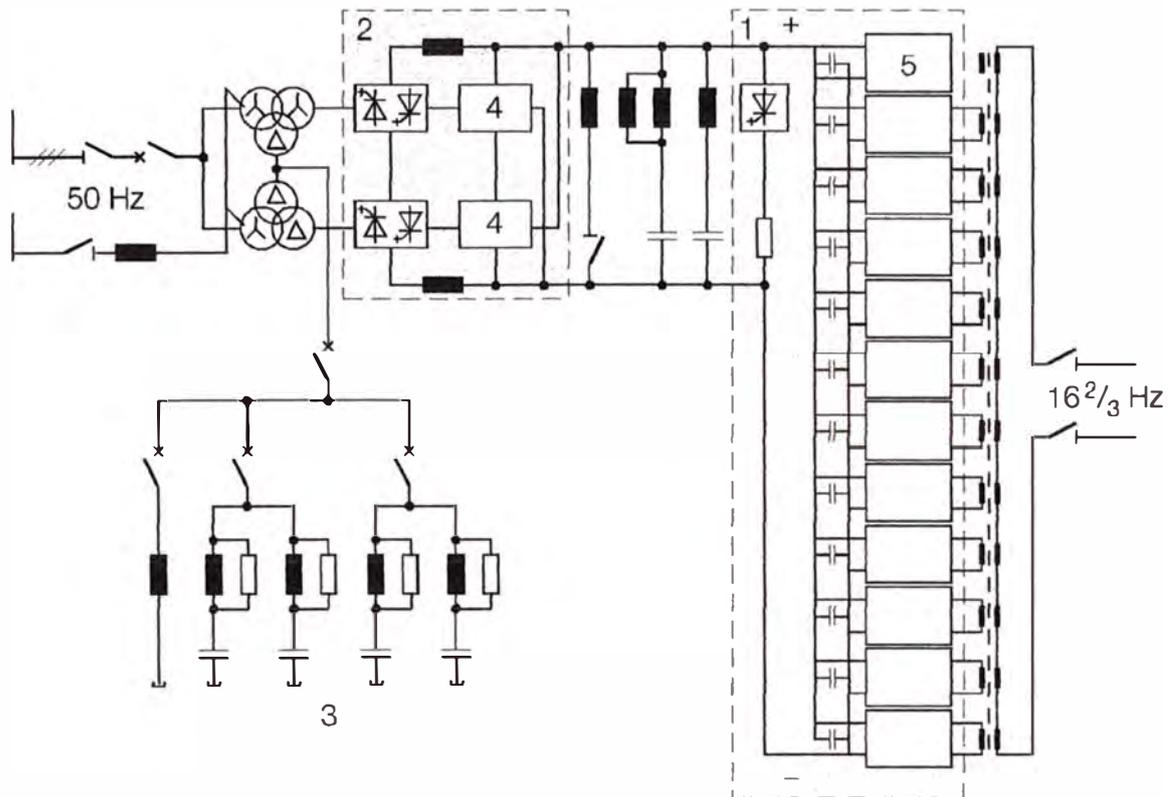


Fig. 4.2 Ondulador de 100 MVA con IGCT en serie

El ondulador de 100 MVA con IGCT en serie (Ver Fig. 4.2) que está en funcionamiento desde mediados de 1996 tiene los siguientes componentes:

1. Convertidor IGCT
2. Convertidor de tiristores
3. Filtros de armónicos
4. Circuito de extinción común
5. Puentes

CONCLUSIONES

1. Desde la introducción exitosa de los tiristores desconectables GTO, se recurre preferentemente a los equipos de conversión estáticos para el acoplamiento de redes ferroviarias y la red eléctrica nacional.
2. El acoplamiento estático de frecuencias $16 \frac{2}{3}$ – 50 Hz de 100MW en Bremen, es con ventaja la instalación de tecnología GTO más grande del mundo.
3. El circuito de corriente principal del acoplamiento de red Bremen consiste en primer lugar en el convertidor de tiristores en el lado de la corriente trifásica, el circuito intermedio de corriente continua, y el convertidor GTO, transformador en el lado de la red de tracción.
4. El sistema de control es responsable de las secuencias de arranque y paro de la instalación, mientras que el sistema de regulación garantiza la estabilidad de funcionamiento.
5. Con un ensayo permanente de cortocircuito del convertidor, hecho con red eléctrica ferroviaria cortocircuitada y corriente de carga máxima correspondiente a 100 MVA, se demostró la corrección del diseño térmico del convertidor, del transformador del lado ferroviario y del equipo refrigerador.
6. El tiristor IGCT integra todas las innovaciones necesarias para las futuras aplicaciones de la electrónica de potencia, lo que ha convertido en un elemento clave para las aplicaciones de media y alta tensión entre 0.5 MVA a varios centenares de MVA.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Dr. Hans Peter Eggenberger, Revista ABB 9/10 “Acoplamiento de frecuencias completamente estático de 100 MW en BREMEN “, 1996.
- [2]. Dr. K. Heumann, AEG Telefunken, Berlín Fundamentos de electrónica de Potencia 1978.
- [3]. Dr. Hans Peter Eggenberger, Suiza Revista ABB 5/ 96 “Acoplamiento en serie de tiristores GTO para convertidores de alta potencia”.
- [4]. Ms. Rodolfo Moreno Martínez Curso de actualización Profesional, Junio 2001
- [5]. Dr. Peter K. Steimer, “ IGCT, Nueva generación de tiristores para onduladores de alta potencia a menor coste” Revista ABB 5/ 1998 Industrie AG Suiza.
- [6]. Schail Malik y Dieter Kluge “ ACS 1000, primer accionador estándar de CA para aplicaciones de media tensión “ Revista ABB 2/ 1998.