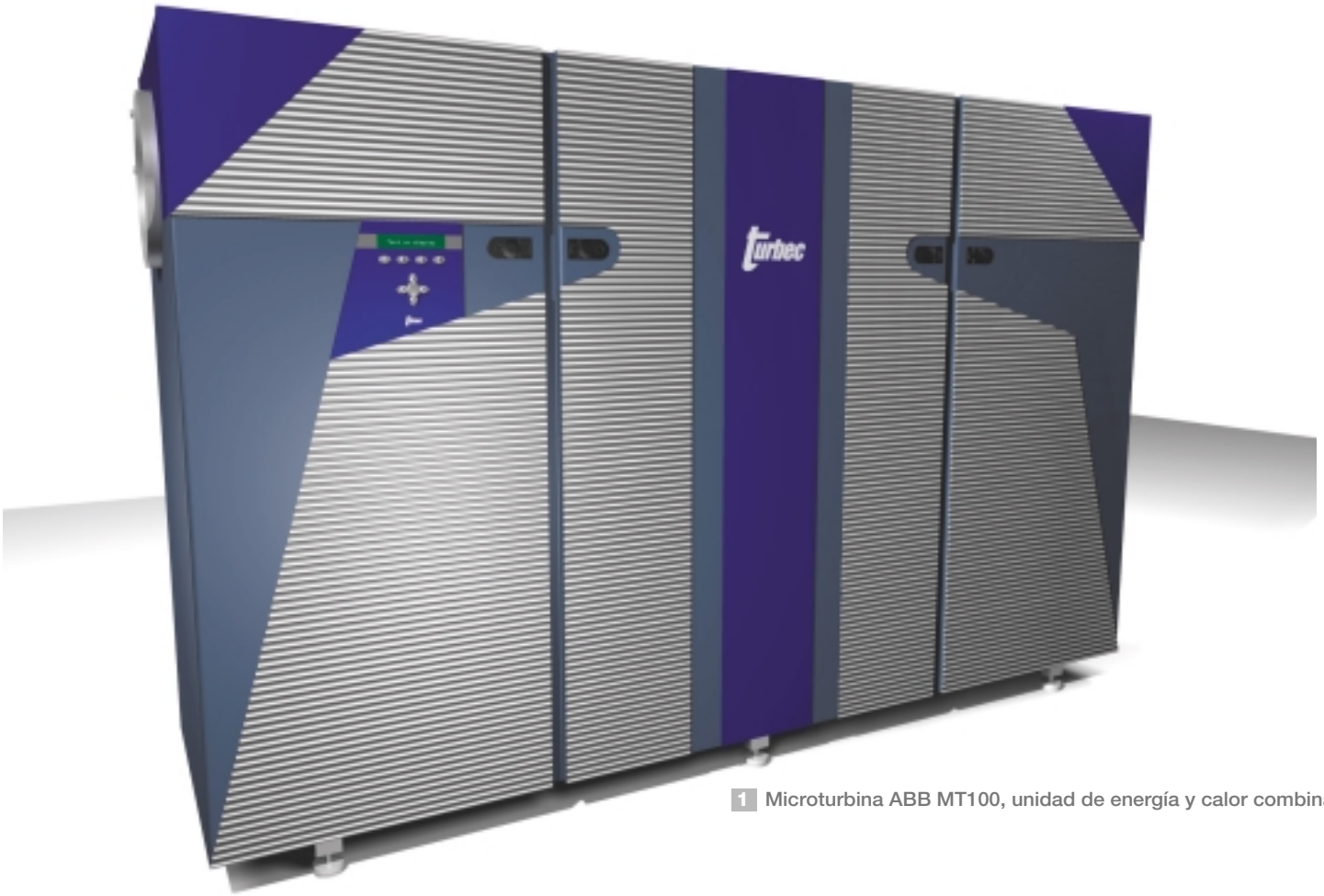
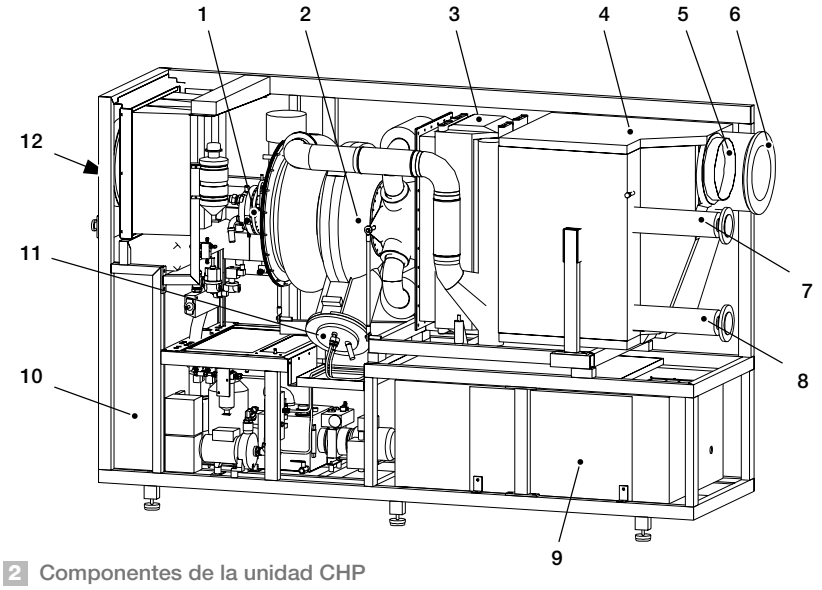


1 Microturbina ABB MT100, unidad de energía y calor combinados

Microturbinas: hacia la generación distribuida de energía y calor

Anders Malmquist, Ola Aglén, Edgar Keller, Marco Suter, Jari Wickström

Menor número de grandes plantas generadoras y de tendidos eléctricos aéreos, un uso más eficiente de los recursos naturales y una electricidad más barata, estos son los objetivos posibles ahora gracias a un innovador concepto de la generación de energía distribuida. La microturbina, una pequeña turbina de gran eficacia que puede ser propulsada por medio de gas natural o biogás, es un elemento decisivo para este éxito. Capaz de generar más calor, incluso, que electricidad, la microturbina es especialmente indicada como fuente de energía para instalaciones que van desde hospitales y hoteles hasta centros comerciales y fábricas. Con la ayuda de sistemas de telecomunicación, estas plantas generadoras pueden ser conectadas entre si para crear soluciones de red que revolucionarán en el futuro el modo de generar y distribuir energía.



2 Componentes de la unidad CHP

1 *Alternador,* 2 *Motor de turbina a gas,* 3 *Recuperador,* 4 *Cambiador de calor de gases de escape,* 5 *Salida de aire de ventilación,* 6 *Salida de gases de escape,* 7 *Entrada de agua* 8 *Salida de agua caliente,* 9 *Electrónica de potencia,* 10 *Sistema de control,* 11 *Cámara de combustión,* 12 *Entrada de aire*

Como parte de su estrategia comercial, ABB Distributed Power Generation ABB creó en 1998 una asociación de capital al 50% junto con Volvo Aero Corporation, con objeto de desarrollar una nueva generación de microturbinas. La empresa conjunta resultante conjuga la experiencia de Volvo en materia de vehículos eléctricos híbridos propulsados por turbina a gas con la de ABB en el campo de la conversión y generación de energía de alta frecuencia [1, 2].

El primer producto lanzado por esta nueva empresa, denominado Turbec AB, es la unidad de energía y calor combinados denominada 'Microturbina ABB MT100' **1**. Accionada por gas natural, la ABB MT100 produce 100 kW de energía eléctrica y 167 kW de energía térmica.

El elemento principal de la ABB MT100 es una pequeña turbina de gas, montada junto con un compresor sobre un solo eje e integrada con un nuevo alternador de alta velocidad, denominado HISEM 110/70.

Un producto totalmente innovador con grandes ventajas

A pesar de tratarse de una tecnología relativamente reciente, las microturbinas poseen el potencial necesario para convertirse en un cotizado producto a medida que crezca el mercado y la comercialización fuerce los precios a la baja. Estas son algunas de las características que pueden acelerar el proceso:

- Conformidad con las más recientes normas sobre emisiones
- Compacidad y ligereza del sistema, que puede pasar por una puerta corriente
- Bajo nivel de ruido
- Mantenimiento mínimo
- Control remoto para funcionamiento sin supervisión
- Baja inversión inicial debido a la fabricación en serie y a la sencillez del diseño
- Flexibilidad en el uso de combustible
- Alta eficacia

Diseñado para una nueva era en la generación de energía distribuida

La microturbina ABB MT100 es una unidad de

calor y energía combinados (CHP, *c*ombined *h*eat and *p*ower), es decir, produce energía eléctrica y térmica. Está montada formando una pequeña unidad 2 y se acciona por medio de gas natural. Dependiendo de la presión de este podría ser necesario el uso de un compresor.

La ABB MT100 está concebida para ser instalada en interiores, obteniéndose el aire de una toma exterior. Sus principales elementos son:

- Recuperador y motor con turbina a gas
- Alternador eléctrico
- Sistema eléctrico
- Cambiador térmico de gases de escape
- Sistema de control y supervisión

En la *Tabla 1* se muestran los datos técnicos de una unidad CHP

Tabla 1: ABB MT100 CHP, características principales

Propiedad	Datos
Dimensiones	
Anchura	840 mm
Altura	1900 mm
Longitud	2900 mm
Peso	2000 kg
Nivel de ruido	70 dBA at 1 meter
Rendimiento[1)]	
Potencia eléctrica neta de salida	100 kW
Rendimiento eléctrico neto	30%
Potencia térmica neta de salida (agua caliente)	167 kW
Rendimiento total neto	80%
Emisiones volumétricas de gases de escape (15% O_2 y 100% de capacidad generadora)	
NO_x	<15 ppm v
CO	<15 ppm v
UHC	<10 ppm v
Entrada de aire ambiente	
Temperatura del aire	de –25°C a +40°C
Humedad del aire entrante	0-100%
Presión del gas (min./máx.)	69,5 bar (a)
Índice Wobbe	43–55 MJ/m³
Flujo másico, a 100 kW de capacidad generadora (39 MJ/kg)	31 Nm³/hour
Aire circundante	
Temperatura	de 0°C a +40°C
Humedad circundante	0-80%
Flujo de gases de escape	0,79 kg/s
Temperatura de gases de escape	55° C
Temperatura del agua entrante	50° C
Temperatura del agua saliente	70° C

[1)] *Basado en condiciones ISO teniendo en cuenta el consumo energético y las pérdidas correspondientes a todos los elementos auxiliares, inclusive el compresor de gas.*

Diseño y funcionamiento

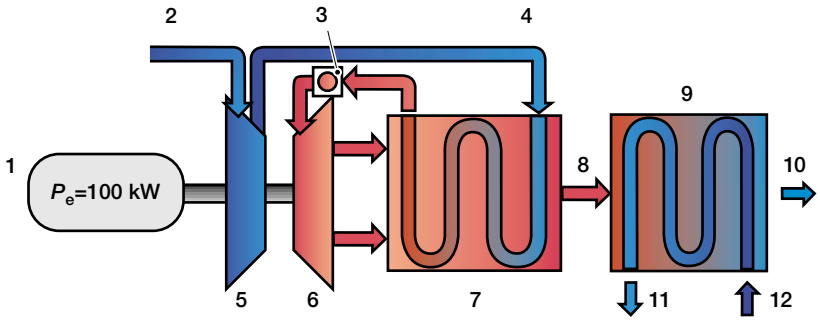
En la microturbina, un rotor de turbina impulsa una rueda de compresor montada sobre el mismo eje 3. El compresor introduce el aire de proceso dentro de la cámara de combustión, donde se añade el combustible y tiene lugar una combustión continua. El flujo de gas caliente se expande en la turbina haciendo que gran parte de la energía térmica se transforme en energía mecánica que acciona el compresor y la carga. En las plantas generadoras convencionales la carga es un alternador bipolar o cuadripolar accionado por medio de una caja de engranajes. La velocidad del alternador es fija, dado que está sincronizada a la misma frecuencia que una red eléctrica. En la microturbina ABB MT100, el alternador de alta velocidad se acopla directamente al eje de turbina y un convertidor estático de frecuencia ajusta electrónicamente la velocidad.

La energía térmica restante puede disiparse a través del escape, si bien la turbina a gas tendrá un bajo rendimiento si no se instalan varias etapas adicionales de turbina y compresor. La ABB MT100 resuelve este problema mediante un recuperador, el cual recoge el calor de escape y lo utiliza para precalentar el aire comprimido antes de que se introduzca en la cámara de combustión. De este modo se requiere menos combustible para alcanzar la temperatura de funcionamiento deseada. Tras el recuperador, otro cambiador térmico calienta el agua en el circuito externo.

Las emisiones de la turbina a gas son muy reducidas, dado que la combustión continua pue-

3 ABB MT100: procesos termodinámicos

1 *Alternador,* 2 *Aire aspirado,* 3 *Cámara de combustión,* 4 *Aire hacia el recuperador* 5 *Compresor,* 6 *Turbina,* 7 *Recuperador,* 8 *Gases de escape,* 9 *Cambiador de calor de gases de escape,* 10 *Salida de gases de escape,* 11 *Salida de agua caliente,* 12 *Entrada de agua*



de ser controlada muy estrictamente. Asimismo, la cámara de combustión externa puede ser optimizada para obtener un bajo nivel de emisiones.

Las turbinas a gas pueden estar equipadas con la denominada 'geometría variable'. Por medio de álabes ajustables se controla el flujo de gas hacia la turbina y el compresor, permitiendo así el control del punto de funcionamiento de la turbina. Los diseñadores de la turbina ABB MT100 optaron por un enfoque diferente en este aspecto. El sistema de generación de energía eléctrica con el convertidor de frecuencia permite un funcionamiento a velocidad variable, lo que facilita el control de la energía ajustando la velocidad de la turbina dentro de un amplio rango de valores. Es posible, por tanto, escoger un concepto más sencillo de turbina manteniendo bajos los costes del producto. Las microturbinas, y en general las turbinas a gas, se han descrito detalladamente en [3] y [4] respectivamente.

Motor con turbina a gas

La turbina a gas es una máquina de eje único cuyos elementos principales son los siguientes:

- Carcasa
- Compresor
- Recuperador
- Cámara de combustión
- Turbina

Carcasa: El alternador eléctrico y los componentes giratorios de la turbina a gas están montados sobre el mismo eje. Tanto

Microturbinas: el gran éxito de la miniaturización

Tras la transformación de ABB en una compañía especializada en el conocimiento, ABB Distributed Power Generation ha quedado establecida como nueva unidad de actividad destinada a servir el cambiante mercado de la energía.

La misión de la nueva unidad es suministrar, no equipos, sino soluciones de servicios energéticos a clientes que precisan energía, calor y/o refrigeración.

El suministro de servicios en lugar de equipamientos exige combinar la tecnología y la financiación. La empresa ABB Distributed Power Generation instala en la sede del cliente una unidad generadora compacta que ella misma posee, opera a distancia y mantiene cuando es necesario. El cliente paga únicamente la potencia generada y puede por tanto disponer de capital para invertirlo en su negocio principal.

El cliente obtiene esta ventaja comercial gracias a la reducción de los costes respecto de la competencia. Nosotros podemos ofrecer servicios energéticos generados localmente a un precio inferior al de las soluciones convencionales, eliminando los costes de distribución y transmisión y suministrando energía térmica como producto derivado de gran utilidad.

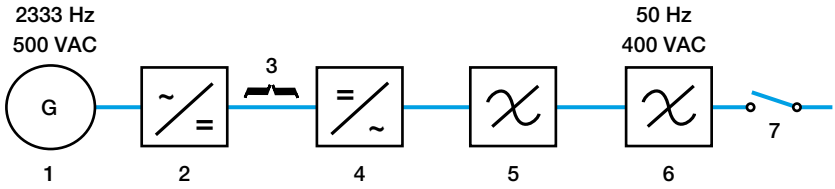
La segunda ventaja para el cliente, más importante aún si cabe, reside en la calidad de la energía y en la seguridad. Las interrupciones de servicio de energía siguen produciéndose ocasionalmente y cada una de ellas supone un grave riesgo para las operaciones del cliente y, en consecuencia, para sus ingresos. La instalación de una unidad de microturbina conectada a la red pública hace extremadamente improbables las interrupciones del suministro de energía y garantiza la fiabilidad de funcionamiento de las actividades y sistemas informáticos del cliente, así como la continuidad del flujo de sus ingresos.

En resumen, ABB está en condiciones de ofrecer servicios energéticos de menor coste, con soluciones que son algo más que competitivas. Estos servicios, además, no exigen que el cliente realice inversión inicial alguna. Los campos típicos de aplicación son los edificios de oficinas, centros comerciales, invernaderos, regiones con deficiencias en la conexión a red, hospitales, centros de ocio, etc.

En algunas zonas los sistemas de transmisión y distribución tienden a estar sobrecargados; además, la normativa, medioambiental o de otra índole, puede convertir la ampliación de estos sistemas en un proceso largo y tedioso. La aplicación de tecnología avanzada de la información como Internet permite a un operador conectar entre si y controlar un gran número de microturbinas y otros elementos generadores de energía distribuida, lo cual, efectivamente, constituye una 'central eléctrica virtual'.

4 Esquema de la generación de energía eléctrica

1 *Alternador,* 2 *Convertidor rectificador / de puesta en marcha,* 3 *Vía de distribución de corriente continua,* 4 *Convertidor,* 5 *Filtro de línea,* 6 *Filtro de compatibilidad electromagnética (filtro EMC),* 7 *Cortacircuito principal*



los componentes del motor como el eje están alojados en la misma carcasa.

Compresor: En la ABB MT100 se utiliza un compresor centrífugo radial con el fin de comprimir el aire ambiente. la relación de compresión es de aproximadamente 4,5:1. El compresor está montado sobre el mismo eje del alternador eléctrico y de la turbina.

Recuperador: El recuperador es un cambiador de calor gas-aire, anexo a la microturbina, que aumenta la eficacia de la turbina a gas transfiriendo el calor de los gases calientes de escape al aire comprimido que pasa, después, a la cámara de combustión.

Cámara de combustión: El aire comprimido precalentado se mezcla con el gas natural y un dispositivo de encendido eléctrico alojado en la cámara de combustión inflama la mezcla. La cámara de combustión es de tipo premezcla de baja emisión, garantizando así bajas emisiones de NOx, CO e hidrocarburos inquemados contenidos en los gases de escape.

Turbina: La turbina radial acciona el compresor y el alternador a un régimen de velocidad de 70.000 rpm. Al salir de la cámara, los gases de combustión tienen una temperatura aproximada de 950ºC y están sometidos a una presión en torno a 4,5 bares. A medida que los gases se expanden en la turbina, la presión disminuye hasta casi valores atmosféricos y la temperatura baja hasta unos 650ºC.

Cambiador de calor de gases de escape: El cambiador de calor de gases de escape es de tipo contraflujo de gas a agua. Transfiere al sistema de agua caliente la energía térmica de los gases de escape, que pasan al cambiador de calor a una temperatura aproximada de 270ºC. La temperatura del agua de salida depende de las condiciones del agua entrante, es decir, de su temperatura y de su flujo másico. Los gases de escape que salen del cambiador de calor salen al exterior a través de un conducto de escape.

Sistema de control y supervisión

La ABB MT100 es controlada y supervisada automáticamente por el controlador PMC del módulo de potencia, de forma que no es necesario supervisar la unidad CHP en régimen de funcionamiento normal. En caso de producirse un fallo crítico, el PMC provoca, según sea necesario, una parada normal o un apagado de emergencia, y además registra un código de avería que puede ser visualizado en el panel de control.

El sistema de generación de energía eléctrica y la turbina a gas son operados y controlados automáticamente por el PMC, el cual recibe a partir de varios sensores valores de:

- Consumo total de energía
- Demanda de energía eléctrica
- Presión de gas
- Temperatura del aceite
- Vibraciones
- Velocidad de giro

Sistema de generación de energía eléctrica a gran velocidad

El rendimiento de las pequeñas turbinas a gas mejora substancialmente cuando se elimina la caja de engranajes destinada a reducir la velocidad del eje de la turbina hasta el mismo valor usual en las máquinas eléctricas convencionales. El resultado es una máquina más eficiente, compacta y fiable. Para tal aplicación, la velocidad supera normalmente las 30.000 rpm y puede llegar a sobrepasar las 100.000 rpm.

Los imanes permanentes de alta energía y los materiales de gran resistencia son de tecnología punta y han demostrado ser muy adecuados para máquinas eléctricas de gran velocidad. Así, por ejemplo, la utilización de imanes de neodimio-hierro-boro (NdBFe) reduce las pérdidas del rotor del alternador.

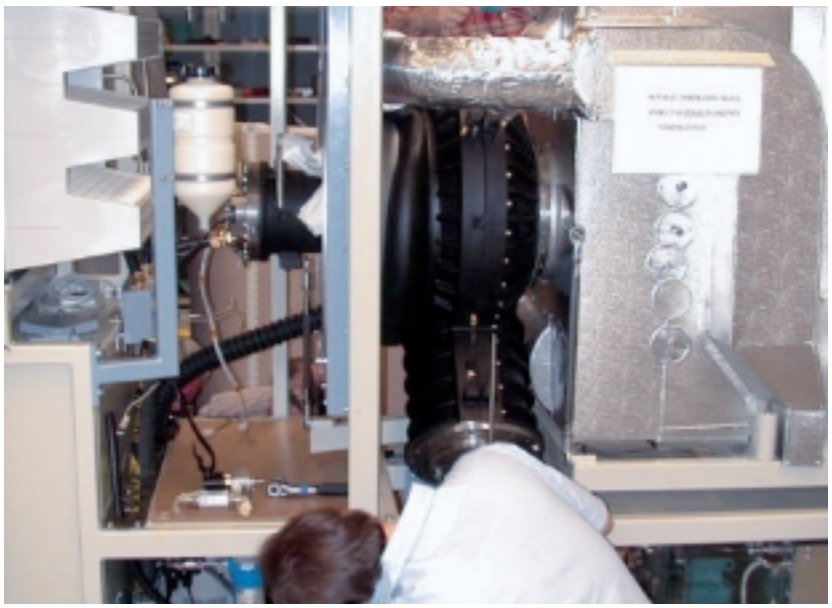
La conversión de frecuencia, muy eficiente, es un requisito previo para lograr un acoplamiento mecánico directo. Los transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) no sólo proporcionan la eficiencia requerida sino que además pueden ser conmutados a la alta frecuencia apropiada. Las máquinas basadas en estos dispositivos se fabrican a medida para determinadas aplicaciones de gran velocidad.

Una ventaja del alternador de gran velocidad es que el tamaño de la máquina disminuye casi proporcionalmente al aumento de velocidad, disponiéndose así de una unidad muy pequeña que puede ser integrada con la turbina de gas.

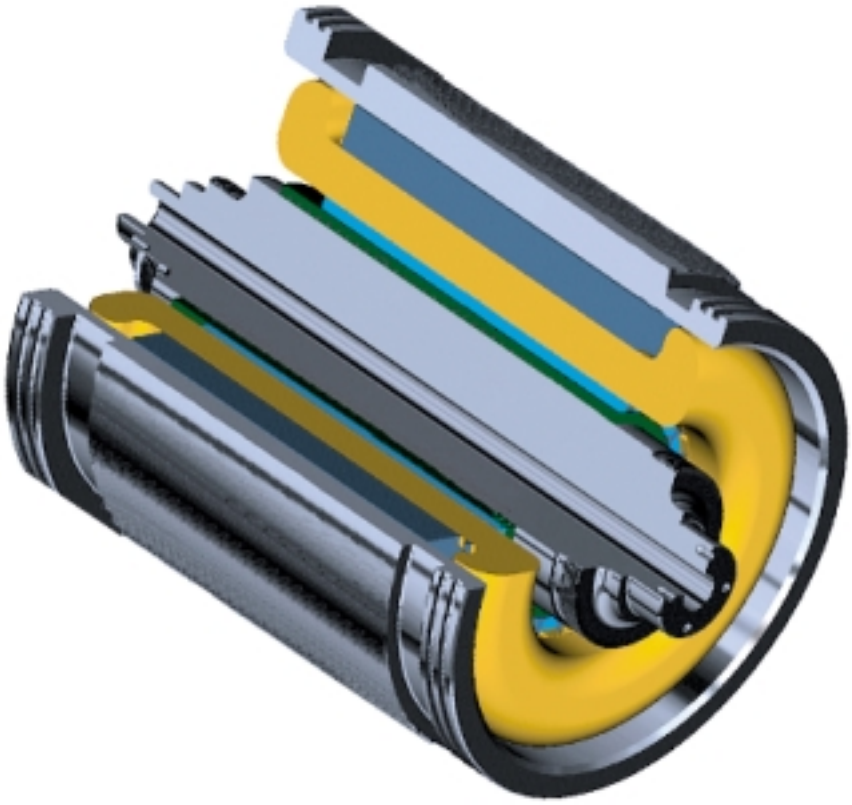
Sistema eléctrico

Antes de entregar a la red la energía generada es necesario convertirla a la frecuencia de

5 Alternador HISEM 110/70 y turbina en preparación para las pruebas



6 Sección del alternador HISEM 110/70



aquella 4. La corriente del alternador es rectificada a corriente continua para convertirla a continuación a corriente alterna trifásica. Un inductor estabiliza la salida de corriente alterna, y un filtro de compatibilidad electromagnética (filtro EMC) protege la red contra las interferencias generadas. El sistema eléctrico puede utilizarse en sentido inverso para poner en marcha la turbina a gas.

Alternador de alta velocidad

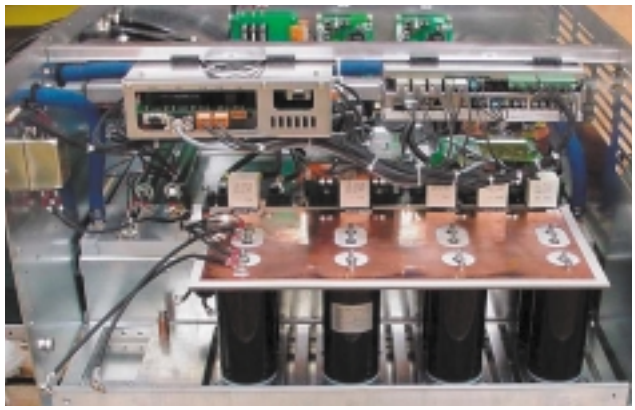
La energía eléctrica es generada por un alternador síncrono HISEM 110/70 de imanes permanentes de gran velocidad, el cual está integrado en la microturbina 5. El rotor está suspendido de un rodamiento a cada lado del rotor de imanes permanentes, sin que existan rodamientos adicionales sobre el eje de la turbina. La frecuencia de salida del alternador es alta, pudiendo llegar hasta 2,3 kHz. El alternador, a modo de sistema eléctrico de puesta en marcha de la turbina a gas, pone también en funcionamiento la unidad CHP.

Diseño del alternador: El alternador es un perfeccionamiento del modelo HSG100 [5], desarrollado para uso en vehículos híbridos. La experiencia obtenida con aplicaciones de microturbinas, así como las nuevas necesidades que hay que satisfacer, ha producido importantes mejoras, especialmente en cuanto a costes de producción y fiabilidad. Otra ventaja añadida, en beneficio del diseño, fue la experiencia de ABB Motors en la fabricación a gran escala.

En 6 se muestra el estator del alternador. Su núcleo consta de laminados finos de acero eléctrico de bajas pérdidas y el devanado está compuesto por hilo dividido para mejorar las prestaciones a alta frecuencia. La disposición cuadripolar contribuye a acortar los devanados

7 Rotor del alternador

8 Convertidor de frecuencia



finales y permite mantener pequeña la distancia entre los rodamientos. Se utiliza refrigeración por agua para mantener baja la temperatura del devanado. Esta característica, añadida a la impregnación a presión en vacío y a un aislamiento adicional, asegura una larga vida efectiva del devanado.

El rotor 7 consta de un cuerpo de acero magnético con imanes permanentes montados en superficie. Una cubierta a base de bandas de fibra de carbono soporta firmemente los imanes incluso a 70.000 rpm. Dado que las condiciones de funcionamiento difieren considerablemente de las de máquinas convencionales, los programas analíticos habituales no son suficientes para el diseño eléctrico de la máquina. Un factor muy influyente es la alta frecuencia fundamental, 2,3 kHz a 70.000 rpm, lo que hace que no sean válidas las constantes de ingeniería empleadas en los programas de cálculo convencionales, determinadas empíricamente a lo largo de los años con las máquinas de diseño convencional. Por ello se escogió una estrategia de diseño que combinara cálculos analíticos y el análisis de elementos finitos.

El radio del rotor, determinado según criterios mecánicos de diseño, es un compromiso entre una rigidez óptima a la flexión y el espesor máximo de imanes que puede ser retenido por unas bandas de espesor razonable. Tomando el radio del rotor como base, el radio del núcleo del estator y la longitud axial se determinan en un proceso iterativo. La naturaleza discreta del bobinado del estator, con un número de vueltas muy limitado, constituye un importante condicionante.

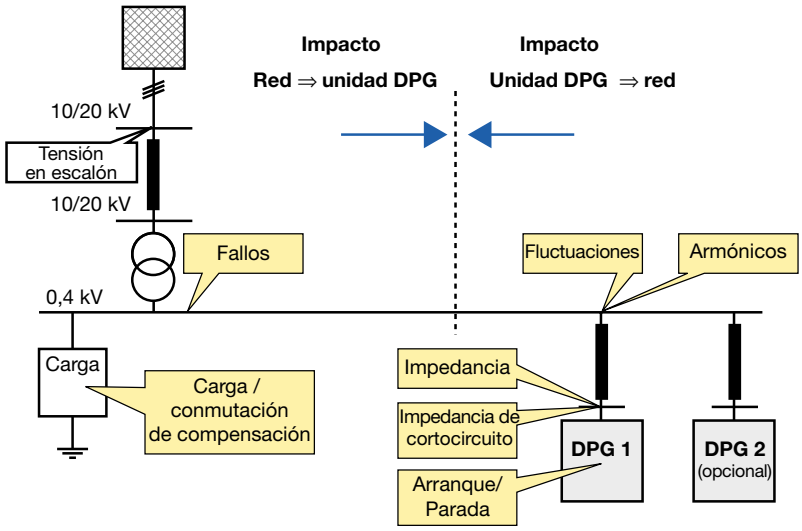
Es importante asegurarse de que el rotor nunca alcance una temperatura que pueda desmagnetizar el imán, lo que se logra reduciendo las pérdidas del rotor y proporcionando una eficiente refrigeración en el entrehierro. Dos factores, la fricción del aire y las ondas de fuerza magnetomotriz (MMF) asíncronas en el entrehierro, constituyen la principal causa del aumento de temperatura en el rotor. El segundo factor es originado sobre todo por los armónicos en la corriente del estator. Dado que una alta velocidad causa grandes pérdidas por fricción y que las bandas de fibra de carbono actúan como aislante térmico, el rotor resulta más sensible a los armónicos de corriente que el de una máquina convencional. Por tanto, se definió un límite de armónicos de corriente basado en unas pérdidas aceptables del rotor.

Convertidor de frecuencia

Varios factores constituyeron un desafío importante para los diseñadores del convertidor de frecuencia, concretamente la alta frecuencia de entrada, de 2300 Hz, y los objetivos de coste del producto. El convertidor de microturbina deriva de la plataforma de conversión ACS 600, mientras que las funciones relativas a la red estaban disponibles en el módulo inversor de aprovisionamiento ACA 635. Con todo, se necesitó una extensa programación de aplicaciones con el fin de implementar las funciones de interfaz y de control necesarias para el uso de la microturbina.

La fase de entrada del alternador, inclusive el convertidor de puesta en marcha, se basa en el equipo de componentes del ACS 600, aunque fue necesario desarrollar un nuevo panel de control para regular la velocidad de la turbina y la puesta en funcionamiento del sistema de control. En el modo de puesta en marcha se utiliza el rectificador a modo de inversor para acelerar la turbina hasta 30.000 rpm, velocidad a partir de la cual la turbina comienza a producir potencia neta que se emplea para producir una aceleración adicional hasta el margen de funcionamiento de 50.000 a 70.000 rpm. El convertidor

9 Convertidor de frecuencia en la unidad T100 CHP



de puesta en marcha actúa como rectificador y proporciona energía eléctrica a las barras de corriente continua, a partir de las cuales el convertidor de red la transfiere a la red de servicio.

Los convertidores en serie ACS 600 están diseñados para funcionar en entornos industriales, mientras que en aplicaciones de microturbina han de cumplir los requisitos de las instalaciones para áreas residenciales. A pesar de que las aplicaciones de generación de energía distribuida están todavía en una 'zona indefinida' en lo que se refiere a la normativa de red, se decidió adaptar el convertidor para hacerlo conforme a las especificaciones de la norma EN50081.

Mientras que la fuente de los componentes funcionales pertenece a la serie ACS 600, la instalación mecánica ha sido realizada a medida para adaptarla a la aplicación de microturbina 8, 9, una de cuyas características más importantes es el uso de refrigeración por agua.

Análisis del sistema

En una aplicación de microturbina típica es probable que la topología de la red no sea conocida, por lo que el control de la estabilidad del sistema puede resultar una tarea ardua. Cuando es necesario coordinar unidades de generación distribuida de energía puede existir un alto riesgo de inestabilidad de la red. Dado que hay más de un controlador, podrían aparecer repentinamente incluso oscilaciones internas, tal y como mostraron las pruebas realizadas sobre la unidad CHP prototipo [7] en el centro de investigaciones ABB Corporate Research de Dättwil (Suiza).

Para evitar este tipo de inestabilidad se han establecido diferentes modelos de simulación a partir de trabajos previos sobre la vía distribuidora híbrida [6], de la topología del sistema CHP y de diversas mediciones. Algunos modelos se basan en el dominio temporal, y se utilizan para poder comprender y estudiar la totalidad del sistema, así como los diferentes interfaces existentes entre ellos. En 10 se muestran los posibles problemas que podrían presentarse. Ni qué decir tiene que la ABB MT100 debe ser capaz de solventarlos todos sin causar daños, ni a si misma ni a ningún otro equipamiento externo al sistema de microturbina.

Otros modelos están basados en el dominio de la frecuencia [8], que permite realizar un análisis más directo e identificar posibles zonas de inestabilidad en el sistema, principalmente en dirección a la red. Este trabajo está basado en experiencias con sistemas ferroviarios, en los que hace unos años se produjo una parada debido a dichas inestabilidades [9]. Tales modelos se definen generando el espectro de frecuencias de cada componente del sistema, como por ejemplo el inversor o un tipo particular de topología de red. Las inestabilidades del sistema pueden ser localizadas rápidamente combinando y analizando dichos espectros. Este análisis permite diseñar los componentes, principalmente los controladores, de tal forma que quede asegurada la interoperabilidad estable de todo el sistema y de los sistemas contiguos.

Concepto de mantenimiento

Una propiedad importante de la unidad ABB MT100 es que precisa muy poco mantenimiento. El mantenimiento preventivo, es decir, planificado, consta de inspecciones y des-

Tabla 2: Intervalos de mantenimiento

Tipo	*Intervalo (h)*	*Interrupció n del servicio (h)*
Inspección	6.000	24
Desmontaje	30.000	48

Tabla 3: Mantenimiento

Inspección	*Desmontaje*
Revisiones generales	Procedimiento idéntico al indicado para la inspección
Inspección de la cámara de combustión y sustitución del inyector del combustible	Susticuón de toda la cámara de combistión
Sustitución des consumibles, rellenado de aceite y agua (si es necesario)	Reacondicionamiento del motor
Revisión visual general	Rodamientos nuevos para la bomba de aceite lubricante, el ventilador y la bomba de aire retardadora
Inspección del compresor de gas combustible, rellenado de aceite y cambio del filtro de aceite	
Nuevos filtros de aire	
Limpieza del aspirador de agua de refrigeración	
Nuevo filtro de aceite de lubricación	

montajes (ver *Tabla 2*). Dado el pequeño número de piezas móviles, el mantenimiento puede limitarse al trabajo descrito en la *Tabla 3*

Perspectivas

Los recursos de energía distribuida cuentan con un mercado potencial amplio y repleto de desafíos. El éxito en este mercado pasa por poseer una unidad estándar que sea asequible, fiable y favorable al medio ambiente, requisitos que cumple la microturbina ABB MT100 gracias a los subsistemas derivados de la avanzada tecnología ABB. Combinada con la funcionalidad propia de las tecnologías de la información, que proporcionan un funcionamiento seguro y exento de supervisión, la microturbina ABB MT100 señala el camino hacia una nueva era en la generación de energía distribuida.

Autores

Dr. Anders Malmquist
ABB Motors AB
SE-721 70 Västerås/Suecia
anders.malmquist@se.abb.com

Ola Aglén
ABB Motors AB
SE-721 70 Västerås/Suecia
ola.jw.aglen@se.abb.com

Edgar Keller
ABB Industrie AG
CH-5300 Turgi
Suiza
edgar.v.keller@ch.abb.com

Marco Suter
ABB Corporate Research Ltd
CH 5405 Baden-Dättwil
Suiza
marco.suter@ch.abb.com

Jari Wickström
ABB Distributed Power
Thurgauerstrasse 54
CH 8050 Zúrich
Suiza
jari.wickstroem@ch.abb.com

Bibliografía

[1] **P. Chudi**, **A. Malmquist**: Accionamiento híbrido poara automóviles. Revista ABB 9/93, 3-12.
[2] **G. Lagerström**, **A. Malmquist**: Advanced hybrid propulsion system for Volvo ECT. Volvo Technology Report no 2, 1995.
[3] D10365 v1 - Technical Information, Turbec AB 2000.
[4] **D.K. Mukherjee**: Estado de la técnica de turbinas a gas. Revista ABB 2/97, 4-14.
[5] **P. Chudi**, **A. Malmquist**: Development of a small gas turbine driven high speed permanent magnet generator. Licentiate thesis, The Royal Institute of Technology. KTH 1989.
[6] **A. Malmquist**: Analysis of a gas turbine driven hybrid drive train for heavy vehicles. Ph.D. thesis, The Royal Institute of Technology. KTH 1999.
[7] **M. Suter**: Do it yourself. Akzent, ABB Switzerland, no 2/2000.
[8] **E. Moellerstedt**, **B. Bernhardsson**: Out of control because of harmonics: an analysis of the harmonics response of an inverter locomotive. IEEE Control Systems Magazine, August 2000.
[9] **M. Meyer**, **J. Schöning**: Netzstabilität in grossen Bahnnetzen, Eisenbahn-Revue, July-August 1999.