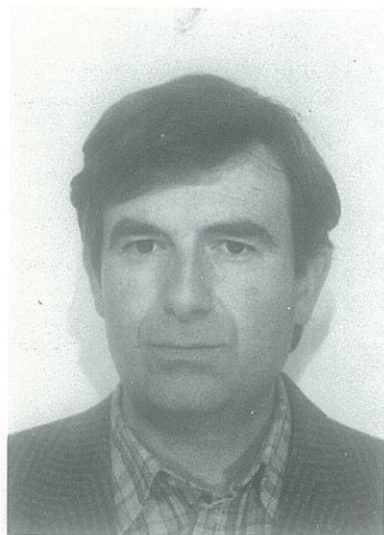


SISTEMA ELECTRICO

El aumento de potencia, y al mismo tiempo fiabilidad, en los sistemas de generación eléctricos ha puesto de manifiesto en los constructores de maquinaria electromecánica su voluntad de proporcionar soluciones técnicas adecuadas para proporcionar equipos que responden a los imperativos de demanda actuales.



José María ALBISU es Ingeniero Industrial por la ETSII de Bilbao. En 1970 ingresa en Westinghouse, S. A. como Ingeniero de Diseño en Grandes Máquinas Rotativas. Trabajó en diseño electromecánico de grandes generadores (USA 70-71) y fue responsable de diseño eléctrico y mecánico de grupos en varias centrales hidráulicas. Fue coordinador del proyecto de los grupos generadores de Almaraz, Lemóniz y Ascó, para ser nombrado (1974) Jefe de Ingeniería de la División Grandes Máquinas Rotativas en Erandio. Es miembro de ASINEL, CIGRE y Comité Científico de Electrotecnia de Labein. Ha recibido formación específica sobre informática y CAD/CAM en USA, impartiendo posteriormente seminarios dentro de la Sociedad. Desde enero de 1985 es Jefe de División de Equipos y Sistemas Electrónicos en Valladolid.

DESARROLLO DE LA POTENCIA Y TAMAÑO DE LOS TURBOGENERADORES EN EL MERCADO MUNDIAL

J. M. ALBISU e I. BALLANO

La potencia que se puede extraer de un generador eléctrico se expresa por la siguiente fórmula:

$$P = C \cdot E \cdot M \cdot D^2 \cdot L \cdot f/p$$

siendo:

- C = una constante.
- E = la densidad de carga eléctrica. (Amperios - conductores/cm. de la circunferencia).
- M = la densidad de flujo en el entrehierro.
- D = diámetro interior del paquete magnético.
- L = la longitud del paquete magnético.
- f = la frecuencia.

y

p = el número de polos.

esto es, la potencia P es función de la carga eléctrica E, la carga magnética M y el volumen de material activo D^2L , para el número de polos y frecuencia constantes. Expresado de otra manera diríamos que, definidas las dimensiones físicas de un generador, el incremento de potencia tiene que corresponder a un incremento del producto de la carga eléctrica por la carga magnética. Lo anterior es sólo aproximadamente exacto, pues no tiene en cuenta el valor de la relación de cortocircuito. Normalmente, cuanto más baja es ésta, mayor puede

ser la carga eléctrica. Sin embargo, para entender el fenómeno de la evolución de potencia unitaria de los grupos turbogeneradores, la fórmula enunciada es completamente válida.

La figura 1 muestra la evolución del valor de potencia máxima adjudicada en cada año a escala mundial en los últimos sesenta años. Puede apreciarse el enorme crecimiento experimentado hasta los años setenta con una posterior estabilización debida a criterios tendentes a evitar potencias unitarias excesivas.

Es importante detenernos, aunque sea someramente, sobre estos datos; así constatamos que la potencia unitaria se duplica durante la decena de los años cincuenta, casi se triplica en los años sesenta y alcanza valores superiores al millón y medio de Kvas. en los primeros años setenta.

Esta evolución vertiginosa es el reflejo del deseo de los fabricantes de proporcionar máquinas de acuerdo con las necesidades de expansión de los sistemas eléctricos, y está, evidentemente, basada en desarrollos importantes que han permitido variar, acrecentándolos, los parámetros de la fórmula anteriormente presentada. Incluidos entre estos desarrollos, debemos indicar los siguientes:

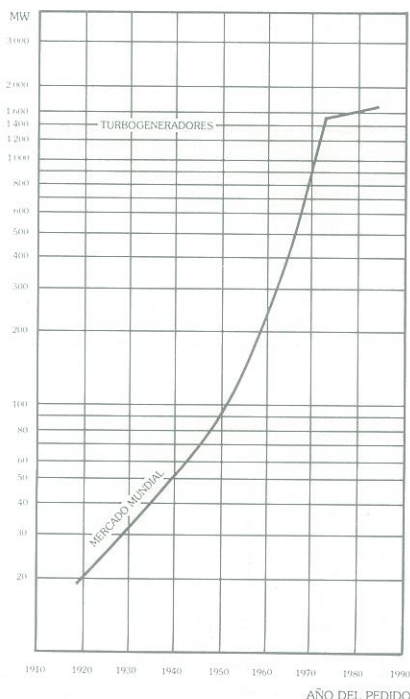
Aceros aleados de altas características mecánicas

Aunque las propiedades magnéticas de estos aceros no han variado sustancialmente, sin embargo, debido a la posibilidad de poder incrementar el diámetro del rotor, se consigue un mayor espacio para cobre y para los dientes y, consecuentemente, una mayor densidad de flujo en el entrehierro. Además, técnicas analíticas muy avanzadas han permitido incrementar los factores de utilización de los rotores, aumentando a la vez su seguridad.

Procedimientos de aislamiento mejorados

Las ventajas que se obtienen de los modernos sistemas, uno de los cuales es el Thermalastic, desarrollado por nuestra compañía hace más de 25 años, son consecuencia, principalmente, de la naturaleza de la resina empleada y del propio proceso de impregnación al vacío, que produce un alto grado de relleno. Las excelentes propiedades eléctricas de la resina unidas a las técnicas de impregnación y de consolidación del muro aislante dan unos resultados satisfactorios con un valor de factor de potencia del aislamiento muy bajo y un incremento notable en la rigidez dieléctrica.

FI



El carácter termoestable de la resina proporciona un aglomerante sólido y elástico entre los diversos componentes de mica.

Sistema de transposición de los conductores del estator

Este sistema, mediante el cual las pletinas de cada bobina van recorriendo diversas posiciones dentro de la propia bobina, permite minimizar las pérdidas globales del cobre repartiéndolas en todo su volumen, resultando, así, temperaturas más uniformes en la bobina y, consecuentemente, un mejor aprovechamiento que posibilita el incremento de la carga eléctrica.

Chapa magnética de bajas pérdidas que, unida a la utilización de aislamientos de la chapa a base de compuestos no orgánicos, producen segmentos con alta garantía de aislamiento y paquetes magnéticos de mejorado coeficiente de apilado y sólida compacidad

Montaje flexible del paquete magnético

Esta característica ha permitido reducir a niveles mínimos el efecto que ocasiona sobre la fundación la vibración de doble frecuencia inducida por el empuje magnético del rotor sobre los paquetes magnéticos.

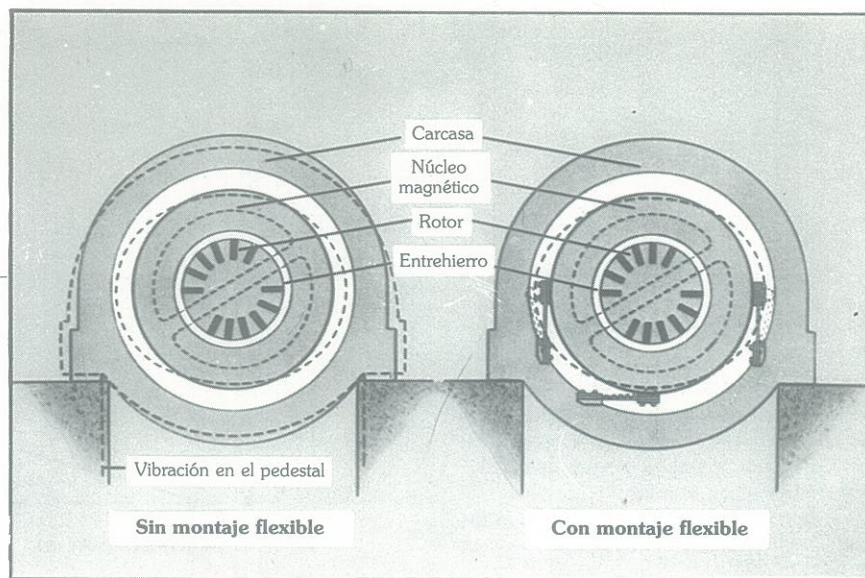
La figura 2 muestra un sistema de montaje flexible típico, donde se representan esquemáticamente en uno de los casos las láminas elásticas que absorben los desplazamientos del paquete magnético.

Sistema de excitación sin escobillas

El incremento de tamaño eléctrico ha ido asociado con incrementos muy notables de las potencias de excitación de los generadores. Actualmente, los grandes grupos exigen valores superiores a los 10.000 Amps. de excitación. Las excitatrices rotativas con diodos rectificadores proporcionan esta intensidad directamente al bobinado del rotor, evitando la utilización de anillos rotativos y escobillas.

Los principales elementos de este equipo se reflejan esquemáticamente en la figura 3 y son:

- Generador de imanes permanentes,
- alternador «inverso», esto es, bobinado de excitación fijo, e inducido rotativo,
- y rueda rectificadora.



F II MONTAJE FLEXIBLE DEL NÚCLEO MAGNÉTICO

Características

1. La construcción de la carcasa y del núcleo magnético se diseña para hacer mínimos los efectos de la vibración de doble frecuencia.
2. El núcleo magnético se aísla de la carcasa mediante un montaje a base de placas flexibles.
3. Las placas flexibles permiten al núcleo moverse en dirección radial con considerable libertad, pero lo soportan rigidamente en la dirección de los pares.

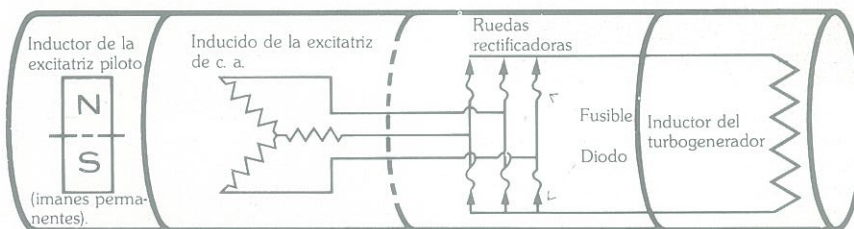
F III SISTEMA DE EXCITACION SIN ESCOBILLAS

Características

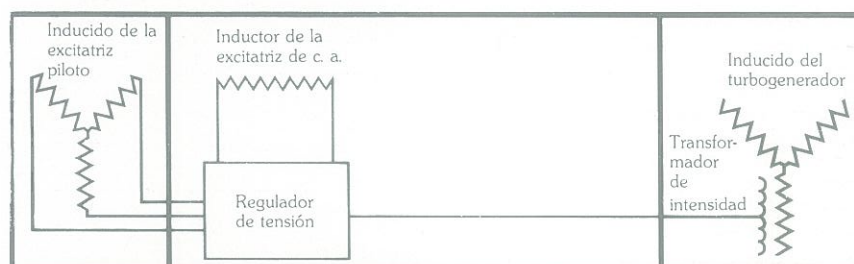
La excitatriz rotativa incluye los siguientes componentes montados sobre el mismo eje:

1. Excitatriz piloto de imanes permanentes. Este generador de alta frecuencia suministra energía al regulador de tensión que controla el inductor estacionario de la excitatriz de corriente alterna.
2. Excitatriz de corriente alterna. La corriente de salida del inducido rotativo de esta excitatriz se conecta a diodos de silicio montados en ruedas solidarias con el eje.
3. Ruedas de diodos y fusibles. Cada rueda sirve de soporte para el montaje de ambos elementos, diodos y fusibles. La corriente de salida de la excitatriz de corriente alterna se rectifica en los diodos, y la corriente continua resultante se transporta hasta el inductor rotativo del generador principal por medio de conexiones situadas en el interior del eje.
4. El sistema queda protegido contra fallos de los diodos mediante fusibles montados en serie con ellos. Estos fusibles llevan incorporados dispositivos indicadores que pueden ser inspeccionados con la máquina en servicio, permitiendo prever la sustitución de los fusibles dañados durante las paradas programadas para mantenimiento.
5. Conexiones internas. Los componentes rotativos están conectados rigidamente entre sí. No se requieren conexiones externas entre la excitatriz y el bobinado inductor del generador. La única conexión externa que existe en el sistema es la establecida entre el inducido de la excitatriz piloto y el inductor de la excitatriz de corriente alterna, a través del regulador de tensión.

Componentes giratorios



Componentes estacionarios



Equipo automático de regulación de tensión

Están contruidos a base de componentes probados y de alta calidad que se aplican bajo criterios conservadores para asegurar los altos niveles de fiabilidad que exige su aplicación.

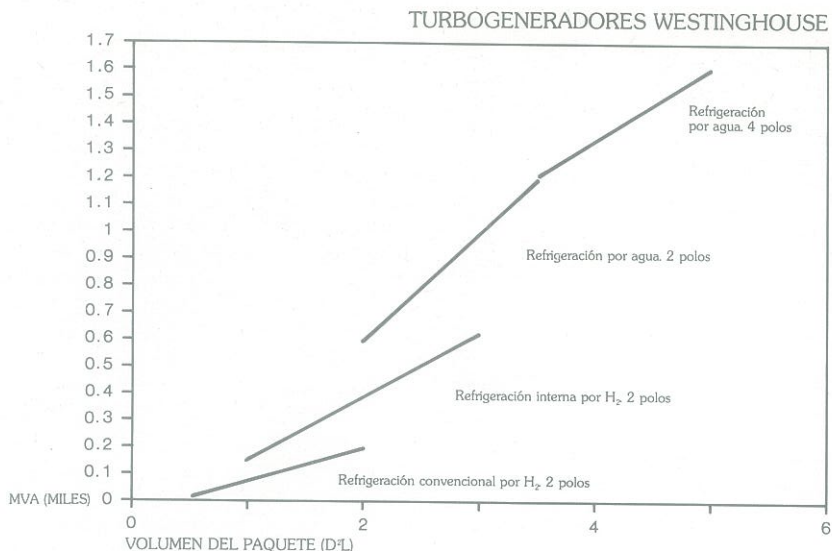
Cada uno de estos desarrollos ha contribuido de una manera esencial al crecimiento conjunto de la capacidad eléctrica de los turbogeneradores. Sin embargo, y recordando la fórmula inicial, ha sido preciso incrementar considerablemente las densidades de carga eléctrica y magnética dado que las dimensiones y el peso se sitúan como factores límites, una vez alcanzados unos ciertos valores. Por eso la columna vertebral del desarrollo ha sido la atención prestada a la mejora de los métodos de ventilación.

Dada la vital importancia del avance en los sistemas de ventilación, a continuación se hace una descripción de su desarrollo a lo largo del tiempo hasta alcanzar los criterios actuales de selección en relación con la gama de potencias dentro de la línea de producto Westinghouse.

DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE VENTILACION

De unos años a esta parte, la importancia dada anteriormente al factor de escala en el desarrollo de turbogeneradores ha pasado a un segundo plano en aras de una mejora de la fiabilidad y disponibilidad. Bajo estas circunstancias, es necesario estandarizar y consolidar una línea de producto turbogenerador. Un desarrollo adecuado del diseño de turbogeneradores requiere una tecnología sofisticada por un lado, su verificación mediante ensayos completos por otra parte, y que se aplique la disciplina de garantía de diseño para mejorar la fiabilidad y disponibilidad antes mencionadas.

La línea de turbogeneradores Westinghouse cubre una gama en dos polos, desde 160 hasta 1.200 MVA., y en cuatro polos (nuclear), desde 900 hasta 1.650 MVA. La figura 4 ilustra la distribución de estos tamaños en correspondencia con el método de refrigeración. En el gráfico, las ordenadas representan potencia en MVA.; las abscisas son el D²L (antes mencionado) del paquete es-



F IV

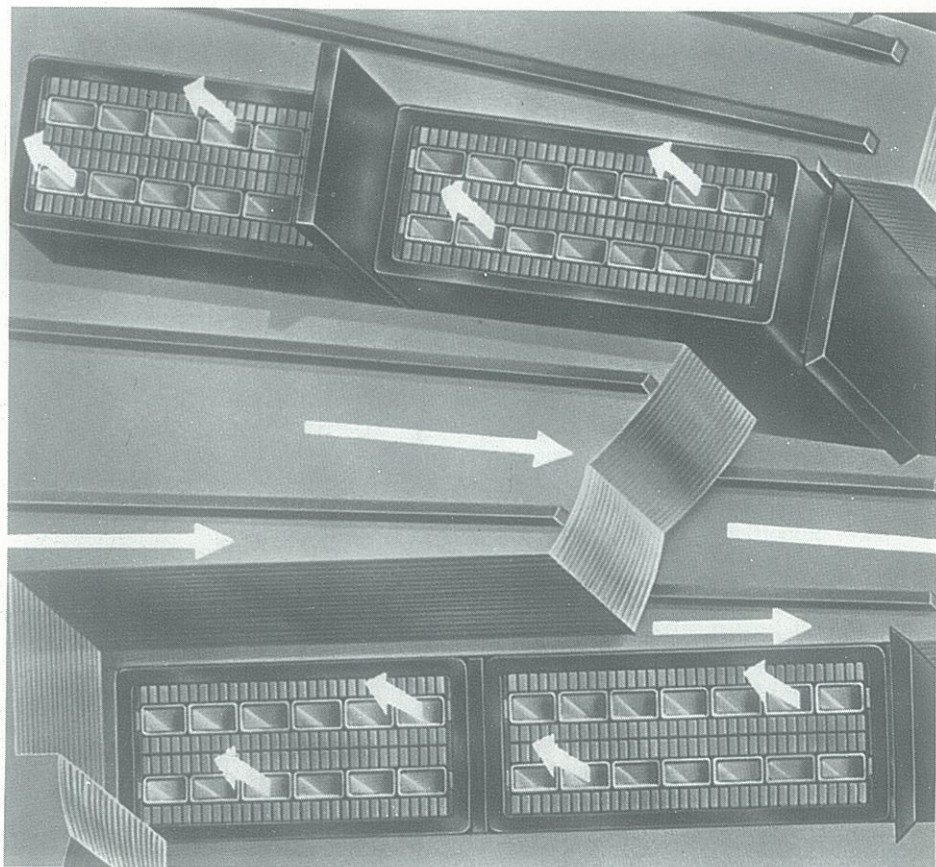
F V SECCION DE UNA BOBINA ESTATOR REFRIGERADA POR HIDROGENO

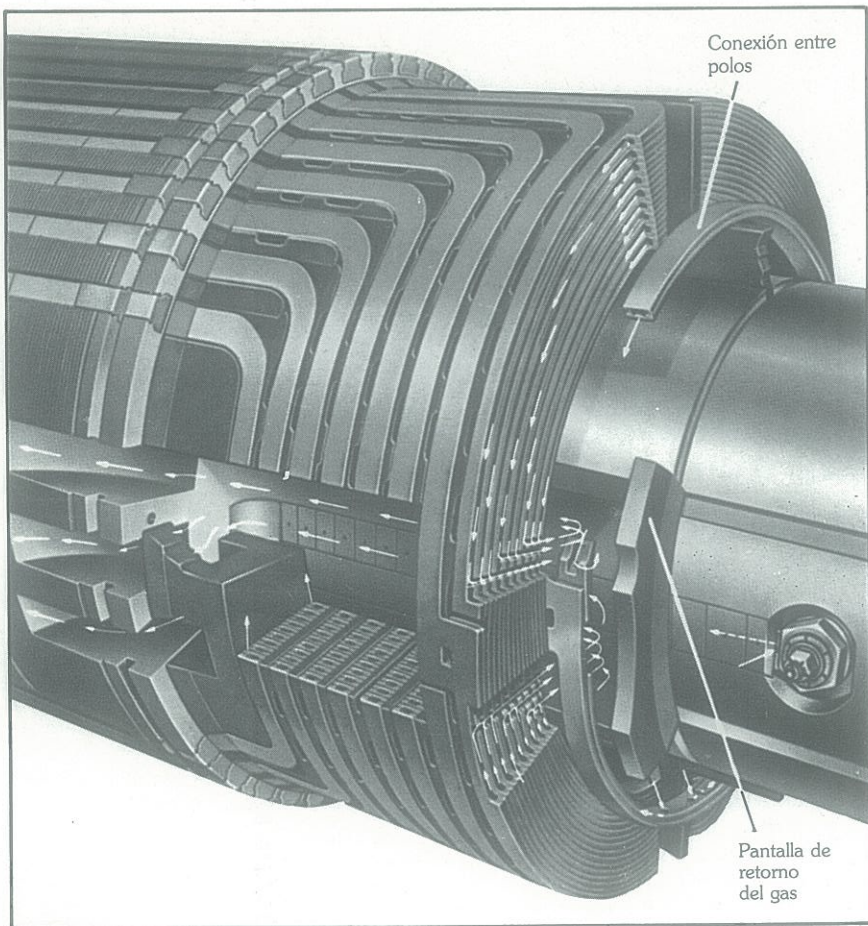
Aislamiento Thermalastic

1. La resina epoxy de impregnación rellena los más diminutos alvéolos.
2. Alta rigidez dieléctrica.
3. Aislamiento elástico con una gran resistencia mecánica.
4. Inerte frente a los agentes químicos normales, aceites y disolventes.
5. Bajo factor de potencia, poco afectado por temperatura y tensión.
6. Gran resistencia térmica y larga vida.
7. Gran resistencia a la humedad.

Supresión del efecto Corona

1. Un barniz conductor aplicado sobre la parte recta de la bobina en contacto con la ranura atenúa los esfuerzos dieléctricos dentro del muro aislante.
2. Pintura Coronox, de alta resistencia, aplicada en cabezas de bobina, escalona los esfuerzos producidos por el gradiente de tensión a lo largo de la superficie de la bobina.





F VI VENTILACION DE LOS EXTREMOS DE LAS BOBINAS DEL ROTOR

Características

1. Los conductores del rotor son huecos y se refrigeran interiormente.
2. Los bloques ajustados garantizan la estabilidad de la disposición de los extremos de las bobinas.
3. Las distancias eléctricas de fuga están establecidas con amplitud.

tator del generador. Dada una velocidad de rotor constante, una línea de pendiente constante en este gráfico corresponde a un rango de potencia del generador que se cubre simplemente cambiando el volumen activo del generador.

Los incrementos en la relación MVA/D^2L se obtienen cuando se utiliza una tecnología más sofisticada para alcanzar la potencia requerida en una máquina dada. Mayormente, esta tecnología más sofisticada está en estrecha relación con

el uso de técnicas mejoradas para la extracción de calor de los bobinados de cobre que sirven de soporte a las corrientes circulantes en el estator y rotor. Un método de refrigeración mejorado permite que puedan circular corrientes más intensas en un bobinado de tamaño dado, resultando así en un aumento de capacidad para un generador previamente existente. Las cuatro líneas separadas, mostradas en la figura 4, ilustran que la línea de turbogeneradores Westinghouse se divide en cuatro diferentes gamas, que se distinguen por técnicas de extracción de calor diferentes. Desde 100 hasta 200 MVA. se utilizan bobinados refrigerados convencionalmente, tanto en el rotor como en el estator; el gas hidrógeno sirve como medio de transferencia de calor. Desde 200 hasta 630 MVA., los bobinados estator y rotor son refrigerados por hidrógeno interiormente. Las máquinas, entre 630 y 1.200 MVA., de dos polos emplean el bobinado rotor refrigerado por hidrógeno y el estator por agua. Todas las máquinas de cuatro polos nucleares tienen rotores refrigerados por hidrógeno y estatores refrigerados por agua.

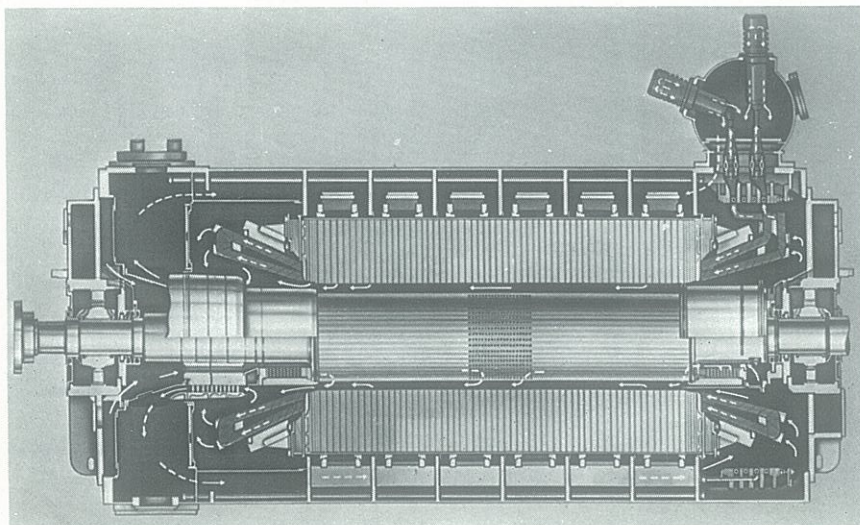
El estudio de la figura 4 revela que la tecnología avanzada de extracción de calor, utilizada en el extremo superior de la línea de dos polos, permite que se construya un generador con un 35 % del material activo necesario para fabricar un generador según la tecnología de refrigeración convencional y utilizada en el extremo inferior de la línea. Dicho de otra manera, esa diferencia significa que si se hubiese utilizado la refrigeración convencional en una máquina de 1.000 MVA., tal turbogenerador tendría 2,8 veces el tamaño de la máquina refrigerada por agua que actualmente se utiliza en esa potencia.

Una extrapolación de la figura 4, por encima de los 1.000 MVA., sería demasiado simplista. Sin embargo, todo apunta a que existen aún muchas posibilidades de reducción, en términos de costo, del generador y transportabilidad.

A continuación se describen los diferentes sistemas de refrigeración que han llevado a aumentar la potencia de las máquinas sin tener que recurrir a un aumento de sus tamaños.

F VII SECCION LONGITUDINAL

Turbogenerador de 2 polos, con refrigeración interna.



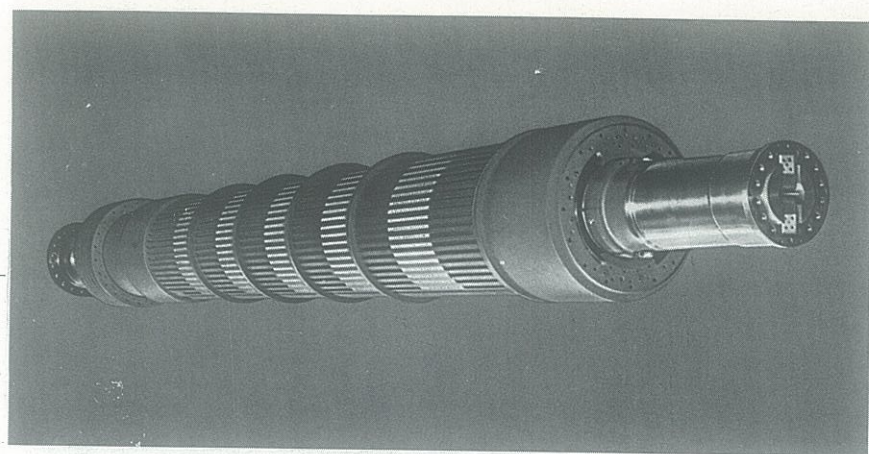
Refrigeración convencional

El nombre de refrigeración convencional viene de los métodos de extracción de calor que fueron corrientes en la industria de maquinaria eléctrica durante el primer medio siglo de su existencia. Los bobinados refrigerados convencionalmente están encapsulados completamente en aislamiento eléctrico. El medio refrigerante, aire en las máquinas iniciales, es circulado a través de canales en el acero del estator y rotor. El calor generado por la circulación de corriente en los bobinados debe transferirse por conducción térmica a través del aislamiento eléctrico y del hierro circundante hasta el medio refrigerante.

Ya en 1920 se había tomado en consideración la utilización de gases diferentes que el aire, como refrigerantes para máquinas rotativas. Se consideraron el hidrógeno y el helio debido a sus buenas propiedades de conducción de calor, sus bajas densidades comparadas con el aire y a causa de que no mantienen la combustión. Finalmente se eligió el hidrógeno, ya que es bajo en costo, está ampliamente disponible y es un mejor refrigerante. En un margen de pureza del 95 al 99 %, que es como se mantiene normalmente en turbogeneradores refrigerados por hidrógeno, el gas es inerte, no explosivo y no mantiene la combustión. En 1935 la refrigeración por hidrógeno se había adoptado mayoritariamente en los turbogeneradores. La aplicación de hidrógeno como refrigerante requirió el uso de un anillo de cierre flotante con aceite a presión para evitar las fugas de gas allí donde el eje atraviesa la carcasa estanca. También se necesitó de un equipo de control de hidrógeno para mantener la presión y la pureza de gas en la máquina.

Inicialmente, la presión de hidrógeno se mantuvo a 0,5 PSIG, suficiente para asegurar que cualquier fuga sería hacia el exterior. La potencia obtenida por el generador se aumentó aproximadamente en un 20 % sobre la obtenida por aire. Ya que el refrigerante es más efectivo con una densidad más elevada, en los siguientes años la presión fue elevada a 15 PSIG, obteniendo un 15 % adicional de incremento de potencia. En 1948 las máquinas se diseñaban para funcionar a 30 PSIG, obteniendo una capacidad de un 25 % mayor que la de 0,5 PSIG. Sin embargo, se comprobó que un aumento adicional en la presión de hidrógeno con este sistema no compensaba las mayores pérdidas en ventilación así generadas.

Los aumentos adicionales de potencia se obtuvieron inicialmente por medio de un aumento progresivo en el tamaño del rotor, mediante mejoras en los materiales forjados, y gracias a una mayor capacidad de conducción de corriente debida a esquemas de ventilación mejorados. El aumento en la potencia tiene el siguiente camino: primero, es introducido un cambio cualitativo en el refrigerante para permitir una potencia más elevada en respuesta a la demanda del mercado. Sigue un desarrollo en el material, permitiendo nuevas combinaciones de tamaño de máquina y esquema de refrigeración, ampliando la capacidad hasta un nuevo límite superior. Una vez que se introduce un método de refrigeración más avanzado, el proceso se repite.



F VIII ROTOR DE TURBOGENERADOR

Rotor de turbogenerador de 3.000 rpm. De gran capacidad debido a su sistema de ventilación zonada.

Refrigeración interna

En 1938 se construyó un compensador síncrono de 25.000 KVAS., 3.600 rpm., refrigerado por hidrógeno, utilizando «ventilación a los lados» para las bobinas del rotor. Este diseño puso el gas refrigerante en contacto con los conductores del rotor. El bobinado rotor, ventilado de tal manera, ha funcionado con éxito desde entonces. Posteriormente se desarrollaron diseños más efectivos, que permitieron que el refrigerante circulara a través del conductor consiguiéndose un incremento adicional en la capacidad de conducción de corriente con presiones de gas mayores. En 1950 la práctica usual en la fabricación de turbogeneradores de 1.000 MW. consistía en la refrigeración directa de los bobinados estator y rotor, tal como se muestra en las figuras 5 y 6. Este tipo de construcción es la que se ha llamado desde entonces «refrigeración interna».

La presión para circular el gas refrigerante se proporciona mediante un ventilador de flujo axial, de tipo compresor con varias etapas, montado generalmente en el lado turbina del rotor próximo al anillo de retención. De esta manera, siempre que el eje esté girando a la velocidad nominal se tendrá disponible la capacidad total de ventilación. Otro aspecto es el cierre de aceite de doble flujo en cada extremo del generador. Estos son los únicos cierres dinámicos requeridos para separar el refrigerante del aire con el propósito de mantener la pureza del hidrógeno.

Las bobinas estator de los generadores refrigerados internamente se aíslan con aislamiento Thermalastic y se fabrican de forma parecida a las bobinas de los generadores refrigerados convencionalmente, exceptuando la fila de tubos de ventilación localizada entre las dos columnas de pletinas. Existe una abertura en cada extremo de la bobina estator para la entrada y salida del gas refrigerante que circula a través de estos tubos de metal. Todas las bobinas estator refrigeradas por gas tienen detectores de

temperatura localizados en la descarga de gas. Estos detectores proporcionan una medida de la elevación de temperatura interior de cada bobina y pueden ser utilizados para detectar un cambio en el modelo de elevación de temperatura durante el servicio, que puede ser indicativo de un deterioro interno.

La figura 7 muestra un turbogenerador refrigerado internamente por hidrógeno a 60 PSIG.

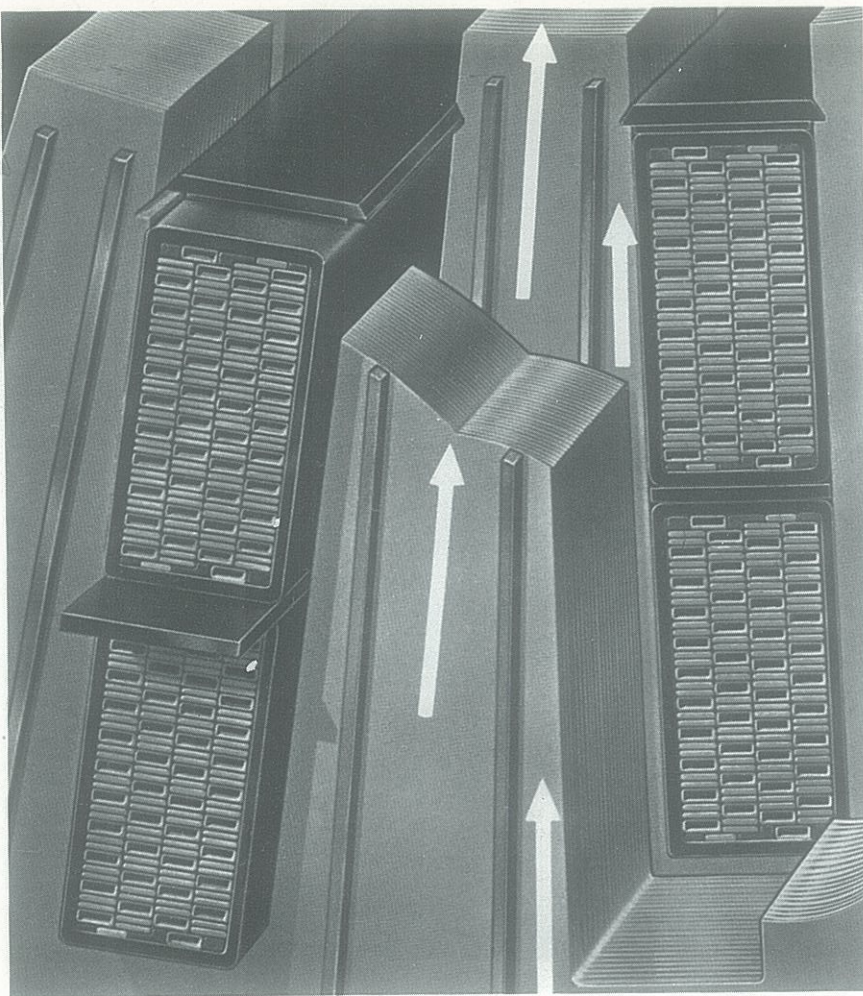
El rotor del generador ha recibido una atención preferente de cara a un aumento de su capacidad. Se consigue una refrigeración muy efectiva del rotor dividiéndolo en zonas, de forma que la presión completa del ventilador pueda ser aplicada a través de cada zona, el sistema de ventilación paralela resultante permite que la ventilación efectiva del rotor sea independiente de la longitud del generador y permite que el número de etapas del ventilador sea minimizado (figura 8).

Refrigeración por agua

A partir de un cierto nivel, el rendimiento de la máquina refrigerada por hidrógeno no aumenta significativamente, por lo que para conseguir rendimientos por encima del 98,5 % se necesita un medio refrigerante más efectivo, tal como el agua.

En una bobina estator refrigerado por agua, el agua desmineralizada se circula a través de pletinas huecas de cobre que alcanzan alrededor de la mitad del área transversal del conductor. El resto de los conductores son pletinas sólidas (figura 9). Unas mangueras aislantes conectan los lados de la bobina a unos colectores de entrada y descarga de agua en los extremos del generador. Se incluyen unos termopares para supervisar la elevación de la temperatura del agua a través de las bobinas de estator para detectar cambios en el modelo de temperaturas durante el servicio.

La figura 10 muestra un generador refrigerado por agua.



F IX SECCION DE UNA BOBINA ESTATOR REFRIGERADA POR AGUA

Aislamiento Thermalastic

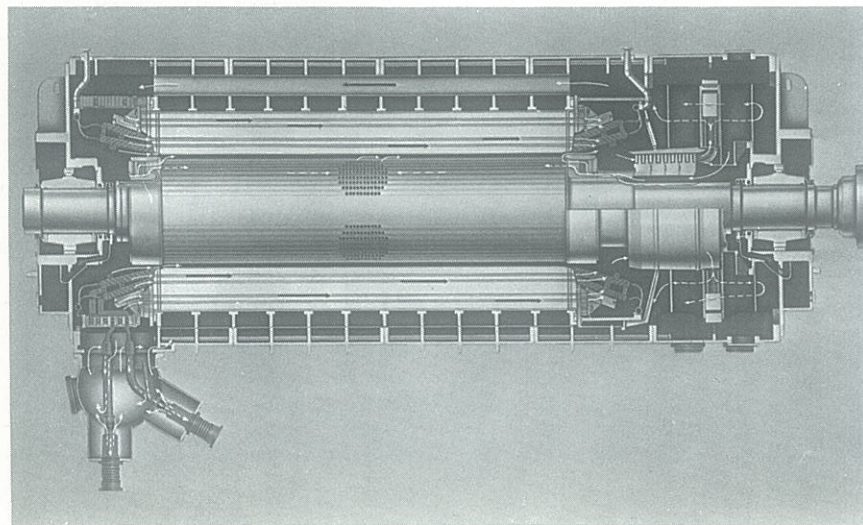
1. La resina epoxy de impregnación rellena los más diminutos alvéolos.
2. Alta rigidez dieléctrica.
3. Aislamiento elástico con una gran resistencia mecánica.
4. Inerte frente a los agentes químicos normales, aceites y disolventes.
5. Bajo factor de potencia, poco afectado por temperatura y tensión.
6. Gran resistencia térmica y larga vida.
7. Gran resistencia a la humedad.

Supresión del efecto Corona

1. Un barniz conductor aplicado sobre la parte recta de la bobina en contacto con la ranura atenúa los esfuerzos dieléctricos dentro del muro aislante.
2. Pintura Coronox, de alta resistencia, aplicada en cabezas de bobina, escalona los esfuerzos producidos por el gradiente de tensión a lo largo de la superficie de la bobina.

F X SECCION LONGITUDINAL

Turbogenerador de 4 polos, con las bobinas del estator refrigeradas con agua.
Construcción mediante carcasa interior y exterior.



Además de la mejora en la carga de corrientes, más altas en el cobre, las técnicas de refrigeración avanzadas también han hecho posible la elevación de las densidades de flujo magnético en el entrehierro. Tal aumento permite el pasar a tensiones más altas con un mínimo de longitud y conductores extra, ayudando así a minimizar el tamaño. Aunque los aumentos sustanciales en la potencia están acompañados de una tendencia a aumentar la reactancia transitoria, la aplicación simultánea de densidades de flujo en el entrehierro más altas minimiza estos aumentos, mejorando así la estabilidad del generador dentro del sistema.

Desde las máquinas convencionales de 70 MVA. en los años cuarenta hasta las máquinas actuales, las densidades de entrehierro han aumentado hasta un 40 ó 50 % por encima de los niveles originales. Ya que la saturación en el hierro y las tensiones mecánicas deben mantenerse dentro de unos límites, el ranurado en el rotor y en el estator tienen un espacio limitado para dejar suficiente sección transversal de hierro. Los esquemas de refrigeración, mejorados tanto en el rotor como en el estator, que resultaron en una refrigeración directa del cobre con refrigerantes de alta intensidad ha permitido el uso de las ranuras más pequeñas posibles, dejando un máximo de hierro para la saturación magnética y características mecánicas, ofreciendo a la vez la posibilidad de aplicar intensidades de entrehierro más altas.

CONCLUSIONES

Hoy en día, las expectativas puestas en los turbogeneradores como equipo de generación han pasado de ser la búsqueda de incrementos de capacidad unitaria a una exigencia de alta fiabilidad y disponibilidad. Otros puntos importantes son su alto rendimiento y una mejora en la estabilidad del sistema.

La obtención de estos propósitos ha ido cumpliéndose mediante un desarrollo tecnológico, consolidado a lo largo de los años, a través de la mejora de técnicas e instalaciones de ensayo cada vez más completas, dirigidas a la verificación de los diseños conseguidos. Una gran ayuda ha sido la utilización de unos programas de garantía de diseño sistemáticos. El conjunto de factores mencionados ha llevado a la consecución de máquinas de un elevado nivel tecnológico y de calidad contrastada.