ABB review

2|14 es

100 años de *ABB Review* 7
40 años de robótica 24
60 años de HVDC 33
En las fronteras del conocimiento 68

La revista técnica corporativa

Un siglo de *ABB review*

Power and productivity for a better world™

Estimado lector:
La innovación tecnológica ha sido la piedra angular del éxito de ABB desde la fundación de nuestras empresas matrices a finales del siglo XIX.

Hoy invertimos 1.500 millones de dólares el año en I+D y tenemos 8.500 técnicos dedicados a la innovación en electricidad y automatización repartidos por todo el mundo.

Durante 100 años, *ABB Review* ha mantenido a accionistas, clientes y empleados informados sobre nuestras soluciones innovadoras en estos campos.

Como ABB, *ABB Review* está continuamente innovando el contenido y el diseño.

La próxima etapa de *ABB Review* será reforzar su presencia en internet para aprovechar las oportunidades y demandas del mundo digital mediante, por ejemplo, una comunicación más interactiva.

Estamos orgullosos de compartir con usted el número de nuestro centenario.

Ulrich Spiesshofer
Primer Ejecutivo
Grupo ABB

Celebración del centenario

7 **100 años de *ABB Review***
Recuerdos de un siglo en prensa

21 **Los directores eligen**
Tesoros de los archivos

Eternos pioneros

24 **El amanecer del robot**
ABB celebra cuarenta años de robótica industrial

33 **60 años de HVDC**
El camino recorrido por ABB desde pionero a líder del mercado

Conocimiento y fuerza

42 **Rendimiento en el bombeo**
Un convertidor de 100 MW para la central de bombeo para reserva de energía Grimsel 2

48 **Unidad de fuerza**
El diseño vanguardista del motor redefine la densidad de potencia

54 **Polifacético**
La electrónica de potencia del ACS800 puede hacer más que girar un motor

La fuerza es conocimiento

58 **Punto caliente**
Un nuevo sensor de infrarrojos mide la temperatura de los interruptores automáticos del generador

65 **A un nivel superior**
Un SAI de nivel de media tensión para proporcionar una protección total del suministro de energía eléctrica

68 **Fronteras del conocimiento**
El conocimiento de las condiciones de contorno es crucial para unas simulaciones fiables

74 **Forzar los límites**
Simulación de turbinas para los turbocompresores de la próxima generación

100 años de *ABB Review*

Claes Rytoft

Estimado lector:

A menudo, la historia conserva la clave para entender el presente. Su estudio revela en ocasiones que ideas consideradas erróneamente como nuevas llevan entre nosotros mucho más tiempo de lo que pensábamos. Por otra parte, también nos revela con qué rapidez pueden transformar las innovaciones buena parte de la industria.

Este año de 2014 se cumplen algunos aniversarios importantes para ABB. Como probablemente ya habrá visto en la portada, *ABB Review* cumple este año su primer centenario. Lo hemos celebrado reservando una sección completa a ese primer siglo (y también hemos planeado otros actos a lo largo de 2014).

Un solo número de *ABB Review* no basta ni siquiera para arañar la superficie del enorme tesoro que guardan nuestros archivos. Pero esperamos que nuestra pequeña selección le permita hacerse una idea de la magnitud de la evolución que la revista ha testimoniado durante su prolongada historia. Por razones de espacio, en la edición impresa hemos tenido que acortar estos pocos artículos seleccionados, pero los lectores de la versión en tablet podrán disfrutarlos completos.

Los otros dos importantes aniversarios de este año corresponden a robótica y HVDC. Hace cuarenta años, en 1974, ASEA lanzó el IRB 6, el primer robot comercial del mundo controlado por microprocesador y totalmente eléctrico. Prácticamente todos los robots industriales actuales son de este tipo, y adoptan también la configuración antropomorfa del IRB 6.

Hace sesenta años, ASEA entregó el primer enlace HVDC comercial del mundo para el transporte de electricidad desde la Suecia continental hasta la isla de Gotland. La línea transportaba 20 MW a 100 kV a lo largo de 98 km. Estas cifras pueden parecer poca cosa en comparación con los proyectos HVDC posteriores, pero este enlace pionero marcó tendencias en más de un aspecto: los cables submarinos, por ejemplo, introdujeron ideas que siguen siendo válidas en la actualidad.

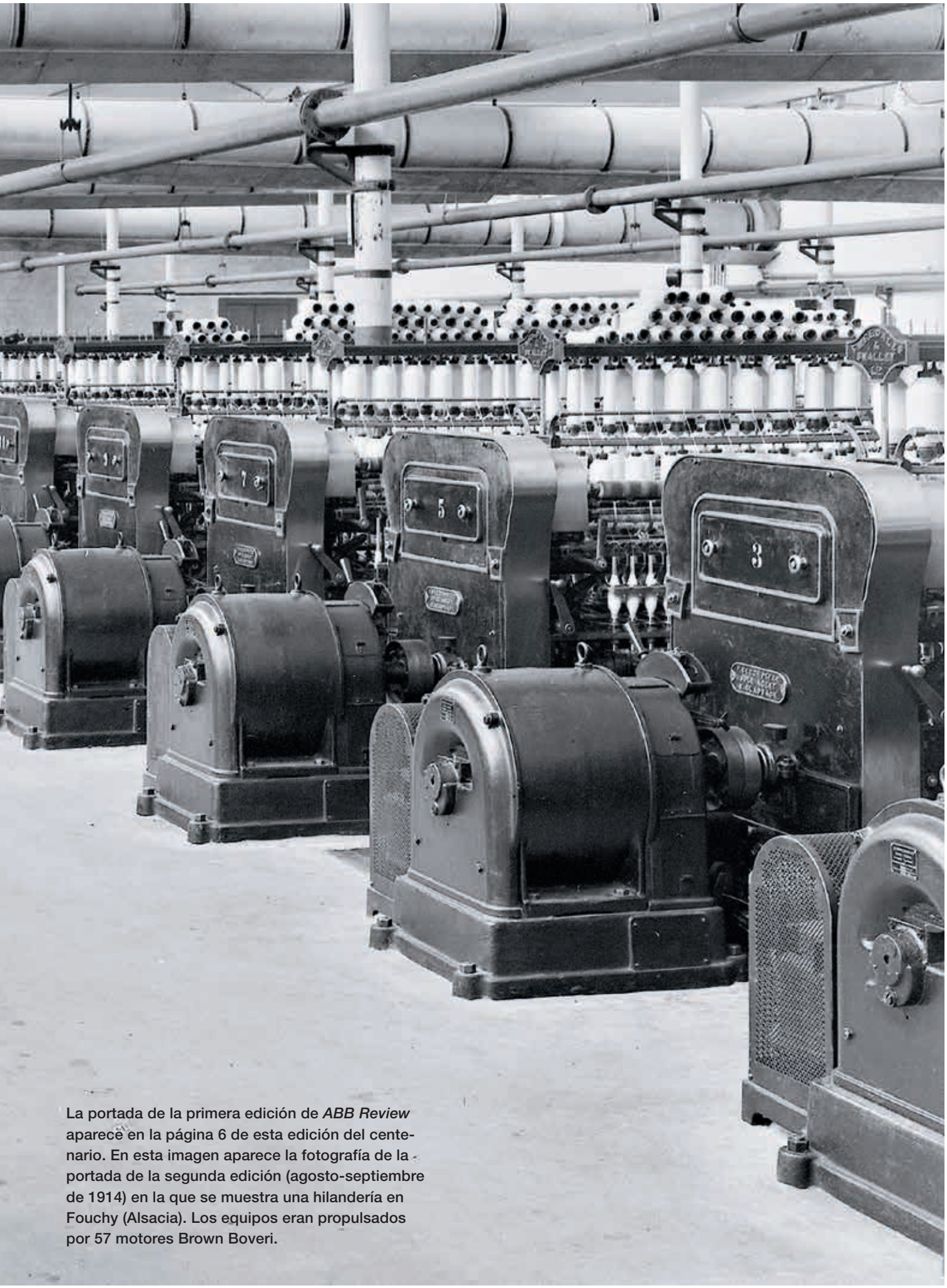
En este número se dedican artículos a estos dos aniversarios.

Otros cubren campos tan diversos como la conservación por bombeo, el diseño de motores, la electrónica de potencia, sensores, UPS y simulación.

Confío en que este número del aniversario de *ABB Review* con sus incursiones en avances pasados, presentes y futuros le inspire, como nos ha inspirado a nosotros, en el descubrimiento y el redescubrimiento de aspectos conocidos y desconocidos de ABB.

Que disfrute de la lectura.

Claes Rytoft
Consejero Delegado de Tecnología y Vicepresidente Senior del Grupo ABB

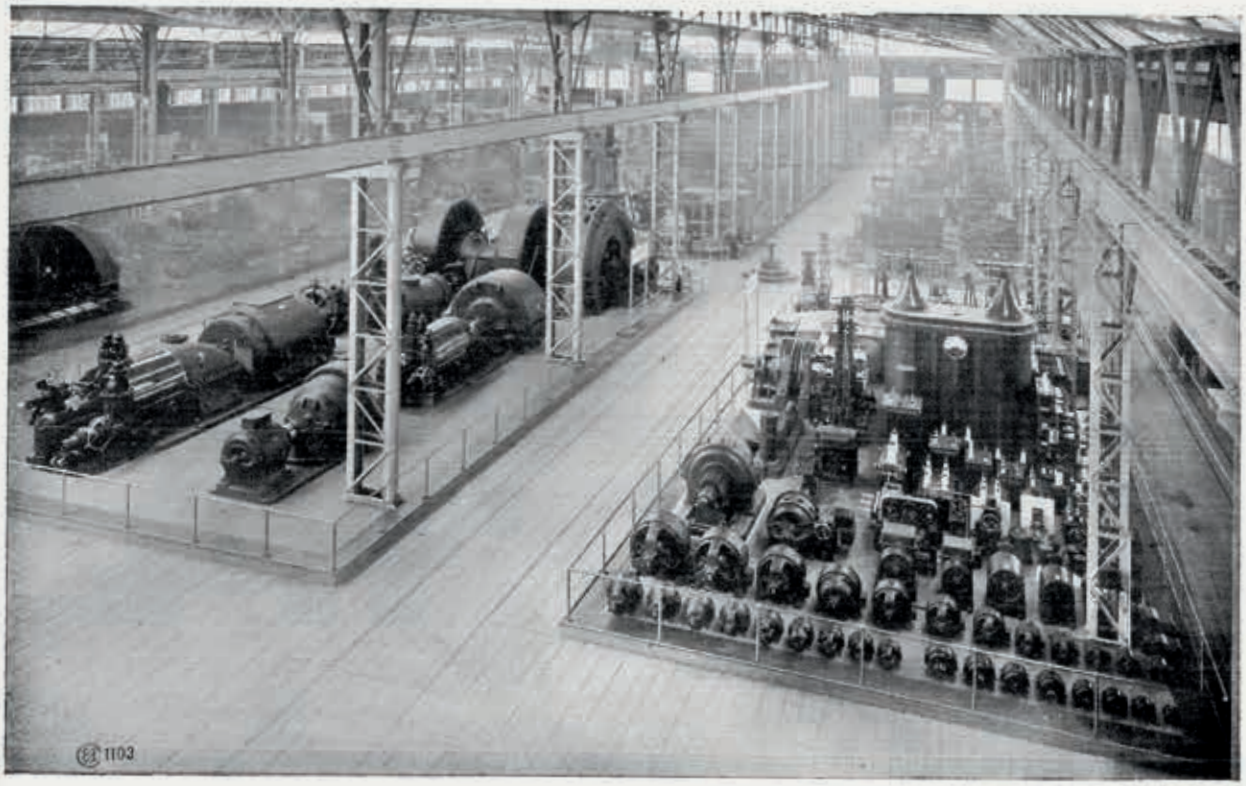


La portada de la primera edición de *ABB Review* aparece en la página 6 de esta edición del centenario. En esta imagen aparece la fotografía de la portada de la segunda edición (agosto-septiembre de 1914) en la que se muestra una hilandería en Fouchy (Alsacia). Los equipos eran propulsados por 57 motores Brown Boveri.

1ère ANNÉE. No. 1, JUILLET 1914.

REVUE BBC

Publiée par la Société Anonyme BROWN, BOVERI & Cie., à BADEN (Suisse)



Les stands BBC dans la galerie des machines de l'Exposition Nationale Suisse, à Berne.

SOMMAIRE:

page

Programme 3
La participation de BBC à l'Exposition Nationale Suisse à Berne, mai-octobre 1914 3
Emploi de commutatrices sur les réseaux à courant continu à trois conducteurs 14
Nouvelles publications de propagande 16
Nomenclature des articles les plus importants parus dans les périodiques techniques, 1er trimestre 1914 17

100 años de *ABB Review*

Un siglo de revista

ANDREAS MOGLESTUE – La historia es bastante más que un mero registro del paso del tiempo. Si bien los grandes hitos que representan los cambios políticos, las guerras y los avances innovadores pueden formar la columna vertebral de la historia, lo que infunde vida y contexto a nuestra comprensión del pasado son las pequeñas cosas que se nos transmiten: los recuerdos, fotografías, datos de la vida diaria y objetos que cuentan sus propios relatos. Y en ellos reside gran parte de la fascinación que supone la retrospectiva de los 100 años de *ABB Review*.

La revista predecesora de *ABB Review*, *BBC Review*[1], se publicó por primera vez en julio de 1914. Su objetivo inicial era informar a los agentes de ventas y a los socios comerciales de los productos, los avances y las actividades de la empresa. En años posteriores, la distribución creció hasta abarcar un público más amplio en el que se encontraban clientes y proveedores, consultores y periodistas, así como universidades, docentes, estudiantes y gente común interesada en la tecnología. Numerosos ingenieros que más tarde trabajarían en ABB empezaron a leer *ABB Review* en su época estudiantil y las proezas tecnológicas de la empresa sirvieron de inspiración en su elección de carrera universitaria. Del mismo modo, un gran número de artículos publicados con regularidad en las revistas especializadas del sector aparecieron por primera vez en *ABB Review*, y las ilustraciones y diagramas de sus páginas se incluyen en libros de texto universitarios. Parte del atractivo de la revista reside en su propósito de ser lo más objetiva posible. Aunque se expresa con claridad desde la perspectiva de ABB, *ABB Review* se esfuerza por seguir siendo objetiva e imparcial en sus afirmaciones.

En los últimos 100 años, las páginas de *ABB Review* han ofrecido un impresionante número de aportaciones en una amplia gama de temas. Algunos artículos se hacen eco de los predecesores de productos que ABB todavía sigue fabricando. Numerosas afirmaciones realizadas en estos artículos siguen siendo sorprendentemente válidas en la actualidad. Otras aportaciones reflejan avances que la empresa no siguió impulsando o que se desarrollaron de una manera diferente a la prevista.

Además de documentar este progreso, los archivos ofrecen también otras perspectivas. El estilo de la publicación se ha modificado claramente a lo largo del tiempo, no solo en cuanto al desarrollo de la tipografía, la introducción gradual de fotografías en color o las cuestiones

1914

Imagen del título
Esta imagen apareció en la portada de la primera edición de *BBC Review*. La fotografía muestra la Exposición Nacional Suiza celebrada entre mayo y octubre de 1914 de octubre en Berna (Suiza).

Nota a pie de página
1 Si bien el nombre completo de BBC era “Brown, Boveri & Company”, en la revista se suprimió la coma: *The Brown Boveri Review*.

1914 – ***ABB Review* se publica por primera vez**; El Canal de Panamá se inaugura oficialmente

1918 – Presentación de *Reader's Digest*

1921 – Las mujeres logran en Suecia el derecho igualitario al voto

1922 – Sir Frederick Grant Banting aísla la hormona de la insulina

1923 – Primera publicación de la revista TIME

de estilo o presentación, sino también en la manera en la que se presentan los artículos. En las primeras ediciones se incluían con mayor asiduidad pruebas matemáticas, esquemas de circuitos detallados y planos de construcción que en la actualidad. Por una parte, se debe a cuestiones relativas a la necesidad de proteger la propiedad intelectual, pero también al cambio de las expectativas de sus lectores y a modificaciones sutiles en el posicionamiento de la revista.

La empresa hermana de BBC, ASEA (con la que se fusionó en 1988 para formar ABB), tenía de su propia publicación, *ASEA Journal*. Era unos años más antigua que *BBC Review*, ya que se editó por primera vez en 1909. La fusión de las empresas dio también lugar a la fusión de las dos oficinas editoriales, y *ABB Review* se fundamenta en las tradiciones de ambas revistas predecesoras.

En la actualidad, *ABB Review* se distribuye en más de 120 países y se publica en cinco idiomas. Se imprimen cerca de 60.000 ejemplares de cada edición. Existe, además, una distribución electrónica creciente, en la que se utiliza el formato PDF "clásico" y versiones más avanzadas de tableta para iOS y Android. Las limitaciones de espacio obligan a que los artículos históricos presentados en las siguientes páginas se muestren de forma bastante abreviada en las versiones impresas y PDF. La versión para tableta contiene versiones más extensas de algunos de los artículos.

Andreas Moglestue
Jefe de redacción de *ABB Review*
Zúrich, Suiza
andreas.moglestue@ch.abb.com

Recuerdo de los fundadores

Charles Eugene Lancelot Brown y Walter Boveri fundaron conjuntamente BBC el 2 de octubre de 1891. Si bien ambos tenían una formación en ingeniería, Boveri se dedicó de una manera cada vez más activa a la administración y el desarrollo de la empresa, mientras que Brown continuó centrado en las cuestiones de ingeniería. Sus nombres se recuerdan actualmente en las dos letras B de ABB. Ambos fallecieron en 1924. Según el equipo editorial, sus obituarios han sido los únicos que se han publicado en las páginas de esta revista.

Los fundadores de ASEA, Ludwig Fredholm y Jonas Wenstrom, fallecieron en 1891 y 1893 respectivamente, con anterioridad al nacimiento de *ASEA Journal*.

The death of C. E. L. Brown, which took place at Montagnola near Lugano on the morning of May 2nd after a brief illness, marks the passing of a figure which had already become almost legendary in the world of electrical engineering. This is partly accounted for by the fact that Brown retired from active participation in electrical affairs thirteen years ago, but is, perhaps, to a great extent due to the attitude of a younger generation, which takes for granted the achievements of the past and, striving onwards, finds but little leisure for considering pioneer work carried out before its time. Thus, there is a tendency to forget to whose genius we owe so much of the progress which has been made in the design and construction of electrical machinery.

Charles Eugene Lancelot Brown was born at Winterthur in Switzerland on June 17th, 1863, the son of Charles Brown, an engineer well known as the originator of the bayonet-type frame and the Sulzer drop-valve steam engine. After one year's apprenticeship with M. Burgin in Basle, he was engaged in the spring of 1885, when hardly 22 years old, by the Oerlikon Engineering Works, and two years later was put in control of the electrical department. This marks the commencement of an exceptionally fruitful career.

During his first years with the Oerlikon Company, Brown devoted his energies to the development of the direct-current system, and particularly to the production of practical direct-current machines.

But a few months have elapsed since we recorded the death of the genial inventor and designer C. E. L. Brown, and now his nearest colleague and the co-founder of our firm, Walter Boveri, has followed him on the last journey. His passing away has deprived the Swiss electrical industry of its most outstanding personality, and no deeper loss could have been sustained.

W. Boveri was born in Bamberg in the year 1865, and after a course of engineering training at Nuremberg, he came to Switzerland when 20 years of age. Here he entered the Oerlikon Engineering Works, where, under the direction of C. E. L. Brown, the manufacture of electrical machinery was just being undertaken. Boveri, who subsequently took charge of their erection department, assisted throughout the development of the direct-current machine there, and in the year 1888 carried out the erection and setting into operation of the first electric power transmission scheme from Kriegstetten to Solothurn. In 1891, after a period of six years with the Oerlikon Company, he and C. E. L. Brown, with whom he was closely associated, founded the firm of Brown, Boveri & Co. at Baden.

In the early years following the foundation of the firm, Boveri devoted himself, as at Oerlikon, to the planning, installation, and putting into operation of both small and large plants. The unusually good results obtained with Brown's designs, however, soon resulted in a very rapid increase in the activity of the Baden works, and it was not long before Boveri was faced with work of a very different nature. The pro-

1924

1924

Fallecimiento de Charles E.L. Brown, cofundador de BBC

Fallecimiento de Walter Boveri, cofundador de BBC

Primeros Juegos Olímpicos de invierno

1925

John Logie Baird hace una demostración de la televisión

1928

Flying Doctor Service comienza en Australia

1931

Inauguración del Edificio Empire State en Nueva York

1935

Primer partido nocturno de la Principal Liga de Baloncesto celebrado gracias a la iluminación eléctrica

La máquina de Hollerith

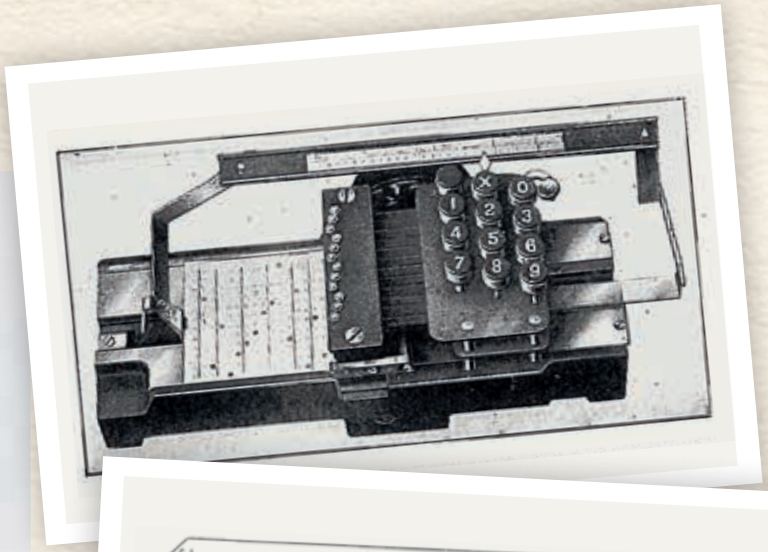
El sistema de clasificación de Hollerith permitió la recopilación automática de datos estadísticos. Los datos se almacenaban mediante perforaciones en las tarjetas, y los contadores se activaban mediante conexiones eléctricas. Las máquinas de Herman Hollerith se utilizaron en el censo estadounidense de 1890, permitiendo que el recuento se realizase en un año (en el anterior censo de 1880 se tardaron ocho años). La máquina de Hollerith se puede considerar un ordenador primerizo.

El invento de Hollerith se patentó inicialmente, pero debido a su importancia universal en la mejora de la gestión de los datos, el gobierno estadounidense eliminó esta restricción en 1910. BBC fue una de las empresas en beneficiarse.

Las tarjetas perforadas se presentaron por primera vez en el siglo XVIII y se utilizaron para “programar” telares y aparatos musicales. Más tarde, se utilizaron para almacenar datos y programar ordenadores.

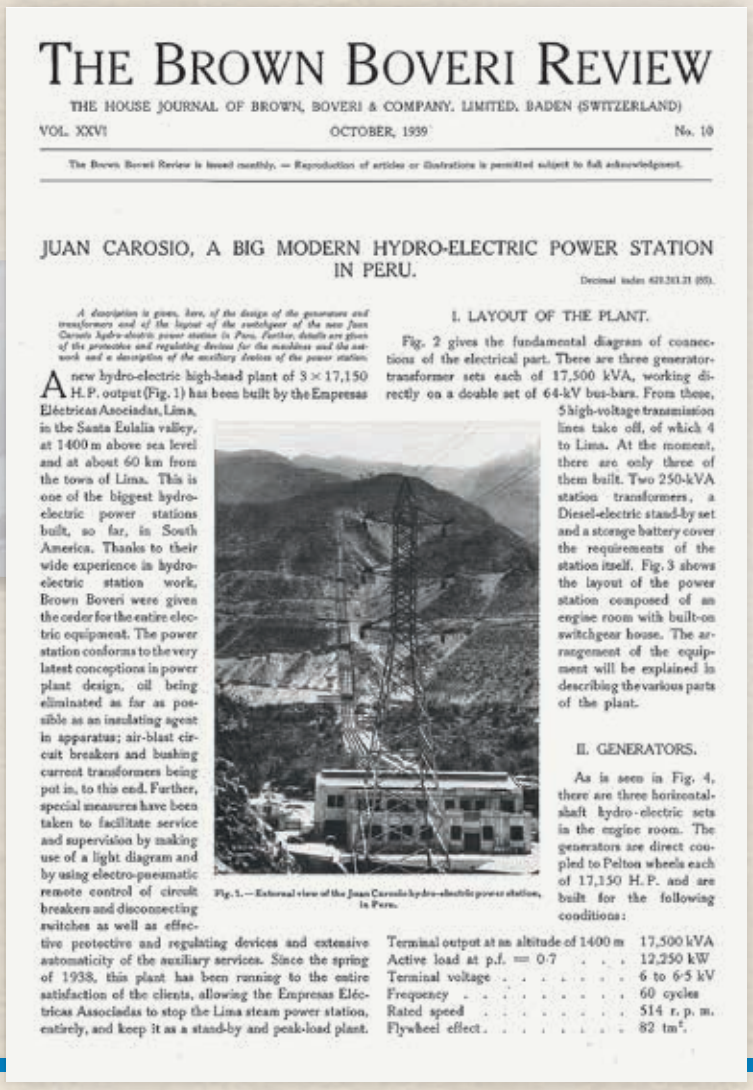
Es interesante destacar que en los DVD actuales se siguen utilizando orificios microscópicos para almacenar los datos.

The Brown Boveri Review, noviembre – diciembre de 1914



En su larga trayectoria, ABB ha equipado innumerables centrales eléctricas, de las que un gran número sigue actualmente generando electricidad. Esta central se encuentra en el valle de Santa Eulalia, en Perú.

The Brown Boveri Review, octubre de 1939



THE BROWN BOVERI REVIEW

THE HOUSE JOURNAL OF BROWN, BOVERI & COMPANY, LIMITED, BADEN (SWITZERLAND)

VOL. XXVI — OCTOBER, 1939 — No. 10

The Brown Boveri Review is issued monthly. — Reproduction of articles or illustrations is permitted subject to full acknowledgment.

JUAN CAROSIO, A BIG MODERN HYDRO-ELECTRIC POWER STATION IN PERU.

Decimal Index 621.283.21 (85).

A description is given, here, of the design of the generators and transformers and of the layout of the switchgear of the new Juan Carosio hydro-electric power station in Peru. Further, details are given of the protective and regulating devices for the machines and the network and a description of the auxiliary devices of the power station.

A new hydro-electric high-head plant of 3 × 17,150 H.P. output (Fig. 1) has been built by the Empresas Eléctricas Asociadas, Lima, in the Santa Eulalia valley, at 1400 m above sea level and at about 60 km from the town of Lima. This is one of the biggest hydro-electric power stations built, so far, in South America. Thanks to their wide experience in hydro-electric station work, Brown Boveri were given the order for the entire electric equipment. The power station conforms to the very latest conceptions in power plant design, oil being eliminated as far as possible as an insulating agent in apparatus; air-blast circuit breakers and bushing current transformers being put in, to this end. Further, special measures have been taken to facilitate service and supervision by making use of a light diagram and by using electro-pneumatic remote control of circuit breakers and disconnecting switches as well as effective protective and regulating devices and extensive automaticity of the auxiliary services. Since the spring of 1938, this plant has been running to the entire satisfaction of the clients, allowing the Empresas Eléctricas Associadas to stop the Lima steam power station, entirely, and keep it as a stand-by and peak-load plant.

Fig. 1. — External view of the Juan Carosio hydro-electric power station, in Peru.

I. LAYOUT OF THE PLANT.

Fig. 2 gives the fundamental diagram of connections of the electrical part. There are three generator-transformer sets each of 17,500 kVA, working directly on a double set of 64-kV bus-bars. From these, 5 high-voltage transmission lines take off, of which 4 to Lima. At the moment, there are only three of them built. Two 250-kVA station transformers, a Diesel-electric stand-by set and a storage battery cover the requirements of the station itself. Fig. 3 shows the layout of the power station composed of an engine room with built-on switchgear house. The arrangement of the equipment will be explained in describing the various parts of the plant.

II. GENERATORS.

As is seen in Fig. 4, there are three horizontal-shaft hydro-electric sets in the engine room. The generators are direct coupled to Pelton wheels each of 17,150 H. P. and are built for the following conditions:

Terminal output at an altitude of 1400 m	17,500 kVA
Active load at p.f. = 0·7	12,250 kW
Terminal voltage	6 to 6·5 kV
Frequency	60 cycles
Rated speed	514 r. p. m.
Flywheel effect	82 tm².

Un siglo sonando

Un trío de transformadores BBC tiene la misma antigüedad que *ABB Review*

SALLY DURRANT – Comenzaron a dar servicio antes de la invención de la tostadora, la televisión e Internet. Qantas y Canberra ni siquiera habían nacido. Y dos guerras mundiales, los Beatles, Britney Spears, Monty Python, los vuelos espaciales, la penicilina y el Velcro dejaron su huella en nuestro planeta, para bien o para mal, durante esos años.

¿Queda algo que haya resistido la prueba del tiempo?

Tres transformadores de potencia de ABB se han mantenido en el paisaje rural victoriano de Australia durante los últimos 100 años, prestando servicio a la empresa SP AusNet. Los transformadores formaban parte de una subestación de zona que abastecía al área local, en la que se incluían también dos empresas de generación hidráulica.

Neil Sequeira, director de proyectos de Capital Delivery and Engineering de SP AusNet opina al respecto. “La ingeniería de estos transformadores de ABB es extraordinaria y se construyeron para durar”, afirma. El único cuidado que parecían necesitar era saciar su sed de aceite. ¡Tampoco se le puede negar a un centenario que beba de vez en cuando!

Los tres grandes caballeros (o damas, dependiendo del punto de vista) están a punto de jubilarse, no porque no sigan rindiendo, sino porque se está reconstruyendo la subestación de SP AusNet. Uno de los transformadores se enviará a la instalación Moorebank de ABB en Sydney, donde vivirá sus últimos años a la sombra de un eucalipto, formando parte de una exhibición de artefactos antiguos y nuevos, un testimonio de la gran tecnología que ABB sigue inventando y reinventando.

Feliz 100º cumpleaños a los transformadores 1, 2 y 3. ¡Disfruten de una jubilación bien merecida!

Sally Durrant
Moorebank, Australia
ABB Corporate Communications
sally.durrant@au.abb.com

Los tres transformadores GSU 9 MVA 22/66 kV son tan antiguos como *ABB Review*. Los suministró BBC en 1914.

THE BROWN BOVERI REVIEW

THE HOUSE JOURNAL OF BROWN, BOVERI & COMPANY, LIMITED, BADEN (SWITZERLAND)

VOL. XXVIII APRIL/MAY, 1941 No. 4/5

The Brown Boveri Review is issued monthly. — Reproduction of articles or illustrations is permitted subject to full acknowledgment.

CONTENTS:

	Page
The electric drying of grass, a present-day war-time economic problem for Switzerland	75
Measurement transformers insulated by compressed air	84
The utilization of Velox boilers in heating plants	89
Vapour currents in the anode sleeves of mutators and their influence on the operating conditions of the mutator	97
The "Isotherm" turbo-compressor	108

THE ELECTRIC DRYING OF GRASS, A PRESENT-DAY WAR-TIME ECONOMIC PROBLEM FOR SWITZERLAND.[1]

Decimal index 621.369.2:633.2

This article sets forth the importance of artificial grass drying, in order to obtain concentrated fodder from home-grown grass, especially from the point of view of the Swiss food problem. The drying processes, which have been applied up till to-day, consuming considerable quantities of heat, are compared to the new drying process developed by Brown Boveri which is characterized by heat recuperation and electric heating. The advantages inherent to the new process, from a technical and economical point of view, are demonstrated by figures.

I. SCARCITY OF FODDER.

THE supply of food stuffs to Switzerland has become very difficult under present conditions. For this reason, the "Wahlen" cultivation programme, which aims at making the country as self supporting as possible, has met with whole-hearted approval.

A part of this plan is devoted to the creation of sufficient fodder to feed the cattle which are essential to keep up the meat supply and dairy products. Here the most difficult problem is to get sufficient fodder rich in albumen and which in normal times can be easily imported. All the countries which are at war or affected by the war, in the European zone where rains are plentiful, are faced by the same problem. And all these countries hope to remedy this lack by drying green fodder grown at home.

The problem presents itself in a peculiar form in Switzerland. Drying requires heat and the present meager imports of fuel hardly cover the bare requirements of the population for heating and cooking; this leads to the question of how much aid can be expected from heat generated from electricity.

Technically speaking, drying grass and generating heat electrically for that purpose are compatible processes because the first is a summer process and the second can be carried out in summer most advantageously thanks to the abundance of water power at that season. However, this happy conjunction is not without certain drawbacks.

[1] See Bulletin SEV of 1941, pages 41—48, G. Brunner "Die wirtschaftliche Grastrocknung".

II. DRY GRASS.

Many who have witnessed fine fields of grass rotting under the heavy downpours of a rainy summer may have wondered if it would not be possible to dry grass by artificial heat. However simple the idea may seem, it is a difficult one to put into practice, because the process used must be an *economical* one.

Grass, like all vegetables, contains, when fresh, only a little under 20 % of dry substance containing nourishment and sometimes no more than 10 % thereof. All the remainder is water which must nearly all be eliminated if it is desired to obtain the nourishing substances in a form which can be conserved for a considerable time. The remaining amount of water in the dry stuffs should not much exceed 10 % on an average, if mould is to be avoided.

Thus, from a 100 kg of grass, 80 kg or more of water must be drawn off. Very little can be accomplished by pressing and this only at the expense of a loss of valuable juices; the only thing to do is to eliminate the water under the form of steam. However, it takes heat to transform water into steam. As is known, the heat of evaporation for a kg of water is about 600 calories under vacuum and rises theoretically to over 700 calories when atmospheric air is freely admitted. In practice, up till now, no grass drying apparatus has consumed less than 1000 calories and this figure is generally exceeded considerably. This means that to dry 100 kg of fresh grass which will

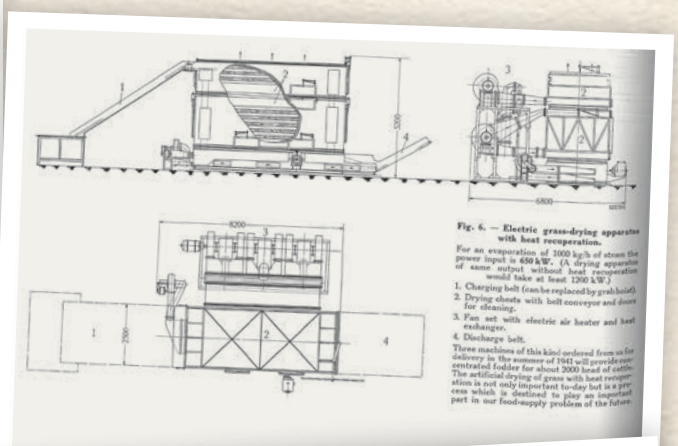


Fig. 6. — Electric grass-drying apparatus with heat recuperation.

For an evaporation of 1000 kg/h of steam the power input is 650 kW. (A drying apparatus of same output without heat recuperation would take at least 1200 kW.)

1. Charging belt (can be replaced by grab hoist).
2. Drying chests with belt conveyor and doors for cleaning.
3. Fan set with electric air heater and heat exchanger.
4. Discharge belt.

Three machines of this kind ordered from us for delivery in the summer of 1941 will provide concentrated fodder for about 2000 head of cattle. The artificial drying of grass with heat recuperation is not only important to-day but is a process which is destined to play an important part in our food-supply problem of the future.

¿Secado de hierba para convertirla en forraje invernal del ganado? ¿Utilizando electricidad? En ABB Review no faltan los artículos sobre aplicaciones inusuales.

The Brown Boveri Review Review, abril/mayo de 1941

1942

1937

Se patenta el nylon, inventado por Wallace Carothers

1938

Chester Carlson inventa un proceso de impresión en seco, denominado electrofotografía y conocido comúnmente como Xerox

1939

BBC demuestra la primera transmisión de HVDC (de Wettingen a Zúrich)

BBC construye la primera turbina de gas de combustión para generar electricidad

1942

Gagnan y Cousteau crean la escafandra autónoma de buceo

1943

BBC construye el primer disyuntor de aire comprimido de alta velocidad de 110 kV

La conexión del reloj de pulsera

Aportación de BBC al LCD

ANDREAS MOGLESTUE – ABB y sus empresas precursoras nunca han mostrado timidez a la hora de abrir nuevos caminos y promover nuevas tecnologías. Algunas de estas aventuras han alejado bastante a la empresa de su segmento de mercado habitual. En ocasiones, BBC se ha dedicado a aparatos como hornos domésticos, frigoríficos y equipos de abrillantamiento de suelos. Incluso en una ocasión estuvo detrás de un reloj de pulsera de moda.

Prototipo de una pantalla patentada LCD de súper trenzado nemático de matriz pasiva con 540 × 270 píxeles

En la actualidad, el concepto de reloj digital se asocia principalmente a la década de 1980. Resulta fácil pasar por alto que el concepto de pantalla de cristal líquido (LCD) es bastante más antiguo. En general, se atribuye al botánico austriaco Friedrich Reinitzer la primera observación (en 1888) de un material que mostraba un curioso estado intermedio entre sólido y líquido. Compartió esta observación con el físico alemán Otto Lehmann, que investigó la cuestión más a fondo. Lehmann se dio cuenta de que la sustancia (benzoato de colesterilo) tenía las cualidades refractivas del cristal en su fase intermedia. Por esta razón, la denominó "cristal líquido".

En 1962, Richard Williams de Radio Corporation of America (RCA) demostró que la alineación de cristales líquidos de p-azoxianisol se podría ver afectada por campos eléctricos. George Heilmeier, un colega de RCA, consiguió que esta realineación fuera visible mediante el uso de tintes, allanando el camino de las pantallas LCD. En torno a 1968, Sharp comenzó a investigar en esta área, reconociendo el potencial de la tecnología en las pantallas de calculadoras. La primera calculadora de este tipo se presentó en 1973.

En 1969, BBC colaboró con Hoffmann La Roche en una iniciativa de investigación conjunta. En un principio, esta tuvo su sede en el centro de investigación de BBC en Dättwil (Suiza), inaugurado dos años antes. La iniciativa de investigación no tardó en dar sus primeros frutos y Wolfgang Helfrich y Martin Schadt patentaron el efecto del campo trenzado nemático al año siguiente. Las células que utilizaban este efecto mostraban una mayor nitidez y un menor consumo de energía que las LCD anteriores. Hoffmann La Roche dejó de colaborar en 1972, pero BBC continuó desarrollando la tecnología. En 1973, se estableció una primera línea de producción en la fábrica de tubos de BBC en Birrfeld (Suiza). Al año siguiente, se inauguró una fábrica completamente nueva en Lenzburg (Suiza). En 1978, se amplió a 4.370 m^2.

El tamaño compacto y el bajo consumo de las pantallas las convertía en idóneas para los relojes de pulsera. En los primeros años, BBC colaboró con varios relojeros suizos de pequeño volumen, pero el avance real se produjo con la incorporación de CASIO. En el innovador reloj de pulsera Casiotron que se lanzó en 1974 se utilizaba una pantalla LCD de BBC. El Casiotron no solo fue el primer reloj con pantalla LCD que se fabricó a gran escala, sino también el primero en integrar un calendario (que tenía incluso en cuenta los años bisiestos).

En años posteriores, BBC añadió el concepto de iluminación de fondo que todavía se utiliza en las LCD. En 1983, la empresa inventó la pantalla LCD de súper trenzado nemático, que supuso otro gran salto en términos de definición de pantalla y resolución. Esta tecnología se utilizó en las Game Boy de Nintendo y en los primeros teléfonos móviles. BBC obtuvo beneficios principalmente por la patente, ya que la producción propia iba disminuyendo. Actualmente, la fábrica de Lenzburg es un centro de fabricación de semiconductores de potencia.

Andreas Moglestue
ABB Review
Zúrich, Suiza
andreas.moglestue@ch.abb.com

Lecturas recomendadas

H. Kawamoto, "The History of Liquid-Crystal Displays", Proceedings of the IEEE, vol. 90, nº 4, pág. 460–500, abril de 2002.
P. J. Wild, First-Hand: *Liquid Crystal Display Evolution – Swiss Contributions*, http://www.ieeeghn.org/wiki/index.php/First-Hand:Liquid_Crystal_Display_Evolution_-_Swiss_Contributions

Fig. 146. — Passenger motor car converted to electric drive "Fiat 500 Topolino". Output 4·2 H.P., lead battery 90 Ah (for ten-hour discharge), 84 V, showing how the battery is built in.
For short trips in towns with moderate inclines.
Maximum speed attained on the flat 60 km/h.

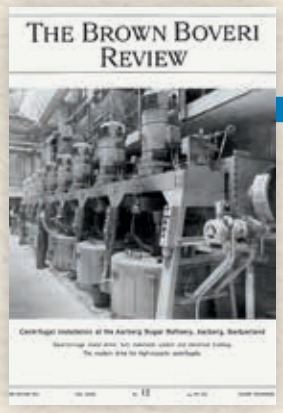
Lo que hoy se denomina electromovilidad no es un campo nuevo para ABB.

The Brown Boveri Review, enero/febrero/marzo de 1942

Traslado de de transformadores en 1908 (superior) y 1937 (izquierda)

The Brown Boveri Review, noviembre/diciembre de 1942

1944



1946

1951

1944

BBC desarrolla la primera locomotora de alta velocidad con un sistema de accionamiento directo

1945

George Orwell publica *Rebelión en la granja*

1946

Marion Donovan inventa los pañales desechables

1947

Bardeen, Brattain y Shockley inventan el transistor

1951

Primera portada de *BBC Review* en color

COMPARATIVE STUDY OF SOME PROBLEMS OF A.C. AND D.C. POWER TRANSMISSION. THE D.C. TRANSMISSION READY FOR PRACTICAL APPLICATION.

Decimal Index 621.315.051.024
621.315.051.025

The article compares the economic and some technical aspects of the two methods of transporting electric power. Both A.C. and D.C. transmission have progressed considerably in recent years and it is necessary therefore to revise earlier conclusions as to their relative merits.

It appears that the D.C. transmission is sufficiently out of the purely experimental stage that an industrial installation of a certain importance would be entirely justified.

THE realization of the decreasing world reserves of coal and other fuels has led to a renewed interest in the possibilities of utilizing all existing sources of hydro-power. Since most of the sites situated near to the consumers are already exploited, it will be necessary in a not too distant future to build hydrostations that are increasingly remote from the ultimate load centres. The question of how to transport over very long distances the power produced is becoming more and more important therefore. It is generally admitted that D.C. is more advantageous economically if the transmission distance exceeds a few hundreds of kilometres, but it remains to be shown beyond which point the standard A.C. system loses its superiority. Should this transition occur at relatively short distances D.C. would immediately become applicable not only for super-transmissions, but also for large interconnections between to-day neighbouring networks. It is obvious, however, that economic considerations are not conclusive until it has been definitely established that the converting equipment required at sending and receiving stations is sufficiently reliable for the capacities involved. It is one of the purposes of this article to show that this point has been reached to-day.

(a) *Comparison on the Basis of Cost.*

On the occasion of the 50th anniversary of Brown Boveri in 1941, we made a comparison of A.C. versus D.C. transmission on an economic basis[1]. The result of our studies seemed to indicate that for distances in excess of 200 to 300 km D.C. is more economical. Since then our research in both directions has continued. A thorough investigation of A.C. transmission stability has shown that intermediate synchronous condenser stations are not absolutely necessary as was commonly believed before. By using special induction type (asynchronous) generators, or by applying novel methods of field control to otherwise normal synchronous alternators, it appears possible to-day to bridge much longer distances than was thought practical a short time ago[2]. This discovery necessitates a revision of our previous comparative calculations.

The main reason why D.C. is at an advantage over very long distances is the fact that a D.C. transmission line is much less costly than an equivalent three-phase circuit. This is demonstrated in Fig. 1, which gives the first cost of the two kinds of lines for variable amounts of power to be transmitted. The comparison is made for double lines on single towers, i. e. for six wires in the case of A.C. and four and two wires respectively for D.C., in addition to the ground wire. Both lines are laid out for one per cent loss per 100 km. The price figures shown are based on average pre-war (1939) costs of construction and include copper conductors, galvanized steel ground wire, earthing of the towers, insulator strings, fittings, hot process galvanized towers, foundations, erection, right of way, prospecting and planning, and incidental expenses[3]. A comparison of curves 1 and 2 shows that the double D.C. line is over 30 % less expensive than the equivalent A.C. line. A defective cable puts one half of the A.C. circuits out of commission, but only one quarter of the D.C. circuits, as it is still possible to operate the remaining conductor of the defective line on full current and half the voltage by utilizing

[1] Brown Boveri Rev., October 1941, page 249.

[2] This question will be fully dealt with in a later issue of this review.

[3] Cost figures by courtesy of Motor Columbus A.G.

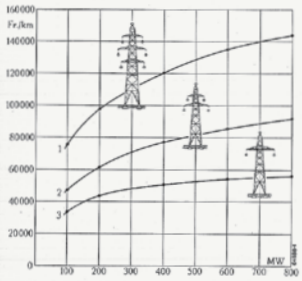


Fig. 1. — First costs of three-phase and D.C. lines for different design loads, based on pre-war prices (1939).

1. Double-circuit three-phase transmission for operating voltages of 150 to 400 kV.
2. Double-circuit D.C. transmission for operating voltages of 300 to 600 kV.
3. Single circuit D.C. transmission for operating voltages of 300 to 800 kV.

The cost figures given are for lines of equal loss (1% per 100 km).

The first cost of D.C. lines is so much lower than that of three-phase lines that D.C. is at an undeniable advantage over long distances. If temporary ground return of D.C. is admitted during disturbances, a three-phase line as per curve 1 is equivalent to a D.C. line according to curve 3, which shows what advantages are to be expected from this possibility.

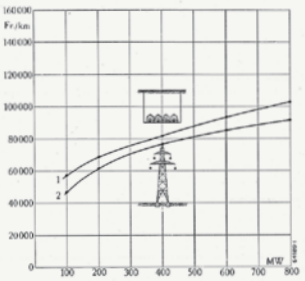


Fig. 2. — First costs of overhead and cable lines for D.C., for different design loads, based on pre-war prices (1939).

1. Cable line for 400 to 700 kV.
2. Overhead line 300 to 600 kV (identical with curve 2, Fig. 1)

The cost figures given are for lines of equal loss (1% per 100 km)

First costs of overhead lines and cables differ little from each other. With D.C. transmission it should be economically feasible to build long distance cable transmissions.

the earth as return path. If full advantage is taken of this possibility one is led to compare an A.C. line as per curve 1 with a D.C. line as per curve 3. In both cases a defective cable reduces to one half the power that can be carried by the remaining circuit. The inherent reliability of the D.C. line should be rather higher since there is less likelihood of a defect with two wires than with six. On the other hand it must be admitted that the conversion from A.C. to D.C. and vice versa introduces additional equipment which may itself be the source of trouble. This risk can be reduced to any desired degree by providing spare converters. The difference between curves 2 and 3 represents the possible savings if emergency operation with earth return is considered unobjectionable. In this case the D.C. line costs less than one half of the six conductor A.C. line as per curve 1.

The assumption that temporary ground return is permissible must not be made for D.C. transmission, but in a similar way for A.C. transmission as well. As a matter of fact, we are quite convinced that extra high voltage A.C. transmission will rely on solidly grounded neutral operation[1]. In both cases unsymmetrical communication circuits are, of course, subject to interference during certain kinds of faults, so that this problem must be tackled at any rate. We are confident it can and will be solved regardless of the method of power transmission eventually selected.

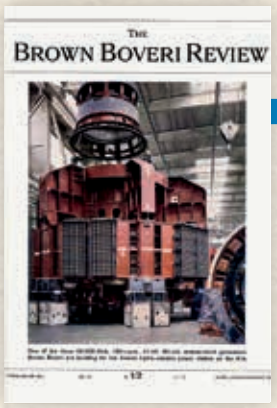
As mentioned above a D.C. line is much less expensive to build than an equivalent three-phase line. This is due to the combined effect of a number of causes, the most important of which are the following: —

1. The smaller number of conductors entails fewer insulators and simplifies the tower design.
2. A given line can be operated at a higher voltage with D.C. than with A.C. The voltage to earth can be increased in the ratio of $\sqrt{2}:1$, the voltage between conductors (as determined by corona), theoretically, in the ratio $\frac{2\times\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1{\cdot}63$.
3. Since there is no skin effect with D.C., hollow conductors are not necessary except for extremely high

[1] Th. Boveri: Bull. Schweiz. Elektrotechn. Ver. 1944, p. 270.
Brown Boveri Rev., October 1941, pp. 281 and 303.

Los argumentos a favor del uso de la transmisión de CC para integrar la generación de renovables no son nuevos, como demuestra esta aportación de 1945.
A pesar de las primeras actividades de BBC, fue la parte ASEA de la empresa la que instauró un liderazgo temprano en el campo de la HVDC (véase también la página 33 de esta edición de *ABB Review*).

The Brown Boveri Review, septiembre de 1945



1954

1953

ASEA es la primera empresa del mundo en fabricar diamantes sintéticos

1952

Jonas Salk desarrolla una vacuna contra la poliomielitis (polio)

1954

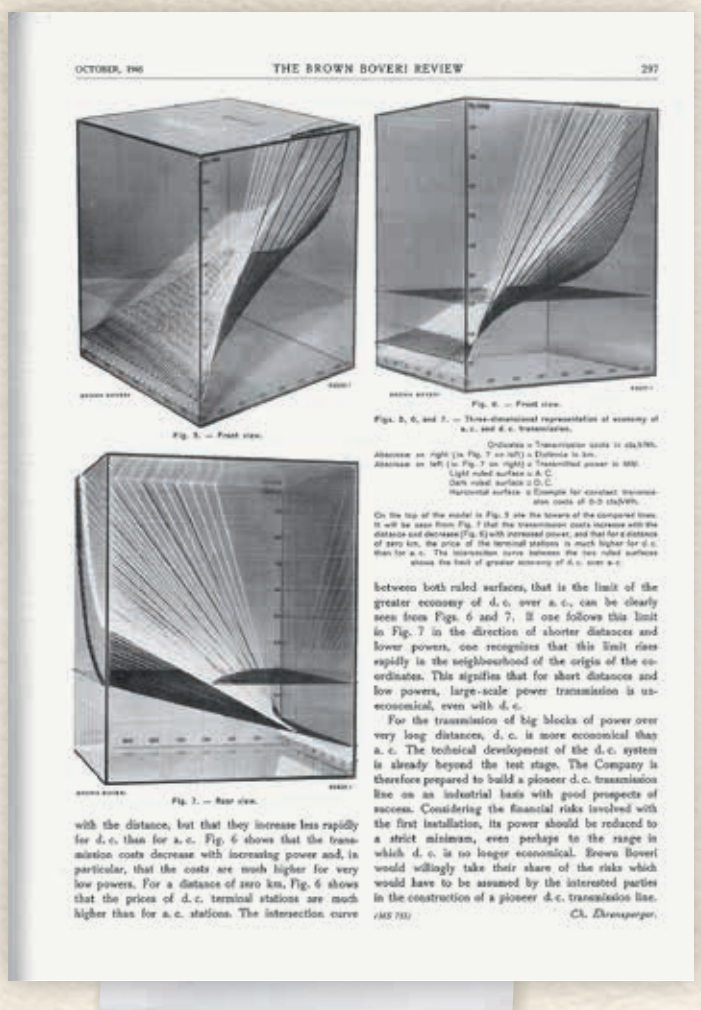
ASEA tiende la primera línea de transmisión comercial de HVDC

1960

Theodore Maiman inventa el láser

1961

Bob Dylan hace su debut en Greenwich Village, Nueva York



OCTOBER, 1946 THE BROWN BOVERI REVIEW 297

Fig. 5. — Front view.

Fig. 6. — Front view.

Figs. 5, 6, and 7. — Three-dimensional representation of economy of a. c. and d. c. transmission.

Ordinates = Transmission costs in cts/kWh.
Abscissæ on right (in Fig. 7 on left) = Distance in km.
Abscissæ on left (in Fig. 7 on right) = Transmitted power in MW.
Light ruled surface = A. C.
Dark ruled surface = D. C.
Horizontal surface = Example for constant transmission costs of 0·3 cts/kWh.

Fig. 7. — Rear view.

On the top of the model in Fig. 5 are the towers of the compared lines. It will be seen from Fig. 7 that the transmission costs increase with the distance and decrease (Fig. 6) with increased power, and that for a distance of zero km, the price of the terminal stations is much higher for d. c. than for a. c. The intersection curve between the two ruled surfaces shows the limit of greater economy of d. c. over a. c.

with the distance, but that they increase less rapidly for d. c. than for a. c. Fig. 6 shows that the transmission costs decrease with increasing power and, in particular, that the costs are much higher for very low powers. For a distance of zero km, Fig. 6 shows that the prices of d. c. terminal stations are much higher than for a. c. stations. The intersection curve between both ruled surfaces, that is the limit of the greater economy of d. c. over a. c., can be clearly seen from Figs. 6 and 7. If one follows this limit in Fig. 7 in the direction of shorter distances and lower powers, one recognizes that this limit rises rapidly in the neighbourhood of the origin of the coordinates. This signifies that for short distances and low powers, large-scale power transmission is uneconomical, even with d. c.

For the transmission of big blocks of power over very long distances, d. c. is more economical than a. c. The technical development of the d. c. system is already beyond the test stage. The Company is therefore prepared to build a pioneer d. c. transmission line on an industrial basis with good prospects of success. Considering the financial risks involved with the first installation, its power should be reduced to a strict minimum, even perhaps to the range in which d. c. is no longer economical. Brown Boveri would willingly take their share of the risks which would have to be assumed by the interested parties in the construction of a pioneer d. c. transmission line.

(MS 751) Ch. Ehrensperger.

Bastante antes de que MATLAB™ se inventara, *ABB Review* ya utilizaba representaciones en 3-D para mostrar resultados.

The Brown Boveri Review, octubre de 1946

No es ninguna novedad la utilización de residuos como combustible.

Brown Boveri Review, julio de 1969

Steam and Power from Refuse

628.492:621.182
628.492:621.311

The question of refuse incineration combined with steam and power generation is discussed.

This method of refuse disposal, its requirements and consequences, are still not widely known.

It is known that, beyond a certain annual volume of refuse, the running costs (including capital charges) of an incineration plant can be lowered appreciably by using the heat to produce steam and electricity, which is then sold. When the electricity undertakings negotiate tariffs for purchasing electricity from power-generating incineration plant, however, the agreed rates should be such that sales of electricity lower the specific cost of incineration per ton of refuse. Purchase prices between SFr. 0·03 and 0·05/kWh are generally sufficient.

An example of a project, based on practical data, illustrates the advantages of this method of incineration.[1]

Introduction

As industrialization and population density increase, so too do the problems and necessity of efficient refuse disposal. The specific quantity of refuse per head of population rises every year by several per cent, though there are certain differences between rural, urban and industrial areas. It requires a specialist to appreciate the problem in all its aspects and, despite its complexity, to find a simple but economical solution.

Refuse Incineration

It has been clearly demonstrated that the most hygienic way to dispose of refuse is to burn it, whereupon the combustion process gives rise to slag and flue gases. Because of the high temperatures in the boiler furnace, the slag can be considered as sterile, with no risk of decomposing. It can be safely dumped or used for some other purpose.

Refuse burns at temperatures between 900 and 1000 °C. Odourless flue gases can be guaranteed only if the combustion gases pass through a zone of temperatures high enough to eliminate smells, i.e. about 800 °C. The hot gases must also be cooled and cleaned before they are discharged from the chimney into the atmosphere. To be filtered, they must first be cooled to about 300 °C. This is usually done by injecting water or adding cold air. The heat remaining in the flue gases is thus removed without being utilized.

It is here that economic considerations enter into the picture. The heat in the flue gases is energy, and this energy can be used to generate steam and electricity.

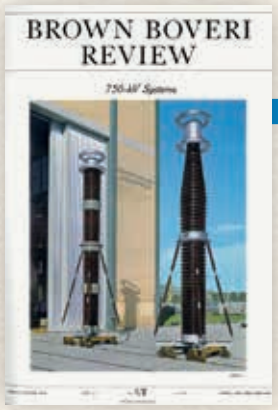
Steam and Power Generation

The calorific value of refuse increases year by year. The annual mean value for urban conditions, for example, has now passed 2200 kcal/kg. This refuse thus has almost the same calorific value as young brown coal which, despite its low heat content, is used in some countries for generating electricity.

Assuming this calorific value of 2200 kcal/kg and a boiler efficiency of 65 %, one ton of refuse produces roughly 2·3 tons of steam. Generated in a well designed boiler, this quantity of steam can be passed through a condensing turboset and produce up to 500 kWh.

[1] A film produced by the Swiss Association for the Protection of Water and Air against Pollution entitled "Waste—the Penalty of Affluence" and presented to the 4th International Congress of the International Research Group on Refuse Disposal (IRGR) on 2nd June 1969 in Basle came to the same conclusion as described in this article.

BBR 7-69 329



1964

1962

Rachel Carson publica *Primavera silenciosa*, que se cita con frecuencia como uno de los catalizadores clave que inspiraron el movimiento medioambiental

Se inventa la cassette de sonido

1964

John George Kemeny y Tom Kurtz inventan BASIC

1965

James Russell inventa el disco compacto

1967

Se inventa la primera calculadora

1968

Douglas Engelbart demuestra el primer ratón de ordenador del mundo

Fig. 116. — Brown Boveri radiotelephony equipment for Paris City Police
This equipment permits excellent telephone communication between patrol cars and police headquarters within a 50 km radius.

Equipo de radio de la policía parisina.

The Brown Boveri Review, enero/febrero de 1949

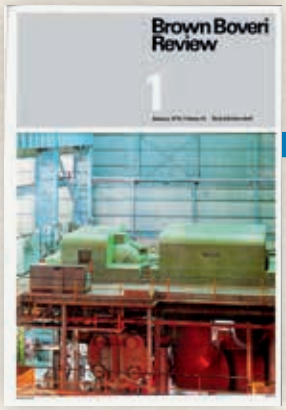
La instalación del equipo eléctrico en el norte de Canadá obligaba a utilizar métodos poco convencionales.

The Brown Boveri Review, julio/agosto de 1955

JULY/AUGUST 1955 THE BROWN BOVERI REVIEW 245

Fig. 05. — The rough and ready transport facilities in Northern Canada necessitated the PLC equipment being taken by air to Snare River power station near the Great Slave Lake

Fig. 06. — Snare River power plant supplies the goldmining town of Yellow Knife over a 115-kV line 150 km long
This line also serves the carrier-frequency telephone link, which is the only means of communicating with the outside world.



1974

1975

1969

BBC desarrolla el primer motor sin engranajes para procesos de cemento

1971

Las mujeres logran en Suiza el derecho igualitario al voto

1974

Erno Rubik ofrece al mundo el cubo de Rubik

ASEA presenta uno de los primeros robots industriales eléctricos del mundo

1975

Steve Sasson de Kodak inventa la cámara digital

1976

Se inventa la impresora de inyección de tinta

THE BROWN BOVERI REVIEW

ISSUED BY BROWN, BOVERI & COMPANY, LIMITED, BADEN (SWITZERLAND)

VOL. 42 SEPTEMBER 1955 No. 9

The Brown Boveri Review appears monthly. — Reproduction of articles or illustrations is permitted subject to full acknowledgment.

CONTENTS:

	Page
The First 150-MW Turbo-Generator Set in Europe	331
The Automatic Protective and Regulating Equipment at the Weisweiler Power Station	347
The Converter for Flexible Power-System Interconnections	349
Brown Boveri Transmitting and Rectifier Tubes in Industrial Generators for R.F. Heating	359
Brief but Interesting:	
Interesting Impulse and Short-Circuit Test on an Experimental High-Voltage Transformer	369
Interesting New Orders	383

THE FIRST 150-MW TURBO-GENERATOR SET IN EUROPE

621.165:621.313.323 (43)

The largest turbo-generator set in Europe, having an output of 150 MW, was supplied by Brown Boveri to the lignite-fired power station of Weisweiler, near Aachen, Germany, where it has been in operation for several months. In the following article the authors describe in detail the turbine, the alternator and the exciter.

At the beginning of 1955 in the Weisweiler power station near Aachen, belonging to the Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG. (RWE), Europe's first 150-MW turbo-generator set was taken into service. Since then the plant has operated without disturbance, delivering its full output to the supply system.

The Weisweiler Power Station

The newly-built 350-MW steam-driven power station,[1] which was planned by the RWE, employs as fuel low-grade lignite having a high ash and moisture content. In power stations such as this, burning so little high-grade coal, capital is burdened to a considerable degree with the cost of producing current: operational expenditure is high. When planning the Weisweiler power station greatest stress was placed on: low building costs, short building time (i.e. reduced interest on building capital), maximum reliability (i.e. high utilization factor), and low operating costs.

[1] W. Kretschmer: Neuzeitliche Braunkohle-Grosskraftwerke Braunkohle, Wärme und Energie 1953, No. 19/20, p. 399–410.

W. Kretschmer: Das Braunkohle-Kraftwerk Weisweiler. Elektrizitätswirtschaft 1955, Vol. 54, No. 11, p. 342–50.

The ever-increasing demand for power made on the supply system of the RWE (about 8% per annum) and the desire to produce with a minimum of delay as much additional electrical energy as possible for the outlay of capital led inevitably to the employment of large units, as the specific cost of plant reckons in relation to the increase in unit size. The power station (see title page of this issue) is planned for an immediate output of 350 MW, but full consideration has been taken of the need for future expansion. In view of the fact that the output of large turbo-sets is always interrelated with the power being supplied to the system and bearing in mind that the power available to the entire German grid amounts to approximately 6000 MW, it will be recognised that the choice of one 150-MW and two 100-MW turbo-sets—corresponding to 2·5% (or 1·77%) of the total power in the grid—was in line with the obvious trend to employ large units.

The thermal circuits of the individual units are quite independent of each other and interconnections are eliminated; and on the current-producing side, also, the unit system is employed for the three sets; in fact, each system is fully independent as far as the h.v. transmission lines, beyond the transformers. In order to achieve optimum reserve and low partial-load conditions each of the two 100-MW turbines are supplied with steam by two 200-t/h high-pressure, drum-type boilers, and the 150-MW turbine, by two 300-t/h forced-circulation boilers.

THE MAGNETOSTRICTIVE RESONATOR AND ITS USE IN OSCILLATORS AND FILTERS

538.652
621.373.1:538.652
621.372.54:538.652

Magnetostrictive resonators are electro-mechanical oscillatory systems, in which the electrical and mechanical quantities are related according to magnetostrictive laws. In this article, the author examines practical and theoretical aspects of such elements and describes their construction and application.

As with all electro-mechanical principles, attempts were also made to apply the magnetostrictive effect in resonant oscillatory systems and electro-mechanical transducers. The first investigations into magnetostrictive resonators as frequency-determining elements in tube oscillators provided most encouraging results.[1] Consequent on the high mechanical quality of such resonators, it was possible to attain a degree of stability quite equal to that obtainable from quartz crystals. But the temperature coefficient of the frequency for the particular alloy used was much too large ($a_f = 10^{-4}/°C$) to permit replacement of quartz by magnetostriction oscillators. The frequency range was practically limited to 10–50 kc/s. At lower frequencies the range was restricted by the length of the rod, at higher frequencies pure electrical resonances blanketed the magnetostrictive effect.

By systematic investigation it has become possible to develop magnetostrictive elements for the frequency range 20–350 kc/s, in which all earlier shortcomings have been made good. By employing a suitable alloy, subjected to special thermal treatment, for the vibrating rod the temperature coefficient of frequency was reduced to $a_f \approx 5{,}10^{-7}/°C$. Moreover, the layout of the vibrator and the selection of the magnetic working point made it possible to avoid pure electrical resonances and to ensure that the magnetostrictive effect was large enough throughout the entire frequency range to determine the frequency definitively in oscillator circuits. As a result of the qualities attained—high degree of stability and small temperature coefficient—it is now possible to use magnetostriction vibrators for the same purposes as quartz crystals without needing a thermostat, due to the low temperature coefficient. For instance, all Brown Boveri single-sideband PLC (power line carrier) sets are equipped with magnetostriction oscillators without thermostats.

[1] G. W. Pierce: Magnetostriction Oscillators. Proc. Inst. Radio Engrs, 1929, Vol. 17, No. 1, p. 42–68.

Theory of Magnetostrictive Resonators

Due to the interaction of the magnetostrictive effect and the mechanical behaviour of a (longitudinally) vibrating rod, the electrical quantities in the coil surrounding the rod are related to the mechanical quantities. Depending on whether the rod is surrounded by one or two magnetically decoupled coils, it is usual to refer to a two- or four-terminal network. The latter is also known as a magnetostriction element.

Before we commence to deduce the characteristic equations, let us first explain what is meant by magnetostrictive effects.

1. If a sample of ferromagnetic material is exposed to a magnetic field, its geometrical dimensions change.

2. If a sample of ferromagnetic material is in a magnetic field and mechanical strains are set up in it by external forces, its state of magnetization changes.

A quantitive formulation of the magnetostrictive phenomena is, for present purposes, expressed by Joule's and Villari's laws:

Joule's law: If a rod of ferromagnetic material is magnetized axially, the change in axial length is proportional to the change in field strength and to the length of the rod.

$$dl = \lambda l_0 \, dH \quad (\sigma \text{ constant}) \tag{1}$$

Villari's law: If a rod of ferromagnetic material, pre-magnetized axially, is subjected to an axial mechanical strain, the magnetic induction varies in proportion to this strain.

$$dB = \lambda \, d\sigma \quad (H \text{ constant}) \tag{2}$$

Observe that the magnetostriction is independent of the direction of the field:

$$\Delta l = F(H) = F(-H) \tag{3}$$

If, in the event of a sinusoidal field, it is desired that the change of length shall also be sinusoidal, pre-magnetization is essential. The proportionality factor λ for both equations (1) and (2) is called the magnetostriction constant, although λ is dependent on the pre-magnetization H_0. Depending on the material, λ can be positive or negative.

Deduction of the Equation for a Magnetostrictive Four-Terminal Network

For an element of rod of constant cross-section and length dx, the following equations of motion are valid in the x-axis (ignoring internal friction):

$$d^2\xi = -s \, d\sigma \, dx \quad (H \text{ constant}) \tag{4}$$

$$d\sigma = -\rho \frac{d^2\xi}{dt^2} \cdot dx \tag{5}$$

where $d\xi$ = change of length of element dx
s = stiffness = $1/E$ (E = Young's modulus)
σ = mechanical strain
ρ = specific gravity.

Further, for ferromagnetic material, the appropriate version of the magnetostrictive equation (1) must be added

$$d^2\xi = \lambda \, dh \, dx \quad (\sigma \text{ constant}) \tag{6}$$

The latter is true, provided the rod is premagnetized by a d.c. field and the alternating field $h \ll H_0$. By combining (4) and (6) and substituting v for $d\xi/dt$, we obtain the following equation for simultaneous variation of mechanical strain and field strength:

$$\frac{dv}{dx} = -s \frac{d\sigma}{dt} + \lambda \frac{dh}{dt} \tag{7}$$

and from (5), substituting dv/dt for $d^2\xi/dt^2$:

$$\frac{d\sigma}{dx} = -\rho \frac{dv}{dt} \tag{8}$$

Referring to the magnetostrictive law (2), we find the equation of the magnetic circuit consisting of the magnetostrictive rod, surrounded by a coil of N turns and the magnetic return circuit, as follows:

$$\vartheta = 4\pi i N = \frac{\lambda}{\mu_0 \mu_r} \int \sigma \cdot dx = \phi \sum_\nu \frac{l_\nu}{\mu_\nu q_\nu} = \phi R_{m\,tot} \tag{9}$$

from which, introducing

$$u = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi N}{R_{m\,tot}} \left[N \frac{di}{dt} - \frac{\lambda}{\mu_r} \int_0^l \frac{d\sigma}{dt} \, dx \right] \tag{10}$$

we obtain, for the internal field strength of the element of rod dx:

$$\frac{dh}{dt} = u \frac{R_m}{Nl} + \frac{\lambda}{\mu_0 \mu} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \tag{11}$$

where l = length of the rod
R_m = reluctance of the rod.

Thus, by substituting in (7), we obtain the relation between the electrical and mechanical quantities

$$\frac{dv}{dx} = -s' \frac{d\sigma}{dt} + \lambda \frac{R_m}{Nl} u \tag{12}$$

where $s' = s\,(1 - 4\pi\lambda^2/\mu s)$. For a sinusoidal impressed voltage $u = Ue^{j\omega t}$, the simultaneous equations (8) and (12) give the following solution:

$$\sigma = \sigma_0 \cos\gamma x - jz v_0 \sin\gamma x - jz k u (1 - \cos\gamma x) \tag{13}$$

$$v = \frac{\sigma_0}{jz} \sin\gamma x + v_0 \cos\gamma x + k u \sin\gamma x \tag{14}$$

where $z = \sqrt{\frac{\rho}{s'}}$ $\qquad \gamma = \omega\sqrt{\rho s'}$ $\qquad k = \frac{\lambda R_m}{N\gamma l}$

σ_0, v_0 = are mechanical strain and velocity at the end of the rod $x = 0$. If we substitute (10) in the equations (13) and (14) with the boundary condition $\sigma_0 = 0$ (i.e. the rod has a free end), we obtain the electromechanical transducer equations:

$$u = \frac{N\gamma l}{jz\lambda R_m} \left[\sigma_l \frac{\cos\gamma l}{1 - \cos\gamma l} + jz v_l \frac{\sin\gamma l}{1 - \cos\gamma l} \right] \tag{15}$$

$$i = u \frac{R_{m\,tot}}{j\omega 4\pi N^2} + \frac{\lambda z}{j\gamma N\mu} \cdot \left[\frac{\sigma_l}{jz} \frac{\gamma l \cos\gamma l - \sin\gamma l}{1 - \cos\gamma l} + v_l \frac{\gamma l \sin\gamma l - 2(1 - \cos\gamma l)}{1 - \cos\gamma l} \right] \tag{16}$$

Sala de control de una central hidroeléctrica en Italia. ABB sigue equipando salas de control, si bien el aspecto actual es muy distinto.

The Brown Boveri Review, enero de 1955

Fig. 49a. — Control room in the underground power station of Santa Massenza belonging to the Società Idroelettrica Serca-Molveno, Italy
Right: the central control desk for generators, transformers and transmission lines; in the centre: the mimic diagram; and adjoining, the switch panels for measuring, recording, controlling and protection. Built by Tecnomasio Italiano Brown Boveri, Milan.

Fig. 2. — No machine could help on the last part of the way up to La Dôle television transmitter building which is at an elevation of 1600 m: muscular effort was the only way the separate sections of the visual transmitter, weighing some 3 tons altogether, could be pushed up the mountainside

Equipo de tiro humano de trineo transportando el transmisor de televisión de La Dôle, Suiza.

The Brown Boveri Review, marzo de 1955

1984

1987

1991

1978

Nace el primer bebé probeta

1987

Primera revista *BBC Review* en español

1988

ASEA y BBC se fusionan para crear ABB

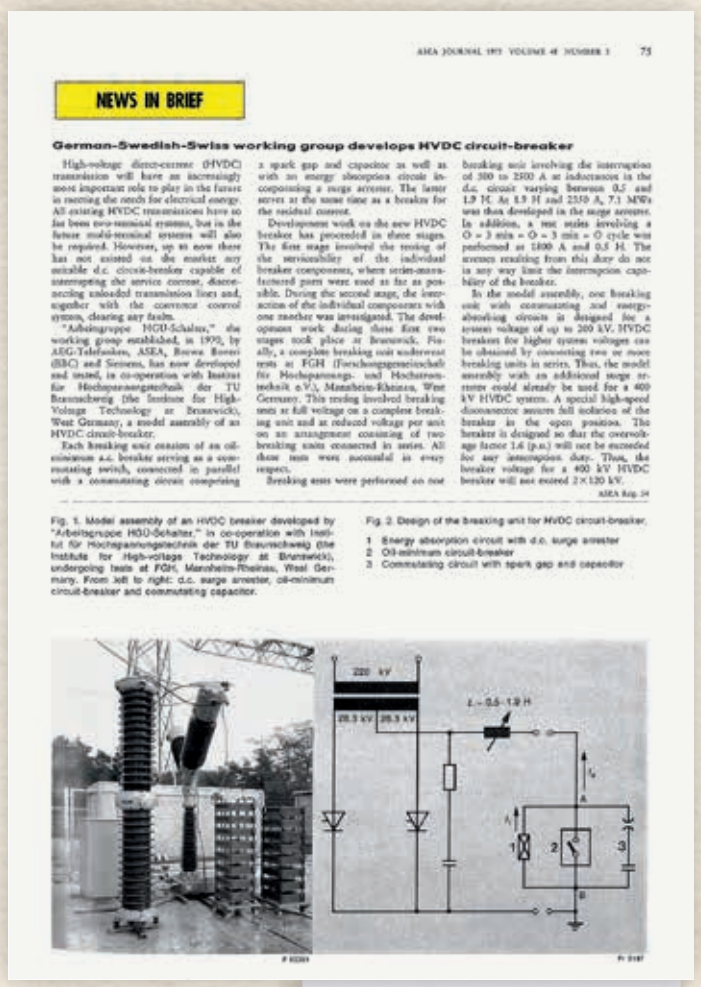
Stephen Hawking publica *Historia del tiempo*

1990

ABB presenta el sistema de propulsión eléctrica Azipod® para barcos

1991

Primera revista *ABB Review* en ruso



ASEA JOURNAL 1975 VOLUME 48 NUMBER 3 75

NEWS IN BRIEF

German-Swedish-Swiss working group develops HVDC circuit-breaker

High-voltage direct-current (HVDC) transmission will have an increasingly more important role to play in the future in meeting the needs for electrical energy. All existing HVDC transmissions have so far been two-terminal systems, but in the future multi-terminal systems will also be required. However, up to now there has not existed on the market any suitable d.c. circuit-breaker capable of interrupting the service current, disconnecting unloaded transmission lines and, together with the convertor control system, clearing any faults.

"Arbeitsgruppe HGÜ-Schalter," the working group established in 1970, by AEG-Telefunken, ASEA, Brown Boveri (BBC) and Siemens, has now developed and tested, in co-operation with Institut für Hochspannungstechnik der TU Braunschweig (the Institute for High-Voltage Technology at Brunswick), West Germany, a model assembly of an HVDC circuit-breaker.

Each breaking unit consists of an oil-minimum a.c. breaker serving as a commutating switch, connected in parallel with a commutating circuit comprising a spark gap and capacitor as well as with an energy absorption circuit incorporating a surge arrester. The latter serves at the same time as a breaker for the residual current.

Development work on the new HVDC breaker has proceeded in three stages. The first stage involved the testing of the serviceability of the individual breaker components, where series-manufactured parts were used as far as possible. During the second stage, the interaction of the individual components with one another was investigated. The development work during these first two stages took place at Brunswick. Finally, a complete breaking unit underwent tests at FGH (Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V.), Mannheim-Rheinau, West Germany. This testing involved breaking tests at full voltage on a complete breaking unit and at reduced voltage per unit on an arrangement consisting of two breaking units connected in series. All these tests were successful in every respect.

Breaking tests were performed on rear breaking unit involving the interruption of 300 to 2500 A at inductances in the d.c. circuit varying between 0.5 and 1.9 H. At 1.9 H and 2500 A, 7.1 MWs was thus developed in the surge arrester. In addition, a test series involving a O – 3 min – O – 3 min – O cycle was performed at 1800 A and 0.5 H. The stresses resulting from this duty do not in any way limit the interruption capability of the breaker.

In the model assembly, one breaking unit with commutating and energy-absorbing circuits is designed for a system voltage of up to 200 kV. HVDC breakers for higher system voltages can be obtained by connecting two or more breaking units in series. Thus, the model assembly with an additional stage arrester could already be used for a 400 kV HVDC system. A special high-speed disconnector assures full isolation of the breaker in the open position. The breaker is designed so that the overvoltage factor 1.6 (p.u.) will not be exceeded for any interruption duty. Thus, the breaker voltage for a 400 kV HVDC breaker will not exceed 2×120 kV.

ASEA Rep. 24

Fig. 1. Model assembly of an HVDC breaker developed by "Arbeitsgruppe HGÜ-Schalter," in co-operation with Institut für Hochspannungstechnik der TU Braunschweig (the Institute for High-voltage Technology at Brunswick), undergoing tests at FGH, Mannheim-Rheinau, West Germany. From left to right: d.c. surge arrester, oil-minimum circuit-breaker and commutating capacitor.

Fig. 2. Design of the breaking unit for HVDC circuit-breaker.
1 Energy absorption circuit with d.c. surge arrester
2 Oil-minimum circuit-breaker
3 Commutating circuit with spark gap and capacitor

Los accionamientos de ABB pueden llevar tu vehículo a una prueba de conducción.

Brown Boveri Review, marzo de 1986

Four-Roller Test Rig for Four-Wheel Drive Vehicles

Production of four-wheel drive vehicles is increasing year by year. To speed up development work, the vehicle industry requires suitable test rigs. Brown Boveri have responded to this need by developing and building a dynamic four-roller test rig especially for this type of vehicle. The rig has four drives rated 110 kW and can be used to test vehicles with axles spaced 2 to 3.5 m at speeds up to 240 km/h.

Four-wheel drive vehicles are appearing on the market in ever-increasing numbers. As a great many vehicle trials are performed today on test rigs, suitable roller performance rigs had to be developed and built for this type of vehicle. Features in favour of testing on rigs are:

- The conditions encountered during road tests can be simulated reliably on modern test rigs.
- Test cycles are far easier to reproduce on test rigs than on the open road.
- Trials carried out on test rigs are more cost-effective and less time-consuming than road tests.

A multi-purpose vehicle test rig must satisfy the following requirements:

- An individually driven roller must be provided for each wheel of the vehicle.
- Shafts connecting the rollers should be avoided to ensure access to all parts of the vehicle from below.

Two stipulations result from these requirements: the rollers must be synchronized and they must be capable of displacement. Brown Boveri consequently designed and built a test rig for the more traditional front-wheel and rear-wheel drives as well as for the four-wheel drive. This test rig is described in the following.

The rig is intended for putting vehicles, their functional assemblies and individual components through their paces under realistic road conditions.

Brown Boveri provided the following services and equipment for the test rig:

- Mechanical and electrical design of the test rig, plus delivery of the control hardware and running resistance simulator
- All calculations connected with vibrations and the layout design of the test rig foundations
- Structural design

The customer consulted Brown Boveri in all matters concerning the civil engineering. This covered items such as the facilities for supplying cooling air and water and for emission removal, all of which were provided by the customer.

Operators and suppliers of this type of test facility often refer to them as roller bed or performance test rigs.

R. Gee works on test rig projects in our Industrial Plants Division, Mannheim, Federal Republic of Germany.

Fig. 1 – Rear-wheel drive vehicle on the four-roller performance test rig

En 1988, ASEA y ABB se fusionan para formar ABB. No obstante, no fue la primera colaboración entre ambas empresas. Como este artículo documenta, la empresa colaboró en un proyecto para crear un disyuntor de HVDC en la década de 1970.

ASEA Journal, vol. 48, nº 3, 1975

1994

2003

1997

El ordenador Deep Blue derrota al campeón mundial de ajedrez Gary Kasparov

1998

El mayor puente colgante del mundo (1.990 m), el Akashi Kaikyo, se inaugura en Japón

2001

Primera presencia completa en la Web de *ABB Review*

Apple presenta el iPod

2002

ABB une las redes de CA de Australia del Sur y Victoria con la transmisión subterránea más larga del mundo

2003

Primera revista *ABB Review* en chino

Brown Boveri Systems Control One of the Most Modern Baggage Sorting Facilities in the World

Swissair entrusted Brown Boveri with the design and delivery of control systems for the new baggage sorting facility in finger dock A at Zurich airport in Switzerland. By installing the BBC-PARTNERBUS® and the INDACTIC® 15 control system, Brown Boveri contributed to the reliability and transparency of this facility, in which decentralized sorting computers are a main feature.

M. Heuer *is in charge of special projects in the Airport Planning Department of Swissair and has overall responsibility for the new sorting facility. Kloten, Switzerland*

K. Kimmig *is Project Manager in charge of the equipment and systems delivered by our company. Turgi, Switzerland*

Introduction

Flight passengers rightly expect the baggage they checked in before departure to arrive with them at their destination. This presumes, however, that the baggage travels on the same flight as the passengers. To ensure that this is always so, Zurich airport placed in operation, on November 1, 1985, one of the most modern baggage sorting facilities in the world.

Design Concept

The design concept used for the new sorting system in terminal A is similar to that used for the system in terminal B, which has given reliable service for more than ten years. With the new system, Zurich airport now offers passengers the following services:

- Check-in at any time on the day of travel up until shortly before the flight departure
- A free choice of the shortest queue at the check-in counters to any destination
- Flight connections with short transfer times can be used in the knowledge that the baggage will also arrive on time at the final destination

If these services to the customer are to be guaranteed, however, it must be possible to sort large quantities of baggage and direct the suitcases, etc. to their correct destinations. High-speed conveyor belts, such as those linking terminal A to terminal B, are one means by which this can be accomplished. Another is to ensure a high level of operational reliability.

Transport and Sorting of the Baggage

The check-in counters in the newly designed departure hall of terminal A are divided into two groups. Each counter is linked by a conveyor belt to the baggage sorting room, which is in the basement of the finger dock. To enable passengers to check-in shortly

Fig. 1 – Suitcase entering the sorting bay

Fig. 91. — 1100 h.p. d.c. locomotive of the Viação Férrea Federal Leste Brasileiro em Salvador

Ten locomotives of this type were equipped by Brown Boveri with driving motors, circuit breakers and voltage converters with quick-acting regulators.

BBC suministró los motores, disyuntores y reguladores para esta locomotora de 3 kV CC y 1,00 CV destinada a Brasil en 1955. Desde sus inicios, BBC fue proveedora de la industria ferroviaria y lo sigue siendo en la actualidad.

The Brown Boveri Review, enero de 1955

¡Es posible que la tecnología de BBC haya servido para clasificar su equipaje aéreo!

Brown Boveri Review, mayo de 1986

2008

2010

2013

2008

La noria más alta del mundo, Singapore Flyer, se inaugura en Singapur

2009

Usain Bolt establece un nuevo récord masculino de 100 m con 9,58 segundos

2010

ABB inaugura la subestación más alta del mundo en el edificio más alto del mundo, el *Burj Khalifa*, en los EAU

2012

ABB diseña y desarrolla con éxito un interruptor híbrido de CC adecuado para la creación de grandes redes de CC interregionales

2013

ABB Review está disponible en formato de libro electrónico

Los directores eligen

Tesoros de los archivos

Despejando las vías

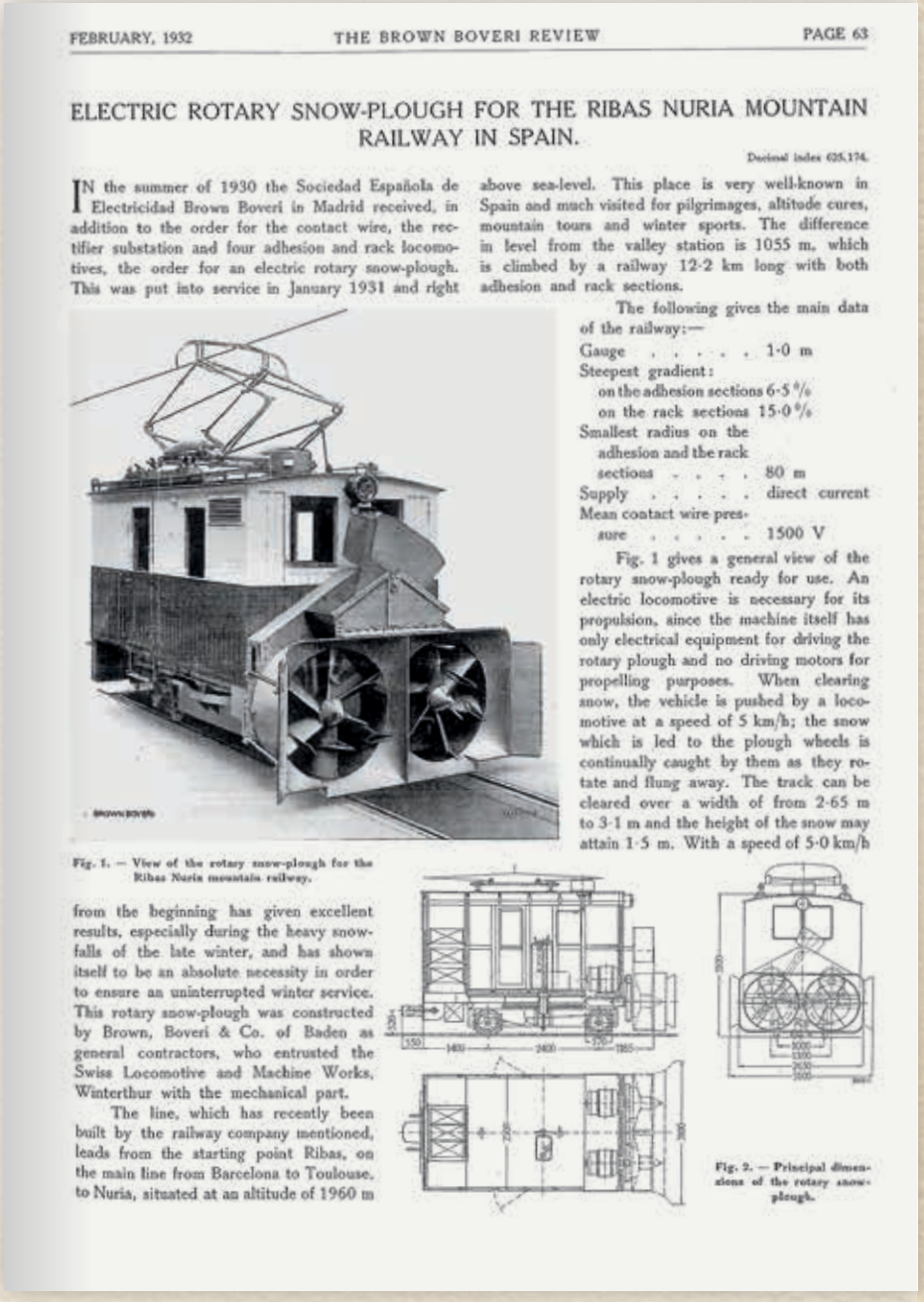
Sarah Stoeter tiene una licenciatura en Inglés y Psicología por la Universidad de Minnesota, Estados Unidos. Desde 2007 es redactora de *ABB Review*.
sarah.stoeter@ch.abb.com

SARAH STOETER – Si está leyendo esta revista, probablemente, esté familiarizado con las innumerables tecnologías de energía y automatización de ABB: accionamientos y motores industriales, transformadores, aparamenta, robots, controladores, unidades de propulsión naval, HVDC y sistemas de automatización. Pero, ¿creería que ABB ha fabricado máquinas quitanieves? Este interesante giro en la trayectoria de la empresa demuestra que el espíritu innovador es una parte muy importante de ABB. Como directora, es un privilegio colaborar en la preparación de artículos sobre tecnologías como el presente, formar parte del espíritu innovador de ABB.

Las empresas predecesoras de ABB, ASEA y BBC, fabricaron locomotoras y tuvieron un papel clave en la electrificación de numerosas vías férreas, especialmente en Suecia y Suiza. La máquina quitanieves giratoria eléctrica para locomotoras, que se describe en el artículo de *Brown Boveri Review* "Máquina quitanieves giratoria eléctrica para el tren de montaña Ribas Nuria en España" de 1932, complementa perfectamente el pasado ferroviario de ABB.

Una vía férrea de 12,2 km de longitud, que asciende 1.055 m desde la estación del valle en Ribes de Fresser (Ribas) hasta Vall de Nuria en los Pirineos a una altitud de 1.960 metros sobre el nivel del mar, daba servicio a una zona "muy visitada en peregrinaciones, tratamientos de altitud, rutas de montaña y deportes de invierno". Para mantener el servicio en invierno se construyó la máquina quitanieves giratoria eléctrica de BBC y SLM, que se puso en servicio en 1931.

E. Hugentobler, (G.A.W.), "Electric rotary snow-plough for the Ribas Nuria mountain railway in Spain", The Brown Boveri Review, pág. 63–65, febrero de 1932.



FEBRUARY, 1932 THE BROWN BOVERI REVIEW PAGE 63

ELECTRIC ROTARY SNOW-PLOUGH FOR THE RIBAS NURIA MOUNTAIN RAILWAY IN SPAIN.

Decimal index 625.174.

IN the summer of 1930 the Sociedad Española de Electricidad Brown Boveri in Madrid received, in addition to the order for the contact wire, the rectifier substation and four adhesion and rack locomotives, the order for an electric rotary snow-plough. This was put into service in January 1931 and right from the beginning has given excellent results, especially during the heavy snowfalls of the late winter, and has shown itself to be an absolute necessity in order to ensure an uninterrupted winter service. This rotary snow-plough was constructed by Brown, Boveri & Co. of Baden as general contractors, who entrusted the Swiss Locomotive and Machine Works, Winterthur with the mechanical part.

The line, which has recently been built by the railway company mentioned, leads from the starting point Ribas, on the main line from Barcelona to Toulouse, to Nuria, situated at an altitude of 1960 m above sea-level. This place is very well-known in Spain and much visited for pilgrimages, altitude cures, mountain tours and winter sports. The difference in level from the valley station is 1055 m, which is climbed by a railway 12·2 km long with both adhesion and rack sections.

The following gives the main data of the railway:—

Gauge	1·0 m
Steepest gradient:	
on the adhesion sections	6·5 %
on the rack sections	15·0 %
Smallest radius on the adhesion and the rack sections	80 m
Supply	direct current
Mean contact wire pressure	1500 V

Fig. 1 gives a general view of the rotary snow-plough ready for use. An electric locomotive is necessary for its propulsion, since the machine itself has only electrical equipment for driving the rotary plough and no driving motors for propelling purposes. When clearing snow, the vehicle is pushed by a locomotive at a speed of 5 km/h; the snow which is led to the plough wheels is continually caught by them as they rotate and flung away. The track can be cleared over a width of from 2·65 m to 3·1 m and the height of the snow may attain 1·5 m. With a speed of 5·0 km/h

Fig. 1. — View of the rotary snow-plough for the Ribas Nuria mountain railway.

Fig. 2. — Principal dimensions of the rotary snow-plough.

Asombro mundial

MICHELLE KIENER – Se dice que, si una persona echase solo un vistazo a cada obra de arte del Louvre de París, tardaría nueve meses en verlas todas. Mi experiencia con los archivos de *ABB Review* ha sido parecida. He trabajado para ABB y he leído su *Review* desde hace 15 años y, sin embargo, si decidiese leer todos los artículos que me interesan, tendría que hacerlo a tiempo completo. ¡Y es probable que siguiese haciéndolo aún después de la jubilación! Con un material tan interesante, me costó mucho ceñirme al plazo de investigación.

En términos generales, lo que más me ha sorprendido ha sido el carácter global tanto del *Review* como de ABB. Actualmente, es normal pensar de una manera global, cruzar un océano en una tarde, hablar de alcance mundial y globalización o enviar una "carta" que llega a otro continente en cuestión de segundos. Sin embargo, tanto el *Review* como sus empresas matrices anteriores, ASEA y BBC, eran entidades globales mucho antes de que estas palabras de moda, así como los viajes y comunicaciones de alta velocidad, fueran algo habitual. En 2014, el suministro de enormes equipos a los clientes sigue planteando retos, bien por disponibilidad, transporte adecuado, inclemencias del tiempo o túneles de baja altura en la ruta: todo ello coordinado y comunicado a través del correo electrónico y teléfonos inteligentes. Incluso el envío de *ABB Review* en todo el mundo supone también algunos retos, ya sea por los distintos reglamentos de importación o la gestión de la lista mundial de suscriptores, que nuestro equipo de 102 distribuidores nacionales tiene que mantener al día. Ante este panorama, me resulta difícil imaginar cómo se habría logrado este mismo resultado final hace 100 años. Imagine la fabricación en 1914 de una turbina en Suiza para su entrega en Australia. Imagine el envío de personal encargado de su instalación y puesta en servicio, así como el tiempo que tendría que estar fuera de casa y sin "asistencia local" de Google o un diccionario en su teléfono inteligente.

Imagine el envío de los ejemplares impresos del *Review* a las direcciones de todo el mundo en una época en la que las películas mudas seguían siendo tecnología de vanguardia.
Por esta razón, he seleccionado el siguiente artículo entre los miles que podría haber elegido. En mi opinión, resume a la perfección el espíritu pionero, la naturaleza intrépida y la actitud de "poder conseguirlo" de las numerosas personas que contribuyen en el desarrollo de ABB, tanto actualmente como en el pasado. Y el *Review* ha constituido una parte esencial al compartir sus logros, registrar sus avances y documentar la excelencia.

Michelle Kiener estudió ingeniería electrónica en el Merchant Navy College, Reino Unido, y obtuvo un máster en ciencias medioambientales. Es editora desde hace cuatro años.
michelle.kiener@ch.abb.com

NOTES.

Shipping large transformers.

Decimal index 656. 026: 621. 314. 21.

Due to the increasing size of transformers, packing and conveying them to overseas destinations is accompanied by great difficulties to be overcome by both the designer and shipping company.

The most rational way of transporting the transformer is with the core and windings inside the oil-filled tank, while the insulator bushings, oil conservator, underframe and cooling equipment are sent separately. With this method the costs of erection are reduced to a minimum and the drying-out of the transformer on site is rendered unnecessary or else of shorter duration.

The weight of such a transformer when filled with oil, however, often exceeds the capacity of the cranes available on the ship or at the harbours, and the dimensions are greater than those permissible for bridges, subways, railway loading gauges and ships' holds.

In such cases the transformer must be partly or completely dismantled for transport, and the tanks of particularly large units are made in two, or even three parts. The upper part of the tank and also, if advisable, the upper yoke, are then packed separately. Instead of the dismantled top yoke, a temporary device for keeping the core and windings in place is used during transport.

As an example, the shipping of two large transformers to Melbourne (Australia) for Richmond Substation of the Victoria State Electricity Commission might be quoted. These are three-phase, three-winding 50-cycle transformers for outdoor erection, with external water and oil circulatory cooling. The following are some particulars referring to them:

No-load voltage:	primary	120,000 V
	secondary	22,000 V
	tertiary	11,000 V
Rating:	primary	31,000 kVA
	secondary	37,500 kVA
	tertiary	30,000 kVA

Fig. 1. — Transformer being loaded into a ship at Bremen by a floating crane.

Dimensions:	Height (over terminals)		6·8 m
	Length		4·7 m
	Width		2·8 m
		net	gross
Total weight including cooling set but without oil:		66,500 kg	71,000 kg
Heaviest piece to be transported (lower part of tank with core, but without upper yoke and under-frame)		44,000 kg	44,000 kg
Weight of oil:		20,000 kg	

These transformers (see illustration inside front cover of this number) were made with two-piece tank and temporary pressing device for the frame and windings, in order to reduce to a minimum the total weight of the heaviest piece to be shipped (see above), while at the same time simplifying the erection on site as much as possible. Due

Fig. 2. — Transformer on the harbour crane while being unloaded at Melbourne.

Fig. 3. — Motor lorries for hauling the transformer through Melbourne.

Aire caliente en el espacio

ANDREAS MOGLESTUE – Los archivos de *ABB Review* representan una gran muestra de las actividades de la empresa a lo largo de los últimos 100 años de su historia. Si bien existen campos en los que BBC y ABB han permanecido activas a lo largo de este período, también existen áreas de productos que se suspendieron o vendieron mientras que otras se volvieron a incorporar a través de la innovación interna o la adquisición de otras empresas. Además, se pueden encontrar artículos especializados en productos raros o excepcionales diseñados específicamente para una aplicación concreta.

El artículo describe un calentador de aire para la investigación espacial que genera un chorro hipersónico de aire, capaz de calentar el aire a 80–100 atmósferas a unos 1.000°C y enviarlo a Mach 12. Este calentador lo fabricó Tecnomasio Brown Boveri S.A. de Milán para el Centro Richerche Aerospaziali de Roma.

El artículo de 1968 de *BBC Review* se refiere a la ingeniería y las pruebas del calentador, pero solo alude a la aplicación. El Centro Ricerche Aerospaziali era, en aquella época, el grupo de investigación aeroespacial de la Universidad de Roma La Sapienza y trabajaba en el programa de lanzamiento de satélites San Marco. Italia lanzó su primer satélite (San Marco 1) en 1964. Se trató de la primera nave espacial que no era soviética ni estadounidense. No obstante, se lanzó desde Wallops Flight Facility en Virginia, Estados Unidos, utilizando un cohete explorador de la NASA y bajo su supervisión. El satélite transportaba una sonda de iones para estudiar la atmósfera y equipamiento para analizar los efectos de la transmisión de radio de largo alcance.

En los años siguientes, los italianos crearon su propia plataforma de lanzamiento de cohetes (llamada también San Marco) cerca de Ras Ngomeni (Kenia), desde la que se lanzaron, como mínimo, 27 cohetes entre 1964 y 1988.

ABB sigue participando en la investigación espacial, por ejemplo, con su espectroscopio en el infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), utilizado en satélites para estudiar la atmósfera.

Esta breve mención de los antecedentes de lo que podría parecer una simple curiosidad ilustra perfectamente la manera en que los logros de ABB han aportado en un contexto más amplio.

Andreas Moglestue estudió ingeniería eléctrica en ETH Zúrich. Trabajó en ABB Semiconductors y también desarrolló software antes de integrarse en el equipo del *Review*.
andreas.moglestue@ch.abb.com

AN AIR HEATER FOR SPACE RESEARCH

621.365:629.78.001.5

An air heater built by Tecnomasio Italiano Brown Boveri S.A. in Milan for experiments in the space research field has been successfully commissioned at the Centro Ricerche Aerospaziali in Rome. With this equipment a high-pressure air flow of 0·5 kg/s can be heated in a few seconds to a final temperature of some 1000 °C. As a result, the jet velocity at the exit nozzle from the duct is twelve times the speed of sound. This article describes the construction and test results.

The Problem

A VERY interesting and original application of an electric air heater has been developed by Tecnomasio Italiano Brown Boveri S.A. of Milan for the Centro Ricerche Aerospaziali in Rome. The heater is used to produce a hypersonic jet of air. The technical problems were considerable, owing to the exacting requirements to be met by the materials of the electrical part and of the sealing system, as these have to operate under extreme conditions.

Air at 80 to 100 atmospheres has to be heated to a temperature of some 1000 °C with the purpose of obtaining a maximum velocity at the exit from the convergent-divergent duct of about Mach 12, which is required for certain types of test.

The difficult question of selecting the correct heat transfer coefficients, which is a determining factor in sizing equipment of this kind, was accompanied by unusual problems of sealing and cooling.

Construction

The principles underlying the design of the air heater shown in Fig. 1 are essentially the same as those usually adopted for normal heaters, inasmuch as the air is brought into direct contact with the heating elements. These are spiral-wound and arranged longitudinally in the flow direction. They are of Kanthal alloy and located in channels in the refractory in a manner which is described more fully below.

The quality and shape of the refractory were the subject of detailed investigation and numerous laboratory tests in order to establish data on thermal expansion and the distribution of electric potential

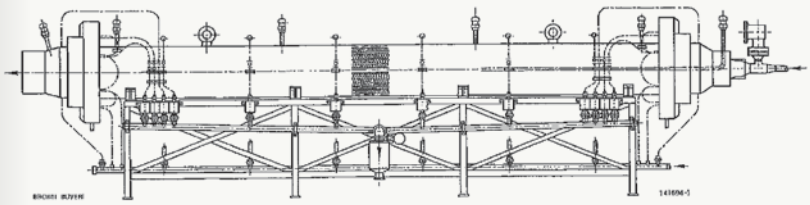


Fig. 1. – Diagram of air heater

Maximum heat output 600 kW, max. pressure 100 atm Maximum air flow rate 0·5 kg/s Maximum temperature 1250 °C

El amanecer del robot

ABB celebra cuarenta años de robótica industrial

DAVID MARSHALL, NICK CHAMBERS – En esta edición del centenario de *ABB Review* se puede celebrar otro aniversario importante: hace 40 años que ABB (entonces ASEA) presentó su primer robot, el ASEA IRB 6, que marcó el inicio de la apasionante historia de ABB en el campo de la robótica. Al ser el primer robot industrial completamente eléctrico controlado por microprocesador que se puso a la venta, el IRB 6 fue una máquina de gran trascendencia histórica. Desde su lanzamiento, el campo de la robótica ha cambiado drásticamente, hasta ser casi irreconocible. Aunque a lo largo de los años se han producido muchos avances revolucionarios, son las tecnologías que han hecho los robots más fáciles de utilizar y de implantar las que más han contribuido a acelerar el ritmo de adopción de la robótica.

Los avances que ha experimentado la tecnología robótica durante las cuatro últimas décadas han sido asombrosos.

Ahora hay robots industriales en entornos discretos de fabricación de todo el mundo. Aumentan la productividad, garantizan una calidad siempre elevada y mejoran la seguridad en el trabajo. Los avances que ha experimentado la tecnología robótica durante las cuatro últimas décadas han sido asombrosos: mientras que antes los robots llevaban a cabo tareas relativamente sencillas y monótonas en entornos peligrosos, ahora sistemas multirrobot sincronizados realizan misiones sofisticadas en celdas de producción flexibles.

Imagen del título
La tecnología robótica ha progresado de forma espectacular en las cuatro últimas décadas, y ahora los robots son mucho más sencillos de implantar y utilizar.

ABB ha desempeñado un papel fundamental en esta revolución del robot.

El primer robot industrial apareció en 1961, un “Unimate” accionado hidráulicamente entregado a General Motors para trabajar en una máquina de fundición a presión. La hidráulica dominaba la robótica hasta que, en 1974, la empresa sueca ASEA (que más tarde se fusionaría con Brown Boveri para formar ABB) desarrolló el IRB 6, el primer robot industrial totalmente eléctrico y controlado por microprocesadores que se comercializó ➔ 1. Esta máquina de 6 kg de capacidad de carga era única, no sólo por su sistema de accionamiento, sino también por su configuración antropomórfica y su uso innovador de un microprocesador para lograr un control preciso.

La hidráulica dominaba la robótica hasta que, en 1974, ASEA desarrolló el IRB 6, el primer robot industrial totalmente eléctrico y controlado por microprocesadores comercializado.

La más reciente incorporación a la gama ABB de robots de pintura es el compacto y nuevo IRB 5500 FlexPainter.

1 Primer cliente del IRB 6: vista de la celda de trabajo

Marcó una nueva referencia en tamaño, velocidad y repetibilidad de los movimientos, y tuvo numerosos imitadores.

La soldadura por puntos pronto se convirtió en un área de aplicación importante, y en 1982 se lanzó el IRB 90, diseñado especialmente para esta tarea. Este dispositivo de seis ejes, con alimentación de agua, aire y electricidad integradas en el brazo, irrumpió con fuerza en el sector de la soldadura por puntos.

Robots para pintar

No tardaron mucho tiempo los robots en llegar al campo de la pintura, y en 1985 ASEA presentó su primer robot pintor eléctrico, el TR 5000. Más tarde, en los años 90 del siglo pasado, ABB inventó el sistema de cartucho (CBS) para pintar componentes en el sector del automóvil. Este sistema utiliza cartuchos de pintura fáciles de sustituir para reducir el desperdicio de pintura y disolvente y, por tanto, los costes y las emisiones, ampliando al mismo tiempo la gama de colores.

La más reciente incorporación a la línea de robots de pintura de ABB es el nuevo y compacto IRB 5500 FlexPainter → 2. El diseño y la configuración únicos del FlexPainter de montaje mural ha creado la mayor y más flexible envolvente de trabajo de un robot de pintura de carrocerías de automóvil. Dos FlexPainter IRB 5500 pueden realizar trabajos que, hasta la fecha, requerían cuatro robots de pintura. Los resultados son menores costes, tanto iniciales como a largo plazo, instalación más rápida, mayor tiempo productivo y mayor fiabilidad.

Mecánica del robot

La elegancia del diseño del IRB 6 era tal que su cinemática antropomórfica básica con movimientos articulares giratorios se mantiene en la gama actual de robots de ABB. Lo que ha cambiado con los años es la velocidad, la precisión y el aprovechamiento del espacio.

Muy pronto, las cajas reductoras sin retroceso sustituyeron a los accionamientos de tornillo de bolas en los ejes de “cadera” y “hombro”, lo que se tradujo en una mejor cinemática espacial. El otro cambio importante fue el paso de los motores de corriente continua (CC) a los de corriente alterna (CA), que son más pequeños, sin escobillas (más fáciles de mantener), más potentes y más duraderos, todas ellas cualidades muy demandadas por los usuarios industriales.

Robots para trabajo pesado

Flexibilidad y adaptabilidad son características constantemente exigidas por los usuarios de robots. En 1991, ABB satisfizo estas exigencias con el IRB 6000 para trabajo pesado (150 kg de capacidad de carga) Diseñado principalmente para soldadura por puntos y manipulación de grandes componentes, el IRB 6000 es un conjunto de módulos de base, de brazo y de muñeca que permiten optimizarlo a la medida de las necesidades de cada usuario, una filosofía de diseño que ABB sigue utilizando. Con unas características atractivas para una gran variedad de clientes, el robot de soldadura por puntos IRB 6000 tuvo un éxito instantáneo. El último modelo de esta familia, el IRB 6700, sigue los pasos del IRB 6000 como robot de altas prestacio-

2 El IRB 5500

3 Un IRB 6700 con LeanID

nes en el segmento de 150 a 300 kg. El IRB 6700 tiene un coste total de propiedad (TCO) un 20 por ciento menor que su predecesor inmediato, el IRB 6640, gracias a un diseño más robusto, unos intervalos de servicio más largos y un mantenimiento más sencillo. La fiabilidad fue una consideración clave en el diseño del IRB 6700, diseñado para un tiempo medio entre fallos (MTBF) de 400.000 horas. Para lograr este nivel de fiabilidad se analizaron todos y cada uno de los informes de fallo del IRB 6640, y las consecuencias extraídas se utilizaron en el diseño del IRB 6700. Con un consumo eléctrico un 15 por ciento menor, también es más respetuoso con el medio ambiente y con la factura de electricidad.

Bien equipado

La fiabilidad del equipamiento de un robot –los cables y tubos que suministran aire, electricidad, líquidos, hilo de soldadura, etc. en el extremo del brazo– es al menos tan importante como el propio robot. En muchos casos, el desgaste del equipamiento es lo que más complica el mantenimiento. Los cables sueltos no sólo se desgastan antes, sino que también limitan el movimiento libre del robot. El equipo totalmente integrado (ID), montado dentro del robot, es caro y puede limitar los materiales o servicios que pude conducir. El nuevo equipamiento ligero de ABB (Lean ID) equilibra coste y durabilidad integrando las partes más expuestas del equipamiento en el interior del robot → 3. Esto hace que la programación y simulación sean más previsibles, ahorra espacio y, al reducir el desgaste, prolonga los intervalos de mantenimiento. El robot más reciente de ABB, el IRB 6700, se ha diseñado con LeanID desde el principio.

Lo pequeño es hermoso

A veces los robots tienen que ser pequeños. El robot industrial multiuso más pequeño de ABB, el IRB 120, pesa solo 25 kg y admite una carga útil de 3 kg (4 kg con muñeca vertical) con un alcance de 580 mm → 4. También se comercializa una versión acabada en blanco para salas limpias ISO 5 (clase 100), certificada por el IPA (Fraunhofer-Institut Produktionstechnik und Automatisierung).

La variante IRB 120T se utiliza para aplicaciones de recogida y colocación que requieren una extrema flexibilidad combinada con una repetibilidad de 10 µm, la mejor del sector. El IRB 120T de seis ejes ofrece un aumento sustancial de las velocidades máximas de los ejes cuatro, cinco y seis, lo que se traduce en una mejora del tiempo de ciclo de hasta un 25 por ciento.

Robots de recogida y colocación de alta velocidad

ABB presentó en 1998 el IRB 340 FlexPicker®, otra referencia histórica por

La elegancia del diseño del IRB 6 era tal que su cinemática antropomórfica básica con movimientos articulares giratorios se mantiene en la gama actual de robots de ABB.

La fiabilidad fue una consideración clave en el diseño del IRB 6700, creado para un tiempo medio entre fallos de 400.000 horas.

4 Un IRB 120 en ABB SACE, en Frosinone

ser el primer robot “estilo delta” para aplicaciones de recogida y colocación. Alcanzaba una impresionante aceleración de 10 G y 150 recogidas por minuto, superando al operario humano en varios órdenes de magnitud en velocidad y versatilidad de manipulación de objetos pequeños, como componentes electrónicos y alimentos.

El software del FlexPicker ofrece una combinación de control de movimientos de alto rendimiento que integra orientación visual y seguimiento de cinta transportadora. El modelo actual de serie (IRB 360) también se comercializa con brazos más largos y varias capacidades de carga de 1 a 8 kg dependiendo de las necesidades, con un radio de acción de hasta 1,6 m ➔ 5. Estas nuevas funciones permiten a la máquina ejecutar acciones de recogida y colocación a mayores distancias que nunca y trabajar satisfactoriamente incluso en la recogida de varios componentes pesados.

Paletización

Un área de aplicación para los robots que ha crecido enormemente en los últimos años es la paletización ➔ 6. El nuevo IRB 460 de ABB es el robot de paletización más rápido del mundo. De tamaño reducido y con una capacidad de elevación de 110 kg, este robot de cuatro ejes ejecuta hasta 2.190 ciclos por hora y es perfecto para la paletización de alta velocidad a final de línea y para la paletización de bolsas. El IRB 460 tiene un radio de acción de 2,4 metros, ocupa un 20 por ciento menos espacio y es un 15% más rápido que sus competidores más próximos.

La oferta moderna de robots se extiende mucho más allá del propio robot y el IRB 460, por ejemplo, está equipado con el paquete de función PalletPack 460. Este paquete es un conjunto de productos prediseñados configurados para la paletización de final de línea que mejora considerablemente la facilidad de uso para los integradores.

Para paletización de alta producción y capa continua, ABB tiene el robot IRB 760. Con una capacidad de carga de 450 kg y un alcance de 3,2 m, este robot presenta una elevada inercia de muñeca, el doble que la competencia, que le permita girar productos más pesados y más grandes más deprisa que cualquier otro robot de su categoría. La mayor velocidad hace que el IRB 760 sea especialmente adecuado para la paletización de varias capas de bebidas, materiales de construcción y productos químicos.

Avances en sistemas de control

En 1974, el sistema de control del IRB 6 tenía solamente un microprocesador Intel 8008 de 8 bits, una interfaz de usuario con un visor LED de cuatro dígitos y 12 botones y un software rudimentario para interpolación de ejes y control de movimientos. El robot precisaba de conocimientos especializados para programarlo y hacerlo funcionar. Cuarenta años y cuatro cambios de generación de sistemas de control más tarde, el panorama ha cambiado por completo: el IRC 5, el controlador robótico de quinta generación de ABB, está específicamente diseñado para que los robots sean más fáciles de usar e integrar en la fábrica ➔ 7.

El IRC5 ofrece un control de movimientos superior e incorporación rápida de otros equipos. Su tecnología de control de movimientos, que incorpora TrueMove y QuickMove, es esencial para el comportamiento del robot en términos de precisión, velocidad, duración del ciclo, programabilidad y sincronización con dispositivos externos. QuickMove calcula la máxima aceleración posible en cada movimiento y la utiliza al menos en un eje para minimizar el tiempo hasta la posición final. TrueMove garantiza que la trayectoria del movimiento es la misma con independencia de la velocidad y evita la necesidad de ajustarla cuando los parámetros de velocidad se modifican en línea. Otras características son el conocido dispositivo de interfaz FlexPendant de ABB con pantalla táctil y programación con palanca tipo joystick, el flexible lenguaje RAPID y potentes capacidades de comunicación.

ABB presentó recientemente una versión más pequeña del IRC5 para aplicaciones en las que el espacio debía reducirse al mínimo, pero garantizando la funcionalidad completa IRC 5.

5 Un IRB 360 en acción

6 Un IRB 660 paletizando bidones de pintura

El componente central del sistema es RobotWare, con varios complementos opcionales diseñados para aumentar la funcionalidad y facilidad de uso para los usuarios de robots. Por ejemplo, multitarea, transferencia de información de un archivo al robot, comunicación con sistemas externos o tareas de movimiento avanzadas.

Una característica destacada de IEC 5 es su función MultiMove, que permite el control de hasta cuatro robots ABB además de posicionadores de trabajo y otros dispositivos servo, con un total de 36 ejes, de forma totalmente coordinada.

Pese a su complejidad, la configuración y el uso de este tipo de celda multirrobot con movimientos totalmente coordinados se hicieron más sencillos con FlexPendant, la primera interfaz abierta robot-operario del mundo, desarrollada para IRC 5.

Seguridad de los robots de última generación

Para garantizar la seguridad de las personas que trabajan con robots industriales, tradicionalmente los seres humanos y los robots estaban separados por vallas, y era necesario emplear un costoso equipo de seguridad. SafeMove de ABB disminuye la necesidad de esos equipos. SafeMove es un ordenador independiente alojado en el armario del IRC5 que permite la vigilancia fiable y con tolerancia a fallos de la velocidad y posición del robot y la detección de toda desviación de la norma no deseada o sospechosa. Si se detecta un riesgo para la seguridad, SafeMove ejecuta una parada de emergencia, que detiene el robot en una fracción de segundo.

FlexFinishing y control de la fuerza

Otro avance reciente es el sistema FlexFinishing de ABB que incorpora control de la fuerza de mecanizado RobotWare para operaciones delicadas, en particular para rectificado, desbarbado y pulido de piezas de fundición. Esta exclusiva aplicación de robótica, presentada por primera vez en 2007, contiene un entorno de programación que permite al robot encontrar por sí mismo la trayectoria óptima. Un bucle de realimentación controla la velocidad y la presión de la herramienta.

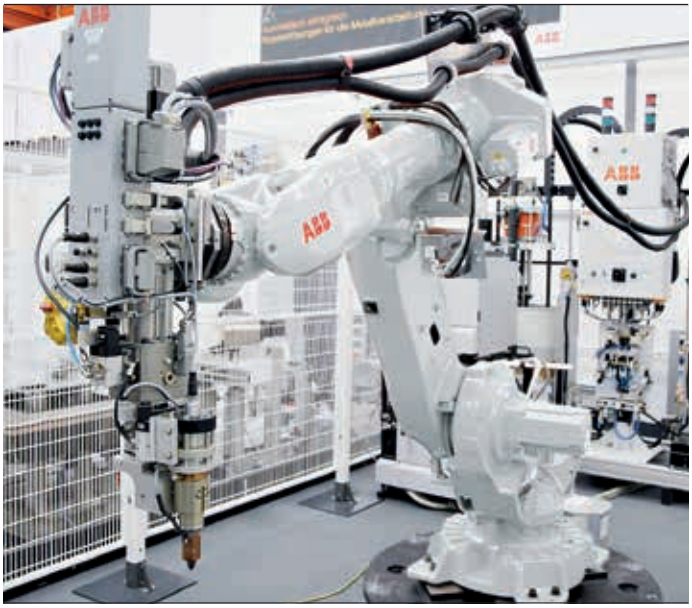
La aplicación permite una programación sencilla y eficaz en la que el sensor de fuerza se utiliza para definir la trayectoria del robot; el operario se limita a mover el robot con la mano para mostrarle la trayectoria aproximada. El robot sigue automáticamente la pieza, registrando la trayectoria exacta y generando un programa de robot.

Este enfoque innovador no solo mejora la calidad de los componentes terminados, sino que además reduce el tiempo total de programación hasta en un 80%, acorta el ciclo del robot en un 20% y prolonga la vida útil de las herramientas de rectificado en un 20%. Se comercializan otros paquetes funcionales para tra-

El nuevo Lean ID de ABB equilibra coste y durabilidad integrando las partes más expuestas del equipamiento en el interior del robot.

7 Controlador IRC 5

8 Paquete para la función de encolado



El software del FlexPicker ofrece una combinación de control de movimientos de alto rendimiento que integra orientación visual y seguimiento de cinta transportadora.

bajo de precisión, como el encolado. El paquete de encolado programa movimientos del robot y dispensación de adhesivo perfectamente coordinados con la cinta transportadora. La aplicación y el encolado de alta precisión y uniformes realizados con robot no solo mejora la calidad de las piezas, sino que además reduce la duración de los ciclos → 8.

Programación por ordenador

A lo largo de los años, ha resultado evidente que la forma más fácil, rápida, precisa y flexible de programar robots es en un ordenador en la oficina, antes de tocar ningún equipo físico en el mundo real.

Esta es la mejor forma de aumentar la rentabilidad de la inversión en sistemas de robots, lo que se traduce en menores costes, acceso más rápido al mercado y productos de gama superior.

ABB RobotStudio permite programar en un ordenador sin tener que construir nada ni interferir con la producción real. Simplifica el proceso de programación de robots y facilita el diseño de soluciones para entornos de producción complejos.

Entre todas las soluciones de programación de robots por ordenador, RobotStudio es única porque se basa en el controlador virtual de ABB, una copia exacta del software real que se ejecuta en los robots ABB de producción. El uso de programas reales de los robots y de archivos de configuración idénticos a los utilizados en la fábrica garantiza que, en el mundo virtual, todo funcione exactamente igual que en el real.

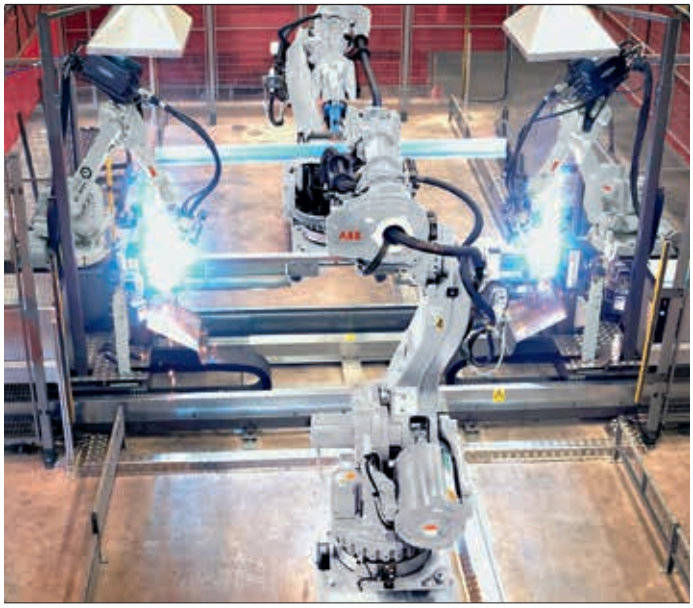
Para los desarrolladores, este método de programación es muy eficaz y puede llevarse a cabo sin la presión del tiempo y sin las limitaciones de la presencia de la maquinaria preexistente. La simplificación de la integración de robots gracias a una programación sencilla ha permitido a clientes e integradores reducir costes y llegar más deprisa al mercado, lo que se traduce en una recuperación de la inversión prácticamente instantánea.

Listo para usar

Las celdas de fabricación normalizadas están eliminando algunas de las últimas barreras que se oponían a la implantación de la robótica. En lugar de construir celdas de robots desde cero, los clientes pueden utilizar el concepto FlexLean de ABB, que ofrece una celda compacta en la que robots, controladores y cableado están premontados en una plataforma. FlexLean ofrece al sector de la automoción celdas de montaje geométrico y de reposición con diversas configuraciones predefinidas y una amplia gama de productos de robótica. Esto se traduce en celdas tan económicas que puede competir con el trabajo manual en países de bajos costes laborales.

Un complemento a la gama de celdas normalizadas es ABB FlexArc®, un completo paquete de soldadura por arco → 9. Incluye todos los componentes necesarios para la soldadura robótica al arco: robots,

9 FlexArc: el paquete de soldadura completo



10 Visión integrada

IEC 5 con soporte para coordinación de varios robots, posicionadores y equipo de soldadura. Los clientes pueden elegir entre distintas soluciones de producción con un robot o con varios. Todos los cables internos se canalizan y conectan en fábrica. Todos los componentes de las celdas están montados en una base común, lo que ahorra la necesidad de trabajos de ingeniería en la planta. El software se ha prediseñado para facilitar la configuración y el funcionamiento. Como solución completa, una celda FlexArc se puede trasladar dentro del centro de producción o incluso a otro. Ello permite a los ingenieros diseñar distribuciones de fábrica muy flexibles que satisfacen la demanda actual de cambios rápidos de configuración.

Visión robótica

Incluso en la última década, la tecnología de la visión ha progresado muchísimo, y ABB se ha dado cuenta de que un sistema robótico potente guiado por la visión puede ayudar a superar muchos problemas de fabricación.

El producto Vision Integrada de ABB, que puede utilizarse en muchos sectores industriales, tiene 50 potentes herramientas de visión, enfoque automático, iluminación y óptica integradas, captura de imagen más rápida, capacidad de alimentar y controlar varias formas de alumbrado exterior y suficiente capacidad de entrada/salida para casi cualquier situación de inspección, todo ello en un paquete IP67 de reducidas dimensiones ➔ 10.

La amplia librería de comandos de visión de Visión Integrada facilita su uso, incluso para quienes manejan sistemas de visión por primera vez. La herramienta de programación fuera de línea 3-D de ABB, RobotStudio, ofrece de serie componentes preparados para una fácil programación del robot y del sistema de visión.

Servicio a distancia

Un rendimiento insuficiente del robot puede afectar de forma sustancial a la producción. Ésta es la razón por la que ABB presentó las tecnologías de servicio a distancia y ahora ha creado un servicio mundial con 1.200 especialistas de servicio en más de 50 países y más de 100 sedes. La base instalada de ABB de más de 230.000 robots ofrece enormes ventajas de escala y permite prestar un servicio de categoría mundial a un coste razonable. Este aspecto es un elemento diferenciador fundamental para ABB en el mercado.

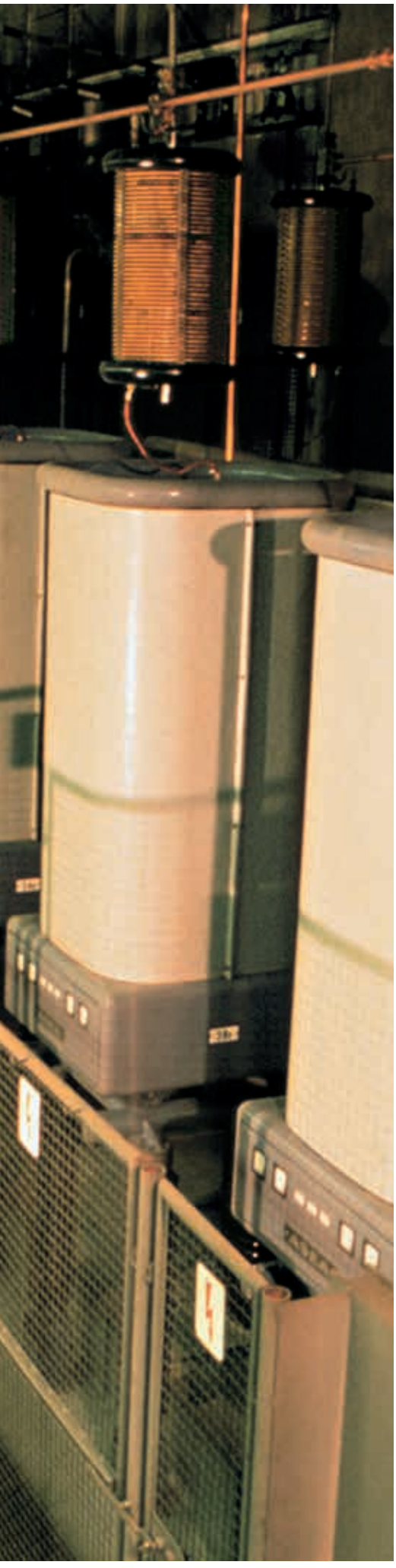
Con el servicio a distancia, los datos del robot se envían desde el controlador a un centro de servicio para su análisis automático y su escrutinio por parte de un experto. El experto puede identificar a distancia la causa del fallo y prestar un servicio rápido al usuario final. Muchos problemas se pueden resolver sin visitar el centro. El análisis automático no solo puede proporcionar una alerta de fallo, sino también predecir dificultades futuras. En cualquier momento y desde cualquier lugar, un usuario puede verificar el estado de los robots y acceder a información importante de mantenimiento sobre el sistema de robots conectándose al portal MyRobot de ABB.

La era del robot industrial

Desde que ASEA presentó en 1974 su primer robot totalmente eléctrico controlado por microprocesador, la robótica industrial ha recorrido un largo camino, y el ritmo de cambio no deja de acelerarse. Este año, ABB espera vender su robot nº 250.000 y se prepara para continuar liderando nuevos avances y crear una completa gama de robots industriales, controladores de robots, software asociado y opciones innovadoras de servicio. En 40 años la precisión de posicionamiento ha mejorado desde 1 mm hasta 10 µm, las interfaces de usuario desde un visor LED de 4 dígitos hasta una pantalla totalmente táctil en Windows y desde una capacidad de memoria de 8 kb a muchos terabytes. Al mismo tiempo, la fiabilidad ha aumentado extraordinariamente, y los costes han bajado en tal medida que, en la actualidad, un robot cuesta menos de la mitad que costaba hace 10 años. Ha llegado la era del robot industrial.

David Marshall
ABB Robotics
Milton Keynes, Reino Unido
david.marshall@gb.abb.com

Nick Chambers
ABB Robotics
Auburn Hills, MI, Estados Unidos
nick.chambers@us.abb.com



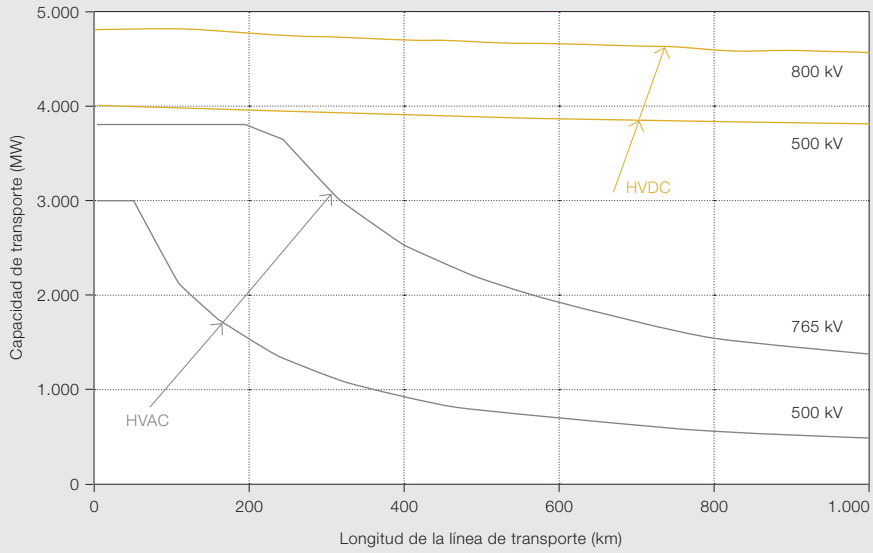
60 años de HVDC

El camino recorrido por ABB desde pionero a líder del mercado

ANDREAS MOGLESTUE – Volviendo la vista al enfrentamiento entre la CC de Edison y la CA de Tesla en la "guerra de las corrientes eléctricas" de la década de 1880, se suele admitir demasiado pronto que la cuestión se resolvió de una vez para siempre. Pero durante los pasados 60 años, la CC, a tensiones más altas de las que Edison pudo imaginar, ha venido realizando una vuelta atrás permanente. Y la HVDC es ahora una parte indispensable de las redes de transporte por todo el mundo y está preparada para expandirse aún a más mercados. La historia de ABB se entrelaza de forma compleja con la de la HVDC. Las empresas predecesoras de ABB abrieron el camino de la tecnología y ABB no sólo se ha consolidado firmemente en la actualidad como líder del mercado, sino que es la única empresa capaz de suministrar todo el arsenal de componentes HVDC, incluyendo la ingeniería en general así como transformadores, estaciones convertidoras, semiconductores, cables y sistemas de control.

Imagen del título
Las primeras válvulas de tiristores para HVDC del mundo (en primer plano) conectadas en serie con el convertidor original (al fondo) en Gotland (aproximadamente en 1970)

1 La energía reactiva limita la distancia a la que es viable el transporte de CA.



El transporte de electricidad a grandes distancias requiere altas tensiones. Dado que las pérdidas óhmicas son proporcionales al cuadrado de la intensidad, cada duplicación de la tensión reduce las pérdidas a la cuarta parte. El modo más sencillo para conseguir los niveles de alta tensión es utilizar transformadores. Pero desgraciadamente para el bando de la CC durante la "Guerra de las corrientes eléctricas", el principio de la transformación únicamente se aplica a la CA. No obstante, el principal defensor de la CC, Thomas Edison, no se rendía fácilmente. En lugar de admitir su derrota basándose en esta simple cuestión de la física, recurrió a un contraataque desde dos frentes. Por un lado, llamó la atención sobre los riesgos para la seguridad por unas tensiones más altas, recurriendo a veces a unos métodos tremendos para despertar la desconfianza entre el público respecto a ellas (en cierta ocasión hizo electrocutar un elefante y también participó en la creación de la primera silla eléctrica). Como alternativa al transporte en alta tensión, Edison propugnaba la generación local. Esto representaba disponer una central eléctrica en las cercanías (al ser el límite para el transporte comercial a 110 V CC de unos 1,6 km). Aunque la contaminación urbana de dichas centrales (teniendo en cuenta especialmente la tecnología de la generación de la época) habría causado problemas, y la sola sugerencia pueda parecer risible desde la perspectiva histórica, la idea de Edison goza actualmente de cierta reivindicación gracias al concepto de la microgeneración, por el que los clientes pueden suministrar electricidad autogenerada (por ejemplo, solar) a la red.

El segundo frente del contraataque de Edison era probar su propia manera de transportar electricidad a tensiones mayores (aparentemente en contra de su activismo contra la alta tensión). En 1889, Edison construyó una línea de 22 km desde Williamette Falls a Portland, Oregón (Estados Unidos) que transportaba unos 130 kW a 4 kV. El nivel de tensión se obtenía mediante la conexión en serie de generadores (un principio que se demostró por primera vez en una exposición en Múnich, Alemania, en 1882). De forma sintomática con la desaparición de la CC, la línea de Oregón iba a tener una corta vida: fue dañada gravemente por una inundación en 1890 y vuelta a reconstruir como instalación de CA por el competidor de Edison, Westinghouse.

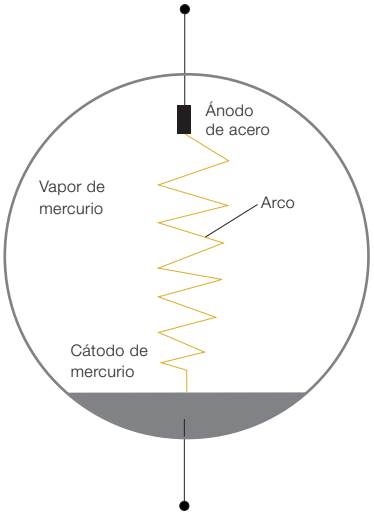
> Ya durante la vida de Edison, la CC iba creciendo en muchos sectores.

Pero la historia del transporte de CC no finalizó con esa inundación. Siguió habiendo todavía 60 clientes conectados al suministro de CC de Edison en la ciudad de Nueva York hasta 2006 (el suministro finalmente se apagó el año siguiente). Pero de forma aún más significativa, ya durante la vida del inventor, la CC estaba creciendo en sectores tales como el transporte por ferrocarril, la fundición de aluminio y las telecomunicaciones, en los que sigue siendo de gran importancia en la actualidad. Nuevas aplicaciones añadidas desde entonces incluyen el procesamiento de datos y la energía fotovoltaica. Sin embargo, por lo que se refiere al transporte y a la distribución, la superioridad de la CA parecía incuestionable. ¿Pero lo era realmente?

Inconvenientes de la CA

A pesar de la rápida adopción de la CA trifásica para el transporte y la distribución, las líneas de CA más largas se enfrentan a inconvenientes. El más importante es el fenómeno de la energía reactiva. La energía reactiva es el flujo de energía que continuamente carga y descarga los campos eléctrico y magnético de la línea para acomodarse a la oscilación periódica de la tensión y la intensidad en la línea. Aunque no se desperdicie directamente (la energía se recupera al descargarse los campos), la intensidad y la tensión adicionales en la línea se restan

2 Válvula de arco de mercurio



3 Uno Lamm, el “padre de la HVDC,” en la sala de control de la HVDC de Gotland

de su capacidad económica útil. Al aumentar la capacitancia y la inductancia con la longitud de la línea, la energía reactiva aumenta igualmente hasta que se alcanza un punto en que el transporte comercial deja de ser viable. Resulta irónico que las leyes de la física que permiten la transformación y posibilitan el transporte de la CA de alta tensión sean las mismas leyes que limitan la distancia a la que resulta útil → 1.

Hay soluciones al problema de la energía reactiva, por ejemplo dispositivos FACTS que compensan la energía reactiva. Sin embargo, el transporte de CC elimina el problema totalmente ya que los campos eléctrico y magnético de la línea son constantes y por lo tanto solamente precisan cargarse cuando se energiza la línea.

Válvulas de arco de mercurio

Los primeros intentos de transporte de CC a tensiones mayores dependían de la conexión en serie de generadores o grupos electrógenos.[1] El principio estaba por tanto limitado a causa de limitaciones mecánicas y no podía competir económicamente con la CA.

El interés en la conversión de la CC resurgió cuando entró en escena una nueva tecnología: la válvula de arco de mercurio.[2] Esta válvula es una bombilla sellada llena de vapor de mercurio que utiliza ánodos de acero y un cátodo de mercurio → 2. Una vez que se inicia un arco entre ánodo y cátodo, la corriente que se genera en el arco produce calor e ioniza el vapor de mercurio. En la interfaz del arco y el mercurio, el bombardeo de iones hace que se liberen electrones. El acero puede absorber electrones pero no libera cantidades importantes de ellos a la temperatura de trabajo. Por tanto, la corriente puede circular desde el acero al mercurio pero no en sentido contrario. La válvula de mercurio presenta así funcionalidad de diodo, haciéndola adecuada para la conversión de CA a CC.

Pero las válvulas de mercurio también pueden realizar la conversión inversa (CC a CA): un disparo artificial del arco (empleando un inductor para aplicar un pico de tensión en un electrodo auxiliar) permite que comience la conducción en un punto arbitrario del ciclo.

Al poder efectuar ambas conversiones, las válvulas de mercurio permitieron utilizar transformadores, combinando por tanto las ventajas de la transformación de la CA con las ventajas del transporte de la CC.

La válvula de arco de mercurio fue probada por primera vez en 1902 por el inventor americano Cooper Hewitt. La empresa predecesora de ABB, BBC

Al aumentar la capacitancia y la inductancia con la longitud de una línea de CA, la energía reactiva aumenta igualmente hasta que se alcanza un punto en que el transporte comercial deja de ser viable.

Notas a pie de página

1 Un grupo electrógeno es un conjunto de motor y generador que comparten el mismo eje. Puede utilizarse una batería de grupos electrógenos para aumentar las tensiones de CC conectando los motores en paralelo pero los generadores en serie.

2 Se discute en mayor extensión sobre las válvulas de arco de mercurio y la contribución de ABB a su desarrollo en “Del arco de mercurio al interruptor híbrido” en ABB review 2/2013, páginas 70–78.

4 Esquema del enlace de Gotland, con la conexión en serie de convertidores en ambas estaciones

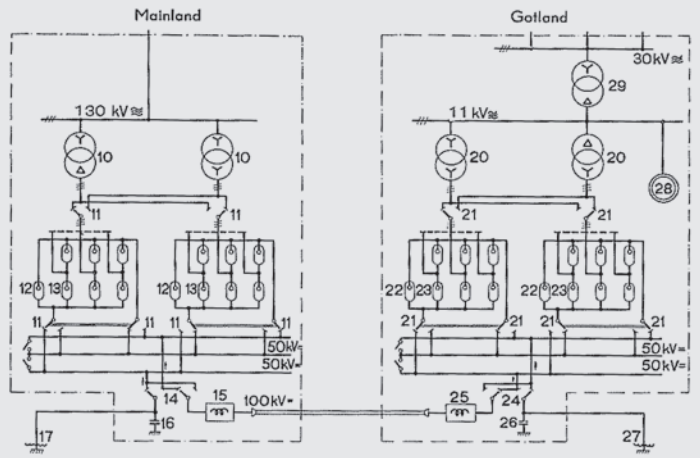


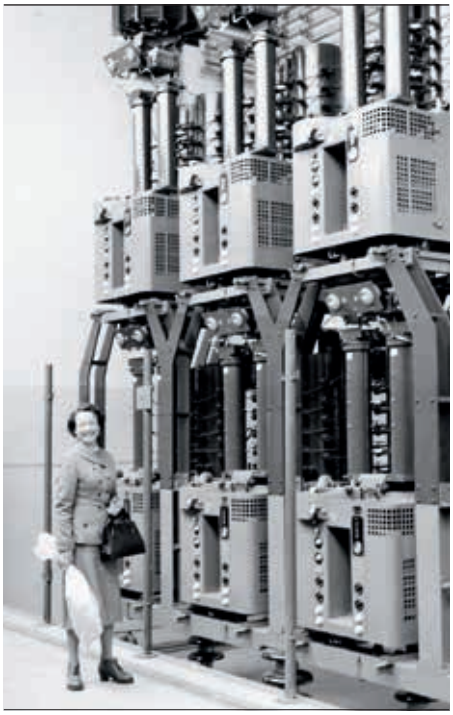
Fig. 1. Main circuits for high voltage D.C. transmission. (Tkh 7301)

10, 20. Three-phase transformers
11, 21. Double-throw isolating switches
12, 22. By-pass valve
13, 23. Six single-phase mercury arc valves
14, 24. Change-over switch
15, 25. Smoothing devices
16, 26. Capacitors for absorbing lightning surges
17, 27. Earth electrodes
28. Synchronous condenser
29. 11/33 kV three-phase transformer

El condensador síncrono (28) estaba destinado a controlar la energía reactiva y asegurar la conmutación local en el lado de Gotland (el enlace sustituía a una central eléctrica local, con lo que no existía conmutación local).

ASEA Journal 1954, página 142

5 Las tres válvulas de un convertidor de Gotland (con Pamela Lamm)



El enlace de Gotland produjo muchos problemas nuevos a ASEA, el menor de los cuales no fue el cruce del mar.

(Brown, Boveri y Cia.), fue líder en su desarrollo, empezando su comercialización en 1913. No obstante, las primeras instalaciones no estaban destinadas al transporte de CC sino que se utilizaron para rectificar tensiones más bajas (hasta unos 2.500 V) en aplicaciones industriales y de transporte.[3]

Uno de los problemas que aparecieron al aumentar las tensiones fue el del retroceso del arco. Se produce un retroceso de arco cuando una tensión inversa a través de una válvula no encendida dispara un arco involuntario en sentido contrario. Esto no sólo provoca un fallo del circuito sino que puede causar daños permanentes en la válvula. Fue otra de las empresas predecesoras de ABB, ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget), la que proporcionaría el siguiente avance. En 1929, se concedió una patente a Uno Lamm → 3 para controlar el retroceso de arco mediante la utilización de electrodos de distribución. Estos son electrodos intermedios conectados a un divisor de tensión para impedir que se forme un arco eléctrico entre ánodo y cátodo en una sola acción. Por este trabajo y sus consecuencias, se suele llamar a Lamm "el padre de la HVDC".

A pesar de esta patente, el camino desde la idea básica a una ejecución fiable fue largo. Debido al comportamiento, a menudo impredecible, de los arcos, el desarrollo de la válvula fue en gran medida un proceso de investigación empírica. Para no desestabilizar la red eléctrica en la ciudad de Ludvika (donde se encontraba el laboratorio de desarrollo), a veces había que limitar las pruebas de alta energía a horas nocturnas.

La Swedish State Power Board (SSPB, ahora Vattenfall) siguió con interés el progreso de ASEA. A principios de la década de 1940, la tecnología estaba lo suficientemente madura como para construir una estación convertidora de prueba. Se seleccionó Trollhät-tan como ubicación para ello (debido a la central eléctrica contigua). La construcción se inició en 1943, empezando el funcionamiento en 1945. Se construyó una línea de 50 km, 6,5 MW, 90 kV hasta Mellerud, donde se añadió otra estación convertidora. Esta línea de transporte fue diseñada exclusivamente para fines de prueba, una función que siguió cumpliendo hasta su baja en servicio a finales de la década de 1960.

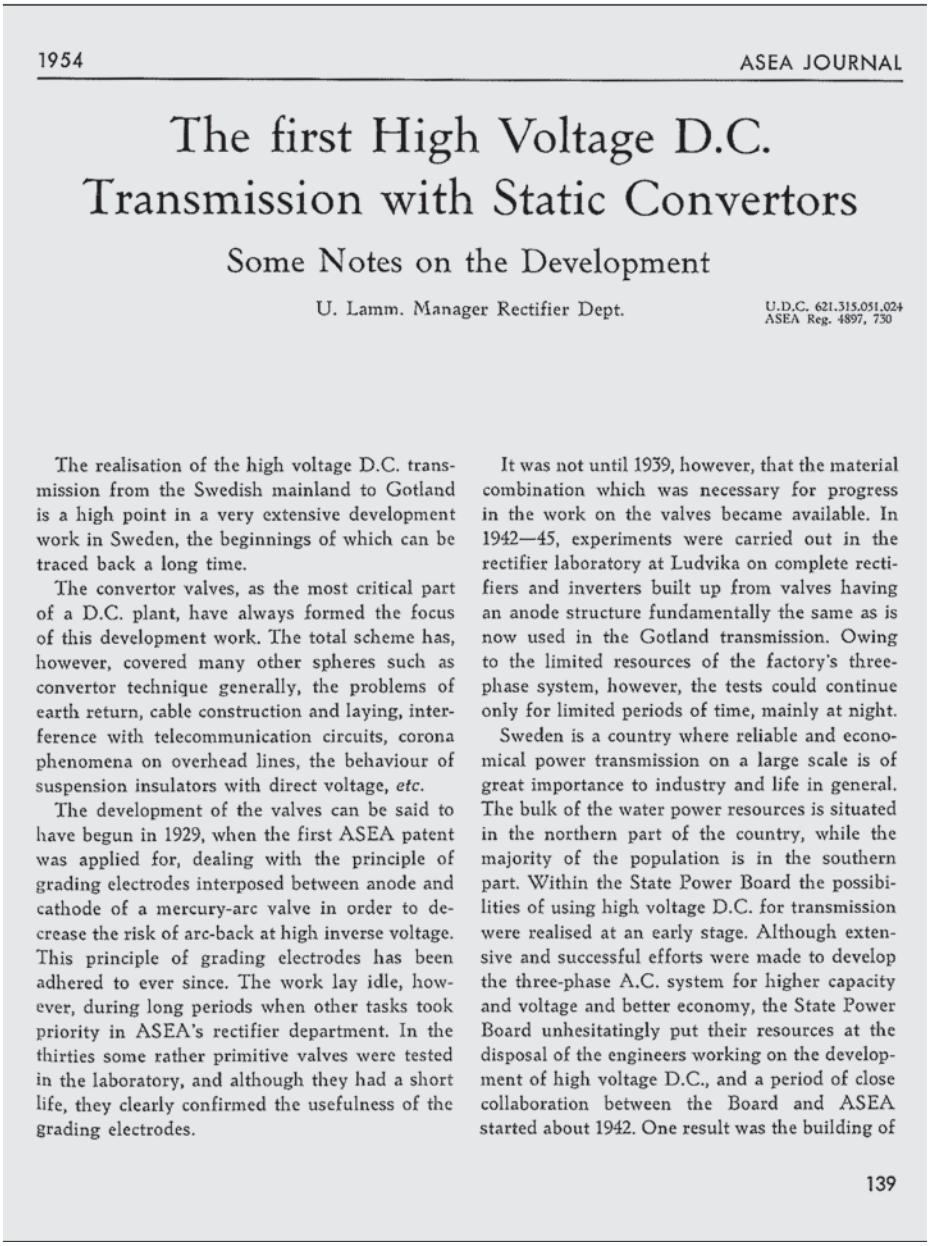
Gotland

En 1950, el parlamento sueco aprobó un enlace de HVDC entre la isla de Gotland y el territorio continental sueco → 4–5. Este enlace produjo muchos problemas nuevos a ASEA, el menor de los cuales no fue el cruce del mar. Para ello, se desarrolló un cable submarino.

Nota a pie de página

3 Sin embargo, BBC efectuó la demostración de un transporte de CC provisional en 1939. Transmitió 500 kW a 50 kV a lo largo de 25 km entre Wettingen y Zúrich en Suiza.

6 Primera página del artículo de Lammen en el ASEA Journal de 1954, que presentaba el enlace de Gotland



1954 ASEA JOURNAL

The first High Voltage D.C. Transmission with Static Convertors

Some Notes on the Development

U. Lamm. Manager Rectifier Dept.

U.D.C. 621.315.051.024
ASEA Reg. 4897, 730

The realisation of the high voltage D.C. transmission from the Swedish mainland to Gotland is a high point in a very extensive development work in Sweden, the beginnings of which can be traced back a long time.

The convertor valves, as the most critical part of a D.C. plant, have always formed the focus of this development work. The total scheme has, however, covered many other spheres such as convertor technique generally, the problems of earth return, cable construction and laying, interference with telecommunication circuits, corona phenomena on overhead lines, the behaviour of suspension insulators with direct voltage, *etc.*

The development of the valves can be said to have begun in 1929, when the first ASEA patent was applied for, dealing with the principle of grading electrodes interposed between anode and cathode of a mercury-arc valve in order to decrease the risk of arc-back at high inverse voltage. This principle of grading electrodes has been adhered to ever since. The work lay idle, however, during long periods when other tasks took priority in ASEA's rectifier department. In the thirties some rather primitive valves were tested in the laboratory, and although they had a short life, they clearly confirmed the usefulness of the grading electrodes.

It was not until 1939, however, that the material combination which was necessary for progress in the work on the valves became available. In 1942—45, experiments were carried out in the rectifier laboratory at Ludvika on complete rectifiers and inverters built up from valves having an anode structure fundamentally the same as is now used in the Gotland transmission. Owing to the limited resources of the factory's three-phase system, however, the tests could continue only for limited periods of time, mainly at night.

Sweden is a country where reliable and economical power transmission on a large scale is of great importance to industry and life in general. The bulk of the water power resources is situated in the northern part of the country, while the majority of the population is in the southern part. Within the State Power Board the possibilities of using high voltage D.C. for transmission were realised at an early stage. Although extensive and successful efforts were made to develop the three-phase A.C. system for higher capacity and voltage and better economy, the State Power Board unhesitatingly put their resources at the disposal of the engineers working on the development of high voltage D.C., and a period of close collaboration between the Board and ASEA started about 1942. One result was the building of

139

El 7 de marzo de 1954, se activó el enlace de 200 A, inicialmente a 50 kV. Se duplicó a 100 kV el 26 de julio, cuando se añadió el segundo par de convertidores en serie. Había comenzado la era de la HVDC comercial.

La publicación ASEA *Journal* puso de relieve el evento con un artículo escrito por el propio Lamm → 6. Comienza con las palabras:

"La realización del transporte de CC de alta tensión desde el territorio continental de Suecia a Gotland es un punto destacado en el completo trabajo de desarrollo en Suecia, cuyo comienzo se remonta a hace mucho tiempo".

"Las válvulas del convertidor, como la parte más crítica de una planta de CC, siempre han constituido el punto focal de este trabajo de desarrollo. Sin embargo, el plan completo ha cubierto muchas otras esferas tales como la técnica general de convertidores, los problemas de retorno por tierra, la construcción y el tendido de cables, la interferencia con circuitos de telecomunicaciones, los fenómenos de corona en tendidos aéreos, el comportamiento de los aisladores de suspensión con tensión continua, etc."

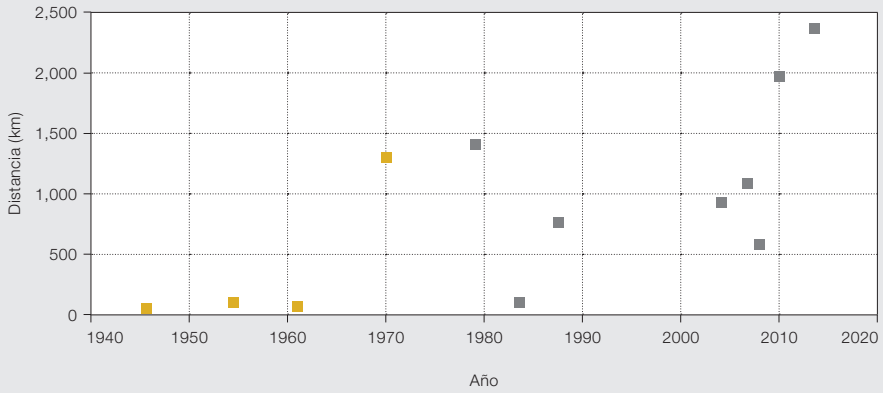
El último párrafo no estaría fuera de lugar en ninguna publicación sobre HVDC de los últimos 60 años. Los principios básicos establecidos para Gotland siguen siendo válidos actualmente, cuando

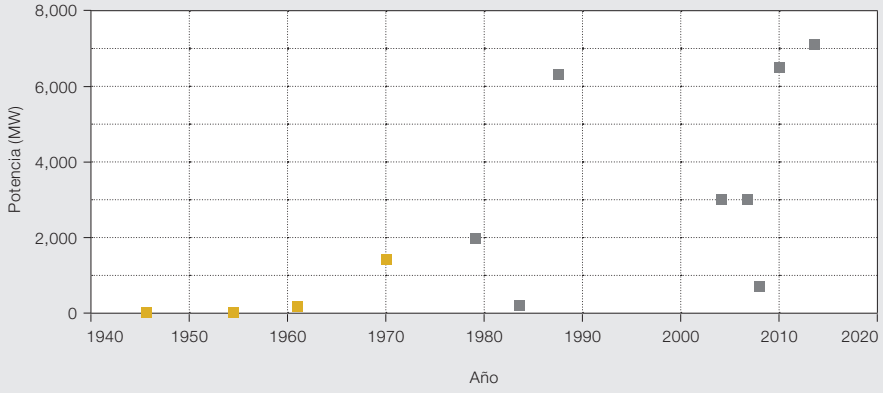
Los laboratorios de ASEA iniciaron el desarrollo de tiristores a mediados del decenio de 1960.

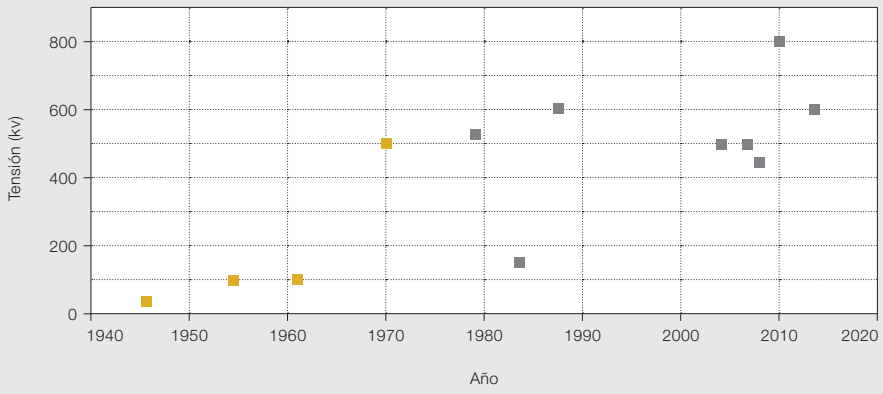
Como alternativa al transporte en alta tensión, Edison promovía la generación local.

7 Una selección entre muchos proyectos de HVDC entregados por ABB. La compañía ha suministrado más de la mitad de los 170 proyectos de todo el mundo.

Año	Proyecto	Convertidores	Distancia (km)	Potencia (MW)	Tensión (kV)
1946	Trollhattan – Mellerud (línea de prueba)	Válvulas de arco de mercurio	50	6,5	45
1954	Gotland 1		98	20	100
1961	Canal de la Mancha		64	160	100
1970	Pacific Intertie		1300	1,440	500
1979	Cahora Bassa	Silicio	1420	1,920	533
1983	Gotland 2		99	130	150
1987	Itaipu		780	6,300	600
2004	Tres Gargantas – Guangdong		940	3,000	500
2007	Tres Gargantas a Shanghai		1060	3,000	500
2008	NorNed		580	700	450
2010	Xiangjiaba – Shanghai		1980	6,400	800
2013	Rio Madeira		2375	7,100	600







8 Uno de los primeros convertidores basados en tiristores de ASEA

En lugar de utilizar válvulas de tiristores, HVDC Light utiliza convertidores de fuente de tensión (VSC) con IGBT, una tecnología derivada de la que se utiliza en los accionamientos industriales.

ASEA (y posteriormente ABB) han acumulado experiencia en todas las áreas mencionadas. De hecho, ABB es actualmente la única empresa en el mundo que puede proporcionar como único proveedor todos los componentes de un sistema HVDC, desde transformadores, estaciones convertidoras y sus componentes hasta los cables, sistemas de control y, más recientemente, interruptores.

El segundo proyecto de HVDC comercial de ASEA fue un enlace de 160 MW entre Gran Bretaña y Francia, inaugurado en 1961. Otros proyectos, de Escandinavia a Italia, Japón, Canadá y Nueva Zelanda, continuaron en los años sesenta, varios de los cuales precisaron de nuevo el cruce del mar mediante cables. La culminación del desarrollo de HVDC basado en arco de mercurio fue el Pacific Intertie, un enlace de 1.300 km, 1.440 MW (elevado hasta 1.600 MW en 1982) y 500 kV entre Celio (Oregón) y Sylmar (sur de California), construido conjuntamente con General Electric (GE) e inaugurado en 1970.

Hasta el abandono del desarrollo de las válvulas de arco de mercurio en 1971, ASEA las había utilizado en los enlaces con una potencia total de 3.400 MW → 7.

Tiristores

En el decenio de 1960, entró en escena un nuevo tipo de válvula, destinado en definitiva a desplazar la tecnología del arco de mercurio → 8.

El principio del tiristor fue propuesto por primera vez por William Shockley en 1950. Un tiristor es un dispositivo semiconductor con tres terminales (ánodo, cátodo y puerta). Como en un diodo de semiconductores, la corriente circula en una sola dirección, con una tensión inversa que agota los portadores de carga de la zona de unión. El tiristor tiene capas adicionales entre las zonas p y n que normalmente también impiden la conducción, pero la aplicación de una corriente de disparo a la puerta inunda esta zona con portadores de carga y permite la conducción. Una vez que se inicia la conducción, la producción de portadores de carga se hace automantenible y se puede retirar la corriente de puerta. La conducción no cesa hasta que la corriente principal no cae por debajo de un valor umbral. De esa forma, la funcionalidad general es comparable a la de una válvula de arco de mercurio con función de disparo, pero con la ventaja de ser mucho más compacto, tener menores pérdidas y eliminar los riesgos inherentes al manejo de mercurio además de ser adecuado para la conexión en serie de múltiples dispositivos a fin de crear válvulas para tensiones más altas.

ASEA inició el desarrollo de tiristores a mediados de la década de 1960. En 1967, se incorporó una estación convertidora de prueba al enlace de Gotland. En 1970, se añadieron convertidores de tiristores en serie a las estaciones existentes de arco de mercurio → imagen del título, elevando la tensión de trabajo a 150 kV

Ya en 1992, ABB propuso una red de líneas de HVDC como una cobertura de la red eléctrica existente, aliviándola de los transportes masivos a grandes distancias.

9 Estación Jingzhou del enlace HVDC de las Tres Gargantas

(conservando el cable original, que no tenía ninguna dificultad para soportar la mayor tensión.) [4]

Los proyectos de HVDC entregados durante los años setenta incluyen el enlace Skagerak entre Noruega y Dinamarca, Inga-Shaba en el Congo, el proyecto CU en Dakota del Norte, Estados Unidos y Nelson River 2 en Canadá.

Durante la era del arco de mercurio, ASEA había estado prácticamente sola en el mercado de HVDC, pero la innovación revolucionaria que supuso la mayor sencillez del trabajo con tiristores permitió la aparición de muchos nuevos competidores. BBC, por ejemplo, se asoció con Siemens y AEG para suministrar el enlace Cahora Bassa entre Mozambique y Sudáfrica a mediados del decenio de 1970. ASEA respondió a la nueva competencia invirtiendo en investigación para consolidar su liderazgo en los tiristores de HVDC.

Un proyecto sin precedentes de la década de 1980 fue el enlace de 6.300 MW de Itaipu en Brasil, adjudicado a un consorcio de ASEA y PROMON, que entró en servicio por fases entre 1984 y 1987. El proyecto de 2.000 MW Quebec-Nueva Inglaterra entregado aproximadamente al mismo tiempo fue el primer enlace de HVDC multiterminal del mundo.

En 1988, ASEA y BBC se unieron para formar ABB. En 1995, la compañía presentó una estación convertidora de nueva generación. Una característica fundamental era el uso de convertidores conmutados por condensadores (CCC), que permiten el apagado de las válvulas en lugar de tener que esperar a que se produzca un pase por cero de la corriente. Este fue el cambio más fundamental en la conmutación desde 1954, y permitió una mejora del control y reducción de la energía reactiva. El primer proyecto en emplear esta tecnología fue la interconexión de 2.200 MW Brasil – Argentina (Garabi) en 1999.

ABB siguió aumentando los niveles de tensión y potencia. En 2004, se inauguró el enlace de HVDC Tres Gargantas – Guangdong (China), que transmite 3.000 MW a lo largo de 940 km a ±500 kV → 9. En 2007, un enlace de 1.060 km de las mismas prestaciones conectó Tres Gargantas con Shanghai. En 2010, entró en servicio el enlace Xiangjiaba – Shanghai de ±800 kV, 6.400 MW y 1.980 km en UHVDC (CC de ultra alta tensión). En 2013, el enlace de Río Madeira en Brasil comenzó a transportar 7.100 MW a lo largo de 2.375 km.

Pero la HVDC no trata únicamente de que potencias cada vez mayores cubran distancias cada vez más grandes. Siguiendo la tradición del enlace de Gotland, la HVDC también es muy adecuada para conexiones submarinas, donde ya presenta ventajas con respecto a la HVAC en distancias medidas en decenas de kilómetros (debido a la mayor capacitancia de los cables enfundados frente a las líneas) → 10. Por ejemplo, en 2008, el

Nota a pie de página

4 El enlace Gotland 1 siguió utilizándose hasta 1986. Actualmente la isla está conectada mediante dos enlaces de HVDC, Gotland 2 y 3, puestos en servicio en 1983 y 1987, respectivamente, con una capacidad total de 260 MW.

10 Carga en un buque del cable del enlace de HVDC Fenno-Scan. El enlace se terminó en 1989

11 Izado de un módulo HVDC Light a su emplazamiento en una plataforma petrolífera del Mar del Norte.

enlace NorNed salvó los 580 km entre Noruega y los Países Bajos.

A menor escala

En una escala menor, la HVDC también puede utilizarse para conectar parques eólicos situados mar adentro o suministrar energía eléctrica a plataformas petrolíferas y de gas → 11. Para las clases de menor potencia, ABB presentó HVDC Light® en los años noventa. En lugar de utilizar válvulas de tiristores, HVDC Light utiliza convertidores de fuente de tensión (VSC) con IGBT, una tecnología derivada de la que se utiliza en los accionamientos industriales. La mayor facilidad de control, capacidad de control de la energía reactiva y capacidad de arranque sin energía suministrada del HVDC Light representa que se puede conectar a redes insulares sin conmutación local, pero también se puede usar para reducir la presión sobre redes de CA existentes o estabilizarlas. El diseño compacto de HVDC Light permite instalar estaciones convertidoras dentro de contenedores y entregarlos en el emplazamiento en una sola pieza, simplificando la prueba y la puesta en servicio.

La red de HVDC

Muchos de los nuevos desafíos se refieren a las redes eléctricas del futuro. La transformación radical del panorama de la generación no es el menor de ellos. Las centrales eléctricas clásicas se construyeron principalmente cerca de los centros de consumo, pero el rápido aumento de la participación en la oferta por parte de las renovables significa que cada vez más energía procede de regiones más remotas. Esta energía debe transmitirse a grandes distancias, a menudo a través de zonas donde la red tradicional es débil e incapaz de soportar la carga añadida. Ya en 1992, Gunnar Asplund de ABB propuso una red de líneas de HVDC como cobertura de la red eléctrica existente, aliviándola de los transportes masivos a grandes distancias.

Pero la construcción de una red de CC no es tan sencilla como pueda parecer. El principal obstáculo técnico era la falta de un interruptor adecuado. En las redes de CA, se utilizan interruptores para aislar de forma rápida y segura cualquier sección de la línea, por ejemplo, en caso de fallo, sin afectar al resto de la red. Cuando se abre un interruptor de CA, un arco continúa conduciendo la corriente entre los contactos hasta el siguiente paso por cero. Al no disponer la CC de este útil paso por el valor nulo de la corriente, se necesita un enfoque diferente, y esto ha impedido durante mucho tiempo el desarrollo de topologías de red de HVDC más complejas. ABB resolvió por fin este enigma en 2012. El interruptor híbrido utiliza una combinación de semiconductores y conmutadores mecánicos para romper el flujo de CC de forma segura y oportuna.[5]

¿CC o CA?

Entonces, ¿quién ganó realmente la "guerra de las corrientes eléctricas"? La CC avanza hacia terrenos que han sido tradicionalmente aplicaciones de CA, pero nunca puede sustituir del todo la CA. Quizá, más de 120 años después, podemos proclamar un empate: los libros de historia del futuro otorgarán reconocimiento tanto a Tesla como a Edison.

Andreas Moglestue
ABB Review
Zúrich, Suiza
andreas.moglestue@ch.abb.com

Nota a pie de página

5 Consulte también "Innovación revolucionaria. El interruptor HVDC híbrido de ABB es una innovación revolucionaria que abre el camino a las redes HVDC fiables" en *ABB review* 2/2013 pp. 6–13.

Lecturas recomendadas

U. Lamm, The First High Voltage D.C. Transmission with Static Convertors: Some Notes on the Development, *ASEA Journal* 1954. páginas 139–140.

I. Lidén, E. Uhlmann, S. Svidén, The Gotland D.C. Link: The Layout of the Plant, *ASEA Journal* 1954, páginas 141-154.

R. Wetzel, Die Geschichte des Quecksilberdampfgleichrichters bei BBC Deutschland 1913–1963, Tesis doctoral, Universidad de Stuttgart, 2001

G. Asplund, L. Carlsson, O. Tollerz, 50 años de HVDC – ABB de pionero a líder mundial, Partes 1 y 2, *ABB review* 4/2003, páginas 6–13.

L. Haglöf, P. Danfors, HVDC Veterans Presentation, Visby Gotland, 2004.

H. R. Zeller, Los chips ganadores. Historia de los semiconductores de potencia de ABB, *ABB review* 3/2008, páginas 72–78

G. Asplund, L. Carlsson, HVDC: ABB – de pionero a líder mundial, *ABB review* 4/2008, páginas 59–64.

Rendimiento en el bombeo

Un convertidor de 100 MW para la central de bombeo para reserva de energía Grimsel 2

HANS SCHLUNEGGER – La hidroeléctrica es una de las formas más antiguas de generación de energía y también una de las más flexibles. Puesto que el agua puede recogerse en un depósito y liberarse cuando sea necesario, es ideal para adaptarse a las fluctuaciones de la demanda. Cuando se combina con un almacenamiento por bombeo (lo que quiere decir que el exceso de energía eléctrica se almacena bombeando agua al depósito), su función de almacenamiento puede ampliarse y utilizarse además para el control de la red absorbiendo o generando la energía necesaria para estabilizarla. A fin de operar más eficientemente en el modo de bombeo, la central Grimsel 2 de Kraftwerke Oberhasli (KWO) (en la región de Oberland bernesa en los Alpes suizos) ha puesto en servicio un convertidor de 100 MW suministrado por ABB.

Imagen del título
Kraftwerke Oberhasli es un complejo de nueve centrales eléctricas situadas en la región de Oberland bernesa en los Alpes suizos. Las centrales tienen una capacidad total de generación de 1.125 MW y una producción anual de 2.200 GWh. Los lagos tienen un caudal afluente combinado de 700 millones de m^3/año y una capacidad de almacenamiento de 200 millones de m^3.

Con 100 MVA, la instalación de Grimsel 2 es el más potente convertidor de accionamiento con tensión en el enlace de CC entregado hasta la fecha.

El almacenamiento por bombeo se utiliza en lo que se denomina suavizado de picos: la energía es absorbida mediante bombeo en los momentos de demanda baja (normalmente por la noche) y la energía almacenada se vuelve a convertir en electricidad en los momentos de demanda máxima. Gracias a la reducción de los picos y valles extremos de la curva de demanda, el almacenamiento por bombeo reduce la dependencia de otras fuentes de energía (a menudo contaminante) necesarias para cubrir los picos de demanda.

Además de salvar esta clásica brecha entre el día y la noche, la energía acumulada bombeada ayuda asimismo a integrar las energías renovables. Con la introducción creciente en la red de una energía eléctrica solar o eólica, el almacenamiento por bombeo puede compensar su imprevisibilidad y variabilidad, permitiendo a los usuarios seguir usando energía procedente de fuentes renovables aunque no haga sol ni sople el viento.

Por otro lado, más allá de su estricta misión de almacenamiento bruto, las centrales de bombeo para reserva de energía también contribuyen al control de la red produciendo o absorbiendo cantidades relativamente pequeñas de energía necesarias para equilibrar con mayor precisión la oferta y la demanda. Para hacer esto de forma eficiente, hay que regular con gran precisión la energía.

Grimsel 2

La central de almacenamiento por bombeo Grimsel de KWO en Suiza → 1–2 tiene cuatro generadores síncronos → 3. Hasta hace poco, la capacidad de la central para regular la potencia dependía de la puesta en marcha y el apagado de estas unidades individuales. Cuando se requieren niveles intermedios de absorción de energía, la diferencia sólo podía conseguirse haciendo funcionar otra unidad en modo de generador. El bombeo y la generación simultáneos no sólo suponen un uso ineficiente de la energía, sino también el desperdicio del activo más valioso de la central: el agua.

Para regular la captación de energía de la central de forma más eficiente, KWO decidió equipar a uno de los generadores de Grimsel 2 con un accionamiento de electrónica de potencia. ABB consiguió el pedido en 2010, con la instalación puesta en servicio en 2013.

El convertidor

Con 100 MVA, la instalación de Grimsel 2 es el más potente convertidor de accionamiento con tensión en el enlace de CC entregado hasta la fecha → 4. Está compuesto por dos unidades de 50 MW, cada una con sus propios transformadores de entrada y salida → 5, y está conectado en serie en los lados del generador y de la red. A su vez, cada uno de estos convertidores utiliza pares de módulos bifásicos conectados en paralelo utilizando IGCT (tiristores controlados por puerta integrada). La instalación incorpora por tanto en su conjunto 24 módulos bifásicos.

La potencia de la unidad varía continuamente entre 60 y 100 MW (el límite inferior viene determinado por el riesgo de cavitación en el impulsor de la bomba).

Arranque

En funcionamiento de turbina y modo de bombeo no regulado, el conjunto de la máquina se pone en marcha con la turbina → 6. El transformador de bloque es magnetizado por el generador y se conecta al nivel de 220 kV después de alcanzar las condiciones de sincronización. En el modo de bombeo regulado, el transformador de bloque y los dos transformadores convertidores del lado de la línea ten-

1 Central de bombeo de Grimsel 2

Potencia de funcionamiento de turbinas	4 × 80 MW
Potencia de funcionamiento de bombas	4 × 90 MW
Promedio de diferencia de alturas	400 m
Caudal hidráulico	4 × 22 m³/s
Régimen síncrono	750 rpm
Años de construcción	1973-80

2 Grimsel 2: un vistazo a los lagos

	Nombre	Altura sobre el nivel del mar, lleno (m)	Volumen, lleno (106 m³)	Superficie (km²)	Profundidad mayor (m)
Embalse superior	Lago Oberaar	2,303	58	1.47	90
Embalse inferior	Lago Grimsel	1,908	101	2.63	100

3 La central Grimsel 2 tiene cuatro generadores síncronos

4 El convertidor de 100 MW

drían que estar conectados directamente, lo que provocaría picos de corriente de irrupción muy altos. Para evitarlo, el enlace de CC del convertidor de frecuencia es activado por el transformador de arranque a través de los diodos de los convertidores en el lado del motor. Los transformadores son después magnetizados por el convertidor del lado de la línea y posteriormente sincronizados. Todo el procedimiento de arranque requiere sólo unos 10 s, después de lo cual la máquina es acelerada por el convertidor a 600 rpm con la bomba alimentada de agua actuando contra la válvula esférica cerrada ➔ 6d. Una vez abierta la válvula esférica, la velocidad se ajusta a unas 690 rpm de acuerdo con la potencia mínima requerida por la carga de trabajo actual.

Control de la potencia

La potencia activa se fija manualmente o por el sistema de control de centrales de nivel superior, que ajusta la potencia de todas las centrales eléctricas de KWO para cumplir con la programación de carga. El punto de consigna de regulación del lado de la línea se une al punto de consigna del programa de carga. La potencia del convertidor y el control de velocidad se configuran en serie, limitándose la potencia activa por la carga de bombeo actual y la capacidad máxima de potencia del convertidor.

La potencia reactiva se regula con un bucle de control de la tensión, fijado manualmente o por el sistema de control de la tensión de la línea de 220 kV de nivel superior. La potencia activa tiene preferencia sobre la reactiva.

Modos de operación

Pueden utilizarse los siguientes modos:

- Turbina
- Bombeo sin convertidor (rpm constantes)
- Bombeo con convertidor (rpm variables)
- Corrección del ángulo de fase empleando convertidor

No se ha tenido en cuenta el funcionamiento de la turbina con convertidor, porque el ajuste de la velocidad de las turbinas de Francis a los valores de carga, relativamente pequeños, no compensaría las pérdidas en el convertidor.

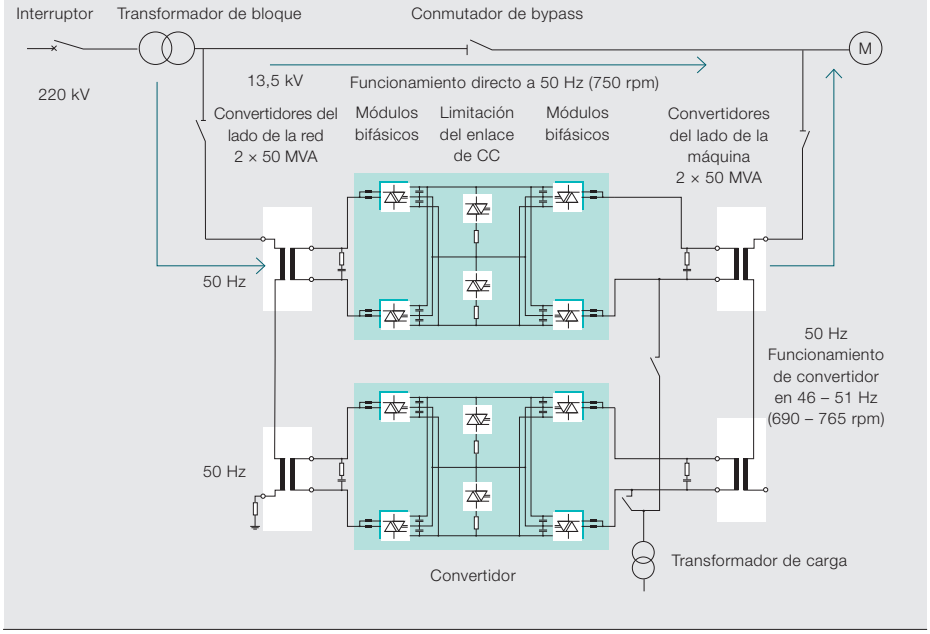
Ejecución de proyectos

El programa de entrega e instalación de convertidores se ajustaba al trabajo de

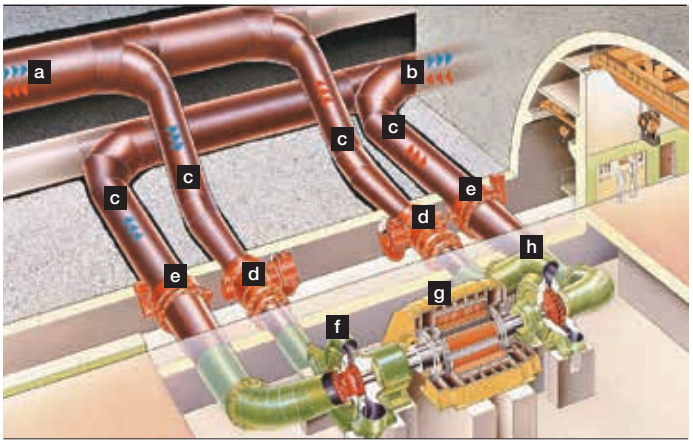
A finales de marzo de 2014, el convertidor había proporcionado 3.500 horas de bombeo controlado y 850 horas de funcionamiento de condensadores síncronos de fase.

Las nuevas centrales de bombeo para reserva de energía están equipadas para trabajo a velocidad variable con motores asíncronos doblemente alimentados.

5 Esquema del convertidor

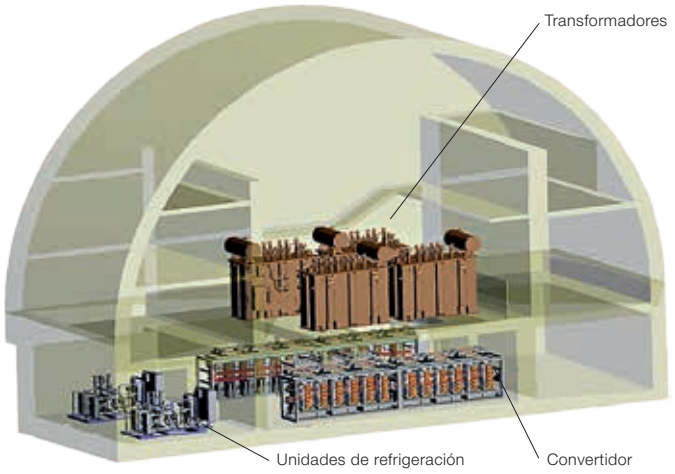


6 La turbina y sus conexiones



a Eje de presión a/desde el Lago Oberaar
b Eje de presión a/desde el Lago Grimsel
c Conductos de conexión
d Válvula esférica
e Mariposa
f Turbina
g Bomba
h Generador / Motor
▸▸▸ Funcionamiento de la turbina
◂◂◂ Funcionamiento del bombeo

7 La sala de máquinas con los transformadores y el convertidor



renovación que tuvo lugar al mismo tiempo. Esto cubría: la revisión general de la maquinaria hidráulica, la válvula esférica y la válvula de mariposa, la renovación de los sistemas de instrumentación y control, la sustitución del equipo de regulador y excitación de la turbina y la sustitución de la aparamenta de 220 kV.

Se disponía del espacio suficiente en la caverna existente para todo el sistema de convertidor ➔ 7. Los cuatro transformadores se instalaron en la cota del suelo de la sala de máquinas y las unidades de convertidor en la planta subterránea, donde está también instalada la red existente de agua de refrigeración de la central.

Experiencia operativa

La instalación ha estado en servicio desde mayo de 2013. A finales de marzo de 2014 había proporcionado 3.500 horas de bombeo controlado y 850 horas de funcionamiento de condensadores síncronos de fase ➔ 9.

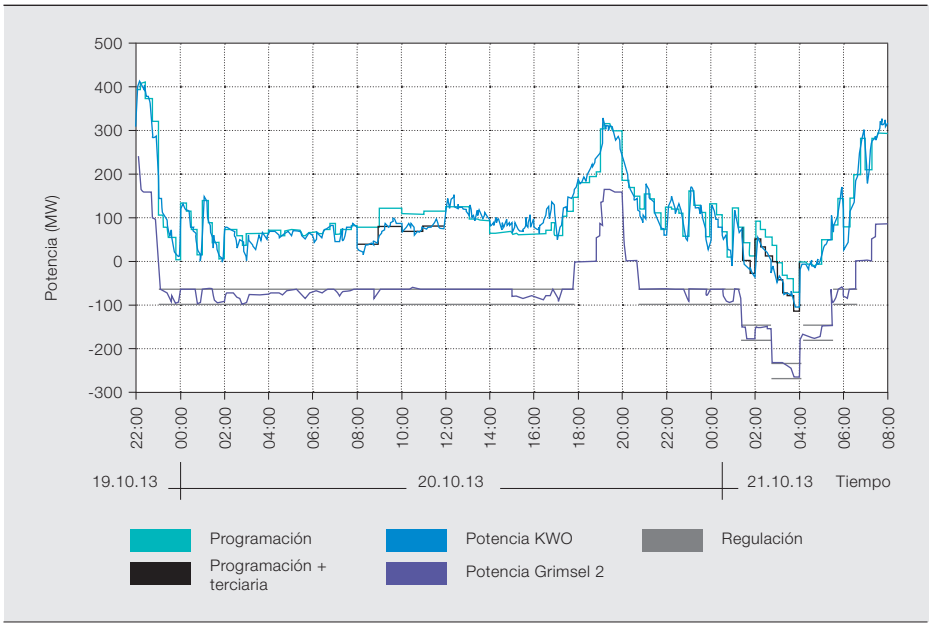
Mirando al futuro

Las nuevas centrales de bombeo para reserva de energía con turbinas de bombeo están equipadas, casi exclusivamente, para trabajo a velocidad variable, empleando motores asíncronos doblemente alimentados de acuerdo con el estado de la tecnología. No obstante, existen serios inconvenientes con este tipo de motor: el complejo rotor está sujeto a límites de

8 El convertidor de 100 MW pudo instalarse en el subsuelo de la sala de máquinas subterránea

A pesar del avance de otras tecnologías de almacenamiento, la de bombeo sigue siendo el único medio maduro y asequible de almacenamiento de energía adecuado para la regulación de redes.

9 El convertidor permite una precisa regulación de la potencia de la central



diseño que restringen el aumento de la velocidad para satisfacer la velocidad óptima de la bomba-turbina. Además, el procedimiento de arranque es mucho más complicado, requiriendo a veces incluso el vaciado de la bomba-turbina, y el cumplimiento de los requisitos del Código de la red eléctrica es más difícil. Por estas razones la tendencia en el futuro se dirigirá más bien hacia máquinas síncronas con grandes convertidores. Por lo tanto, la incorporación de un convertidor grande a una central de bombeo para reserva de energía ya existente ofrece una forma ideal de probar en la práctica real esta tecnología orientada al futuro. La experiencia hasta la fecha con el convertidor de gran tamaño en la central de bombeo para reserva de energía Grimsel 2 es muy prometedora. A pesar del avance de otras tecnologías de almacenamiento, la de bombeo sigue siendo el único medio maduro y asequible de almacenamiento de energía adecuado para la regulación de redes y, por lo tanto, desempeña un importante papel en el panorama futuro de la generación. El nuevo convertidor del Lago Grimsel es una contribución a la Estrategia Energética Suiza para 2050, que tiene como fin garantizar la continuidad del suministro energético suizo, aumentando al tiempo el uso de energías renovables.

Este artículo está adaptado de “100 MW-Vollumrichter IM Pumpspeicherwerk Grimsel 2” publicado en el electrosuisse Bulletin de 3/2014.

Hans Schlunegger
Kraftwerke Oberhasli AG
Innertkirchen, Suiza
hans.schlunegger@kwo.ch

Para consultas relacionadas con ABB, póngase en contacto con Fritz Wittwer (fritz.wittwer@ch.abb.com) o con Steve Aubert (steve.aubert@ch.abb.com).

Lecturas recomendadas

G. Sydnor, R. Bhatia, H. Krattiger, J. Mylius, D. Schafe,“ Fifteen Years of Operation at NASA’s National Transonic Facility with the World’s largest adjustable Speed Drive,” archivo de la NASA.

J. Hell, M. Egretzberger, R. Schürhuber, A. Lechner, Y. Vaillant, “Full size converter solutions for pumped storage plants, A promising new technology”, Hydro2012, Bilbao, España, 2012.

H. Schlunegger, A. Thöni, “100 MW Full-Size Converter in the Grimsel 2 Pumped Storage Plant,” Hydro 2013.

Unidad de fuerza

El diseño vanguardista del motor redefine la densidad de potencia

THOMAS EK, KARITA FORSS, TIMO HOLOPAINEN, JANNE IKONEN, OLLI LAHTINEN –
ABB ha presentado una nueva generación de motores basados en la exitosa gama de motores de alto rendimiento refrigerados por aletas del tipo HXR. Estos nuevos motores se describen como "motores de alta tensión refrigerados por aletas, NXR" y alcanzan niveles nunca vistos de densidad de potencia. Los nuevos motores tienen mejor refrigeración interna y externa, métodos vanguardistas de fabricación de la bobina, un diseño del bastidor de última generación y niveles sin precedentes de adaptabilidad y facilidad de mantenimiento. El diseño ofrece una mejor solución para la amplia gama de aplicaciones en las que se utilizan habitualmente motores refrigerados por ventilador totalmente cerrados. La mejora de la densidad de potencia significa que a menudo se podrá utilizar un motor con un bastidor menor que alcanza la misma potencia que los diseños anteriores más grandes. Inicialmente, los motores se comercializarán en los tamaños de bastidor 355 y 400.

Estos motores se han diseñado para convertirse en la nueva referencia del sector y completan la gama actual.

Todas las máquinas eléctricas giratorias generan calor como resultado de las pérdidas eléctricas y mecánicas internas. Las pérdidas son especialmente altas durante el arranque y aumentan con la carga. La refrigeración es, por tanto, necesaria para transferir continuamente el calor a un medio refrigerante, como el aire exterior. Tan importante es la refrigeración para los motores, que se definen oficialmente distintos métodos de refrigeración para máquinas giratorias en una norma de la IEC.

La industria siempre ha demandado motores más pequeños y, al mismo tiempo, más potentes. Esto plantea el desafío de lograr un diseño mecánicamente más pequeño y más potente que se mantenga frío. Esto no es todo: el motor también debe funcionar dentro de los límites de las vibraciones mecánicas, ser de fácil mantenimiento y ser flexible para simplificar su puesta en servicio.

Es posible que la principal innovación que contribuye a una mayor eficiencia sea el sistema de refrigeración del motor.

Los nuevos motores de ABB descritos aquí son el resultado de un largo periodo de investigación y desarrollo en el que se han optimizado distintos parámetros para garantizar que los motores se convertirán en la nueva referencia para la industria y completen la gama actual. No sólo producen más potencia por kilogramo que los diseños anteriores, sino que también tienen intervalos de mantenimiento más largos y mayor flexibilidad.

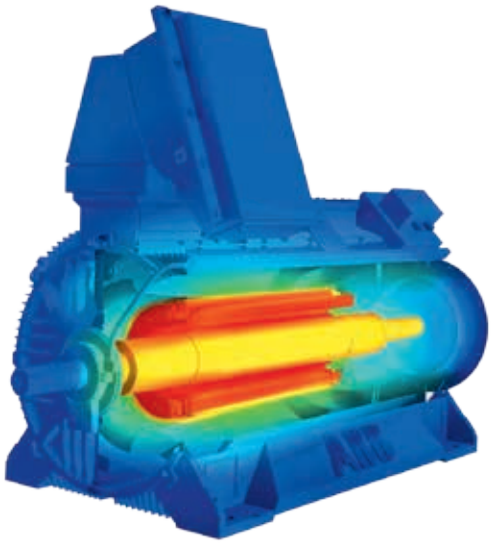
Imagen del título
El diseño optimizado de la refrigeración, el devanado y el moldeo permite condensar más potencia en un volumen menor que antes. Y el mantenimiento y la puesta en servicio son también más fáciles.

Sistema de refrigeración

La innovación que más contribuye a la mejora del rendimiento es el sistema de refrigeración del motor.

La bobina también se ha mejorado con un mejor uso de sus materiales activos y un redimensionamiento que ha permitido construir un devanado más compacto y, por tanto, más potente.

1 Refrigeración interna representada por una cámara termográfica



Es difícil predecir la eficiencia térmica, por lo que el equipo de desarrollo analizó los motores existentes, construyó modelos informatizados de dinámica de fluidos (CFD), acudió a socios externos para llevar a cabo simulaciones y desarrolló métodos de cálculo analítico que pudieran utilizarse para finalizar el diseño. Además, los modelos CFD debían probarse con mediciones reales e interpretarse correctamente para convertirlos junto con los cálculos en motores funcionales. En esta etapa, los conocimientos especializados y la experiencia del equipo de ABB y sus socios desempeñaron un papel fundamental.

El sistema de refrigeración interno aumenta la circulación de aire a través del motor y la dirige a través de canales del estator y el rotor con la ayuda de un ventilador ➔ 1. ABB ya había fabricado antes otros motores con un ventilador interno, pero nunca le había sacado tanto partido.

El sistema de refrigeración interno aumenta la circulación de aire a través del motor y la dirige a través de canales del estator y el rotor con la ayuda de un ventilador.

Las protecciones finales del motor son rígidas y ligeras, con una superficie interna que facilita la circulación de refrigeración. Además se ha optimizado la interacción de los canales de refrigeración y las zonas de refrigeración externas; los canales de aire, por ejemplo, no interfieren con la refrigeración por aletas. Mientras que la mayoría de los motores tienen cuatro canales de aire, el nuevo motor tiene sólo tres.

Aletas de refrigeración mejoradas

Una forma en la que se ha mejorado la refrigeración exterior es aumentando el número de aletas. También se han alargado y se ha optimizado su separación y su ángulo y se han reducido todas las obstrucciones ➔ 2. Por ejemplo, los pernos y los tornillos que sujetan los protectores finales no interfieren con el flujo de aire; una bandeja de cables garantiza que los cables auxiliares estén bien colocados; las aletas se han diseñado para que sean fáciles de limpiar; y los puntos de anclaje se han dispuesto de forma que los accesorios vayan en el lateral del motor y no afecten al flujo de aire. Además de evitar obstáculos al flujo de aire, el anillo exterior de la protección final termina en un bisel de

2 Vista frontal de la estructura optimizada de aletas de refrigeración

Se ha aumentado el número de aletas, se han alargado y se ha optimizado la distancia entre ellas y el ángulo y se han reducido todas las obstrucciones.

30 grados para dirigir el aire de forma más eficaz.

La investigación efectuada para optimizar la refrigeración es también útil al adaptar el modelo a los motores individuales. El modelado CFD completo exige horas o días, pero se pueden extraer los parámetros de modelización y las mediciones del CFD para agilizar el cálculo del cambio de temperatura para un diseño concreto de motor. Unas predicciones de temperatura más precisas permiten adaptar los motores a las necesidades del cliente, lo que asegura un mejor rendimiento.

Disminución de vibraciones

Los nuevos y más potentes motores son más largos que sus predecesores, lo que ha obligado a trabajar más para que esta mayor longitud no provoque más vibraciones. Aquí también los diseños se desarrollaron utilizando ordenadores, pero la realización de prototipos virtuales, en este caso el método de elementos finitos (MEF), no pudo prever satisfactoriamente las características del nuevo diseño. Por lo tanto, componentes tales como el rotor, el estator y los protectores finales fueron modelados y construidos. A continuación se midieron los componentes fabricados y se validaron los modelos de elementos finitos frente a los datos medidos de cada componente. En un proceso iterativo, estos dos se validaron entre sí hasta que pudieron identificarse los diseños más eficaces. El diseño definitivo evitó todas las resonancias importantes que podrían deberse a excitaciones mecánicas y eléctricas ➔ 3.

El aumento de rigidez reduce la vibración. Una forma de aumentar la rigidez es agrandar las dimensiones axiales y transversales de los orificios de montaje. Pero lo que más contribuyó a aumentar la rigidez fue la optimización del diseño mecánico.

El objetivo de esta optimización era reducir el uso de materiales sin dejar de satisfacer los requisitos de vibración de las principales normas industriales. En el pasado, la rigidez se aumentaba simplemente añadiendo más metal. Esta solución ya no es aceptable: la resistencia y la rigidez deben lograrse mediante una configuración inteligente de los materiales, no añadiendo masa. Pero el diseño de los diversos componentes de un motor no es una ciencia exacta. El panel situado entre las patas, por ejemplo, cumple dos funciones: alberga uno de los tres canales de aire y proporciona también rigidez para ayudar a transferir las fuerzas horizontales desde el estator hasta las patas. El cálculo de tamaño óptimo para las aberturas de aire en los extremos del interior del canal de aire o el espesor óptimo de fundición no es sencillo, especialmente si se trata de reducir la cantidad de materiales y el peso del motor. Los equipos de desarrollo colaboraron con los proveedores para conseguir un proceso de fundición que cumpliera los requisitos de diseño y optimizara el uso de los materiales.

La investigación llevada a cabo para optimizar el proceso de refrigeración es también útil en el modelado necesario para personalizar motores individuales.

3 Modelización de la tracción electromagnética giratoria para predecir las vibraciones mecánicas

Uno de los aspectos que se tuvieron en cuenta en el modelado de este nuevo motor fue su funcionamiento sobre diferentes cimentaciones, ya que los problemas de vibraciones se deben a menudo a la interacción entre el motor y la base sobre la que descansa. Hay mucha diferencia entre montar un motor sobre un bloque de hormigón o sobre una base de acero. El nuevo motor puede utilizarse sobre cimentaciones muy variadas.

Fabricación del nuevo devanado

También se ha mejorado el devanado, redimensionándolo y sacando más partido de sus materiales activos. Un devanado más pequeño aumenta la potencia de salida. Se han creado nuevas herramientas que mejoran el control de la forma del extremo del devanado en el proceso de fabricación, lo que ha mejorado la calidad y la repetibilidad y ha contribuido a que cada devanado esté ahora más cerca de la perfección de lo que antes era posible.

El proceso de fabricación del nuevo devanado ya está influyendo en los métodos de fabricación de otras gamas de motores de ABB.

Flexibilidad de instalación

Una de las innovaciones más llamativas es la opción de montar la caja principal de terminales en cualquiera de los lados o de los extremos del motor. En el caso del tamaño de bastidor 400, también puede colocarse en el centro. Para cambiar la posición de la caja basta cambiarla por la trampilla que cubre la posición deseada ➔ 4.

Una mejor refrigeración prolonga la vida útil y reduce la frecuencia de mantenimiento, porque la necesidad de lubricación de los cojinetes disminuye con la temperatura.

El montaje de la caja de terminales auxiliar es también muy flexible; se puede colocar en cualquiera de los lados del motor y en varias posiciones longitudinales.

Por lo tanto, un cambio en la disposición de la fábrica no obliga a comprar un motor nuevo sólo porque la alimentación llega desde el lado contrario a los cables de conexión. Y, en especial en las industrias en las que se utilizan motores en cualquiera de los dos lados de la línea de producción (como el metal o el papel), puede ser suficiente un motor de reserva en lugar de dos. No es necesario enviar el

4 Instalación flexible

El diseño final evitó todas las resonancias importantes que podrían deberse a excitaciones mecánicas y eléctricas.

motor a fábrica para modificarlo: el personal técnico de ABB puede hacer todo el trabajo en el lugar de instalación.

El diseño básico incorpora una amplia gama de opciones, y este tipo de flexibilidad contribuye a mejorar los plazos de entrega. Así, las protecciones de los extremos están preparadas para albergar accesorios como la caja de grasa residual y la instrumentación, lo que permite una personalización más sencilla y rápida.

Facilidad de mantenimiento

Una mejor refrigeración prolonga la vida útil y reduce la frecuencia de mantenimiento, porque la necesidad de lubricación de los cojinetes disminuye con la temperatura.

Para resolver los problemas en cuanto empiecen a manifestarse, el nuevo motor también puede equiparse con el sistema de vigilancia del estado de ABB, ABB MACHsense-P, o con el de vigilancia a distancia, ABB MACH-sense-R. El motor incluye disposiciones para la instalación de sensores y, para ABB MACHsense-R, de puntos de sujeción para un monitor.

Además, ahora es posible revisar los extremos del devanado sin retirar los protectores del cojinete. Los propios cojinetes pueden examinarse con un endoscopio y sin retirar los protectores.

Todo contribuye a aumentar la fiabilidad y reducir los costes.

Más potencia y experiencia por kilogramo

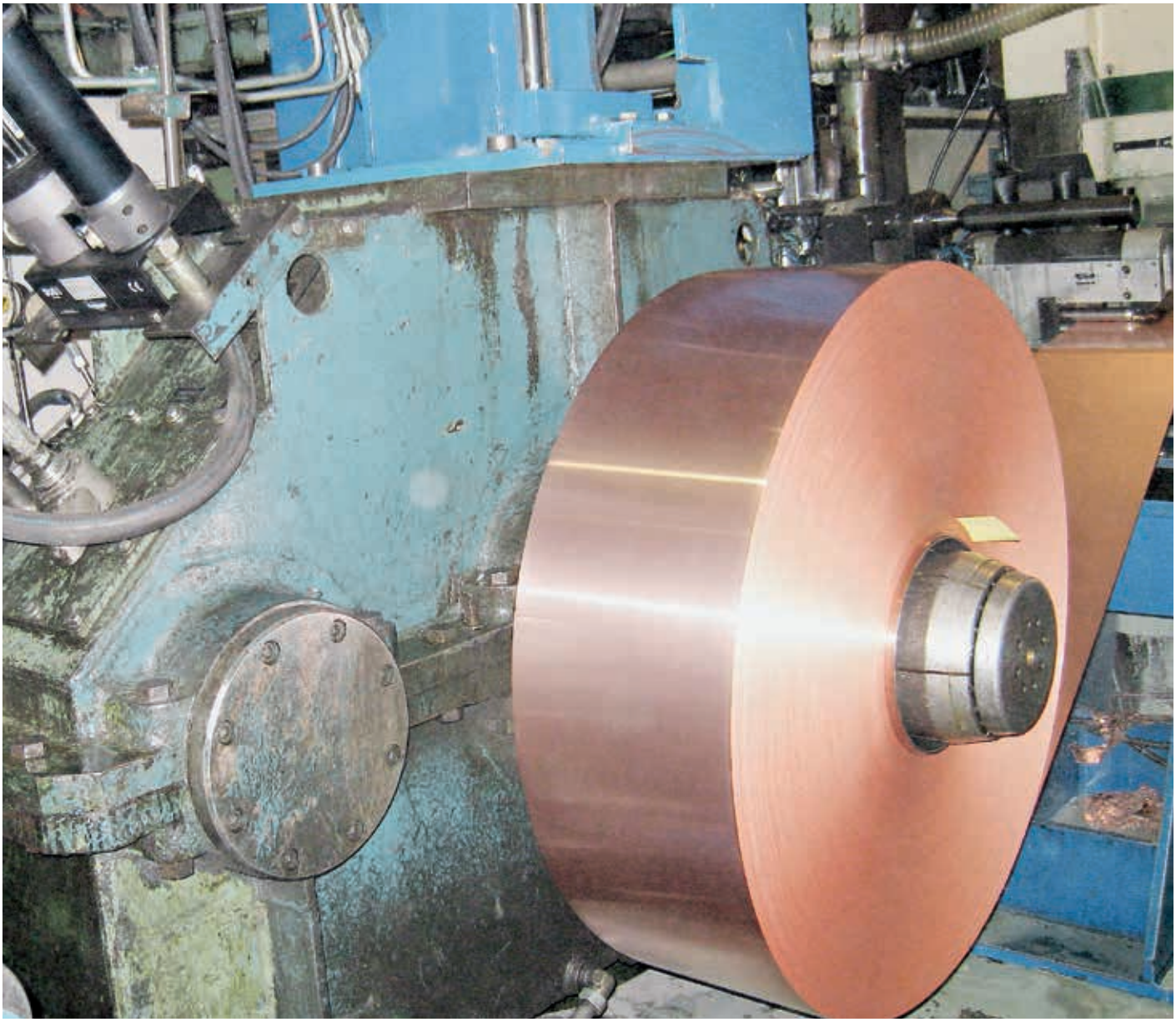
Las innovaciones del nuevo motor (designado como tipo NXR) hacen que a menudo se logre la misma potencia de salida que con un motor de bastidor uno o hasta dos tamaños más grande. En casos extremos, esto supone una reducción del peso del 40 por ciento.

Estos nuevos motores incorporan más de 100 años de experiencia de ABB en este campo, combinada con la última tecnología de diseño y de fabricación. Además, los avances descritos no solo benefician a esta gama de motores: el nuevo devanado ya se está utilizando en otras áreas de ABB, y las innovaciones en refrigeración influirán casi con toda seguridad en otros diseños de refrigeración. Las herramientas de cálculo, que surgen en prototipos virtuales y se confirman por mediciones de validación en prototipos reales, es muy probable que se adopten en ABB.

Pronto se ampliará la nueva gama de motores, que actualmente se utiliza con los tamaños de bastidor 355 y 400, para incluir otros tamaños de bastidor y otras características.

Thomas Ek
ABB Motors and Generators
Västeräs, Suecia
thomas.ek@se.abb.com

Karita Forss
Timo Holopainen
Janne Ikonen
Olli Lahtinen
ABB Motors and Generators
Helsinki, Finlandia
karita.forss@fi.abb.com
timo.holopainen@fi.abb.com
janne.ikonen@fi.abb.com
olli.lahtinen@fi.abb.com

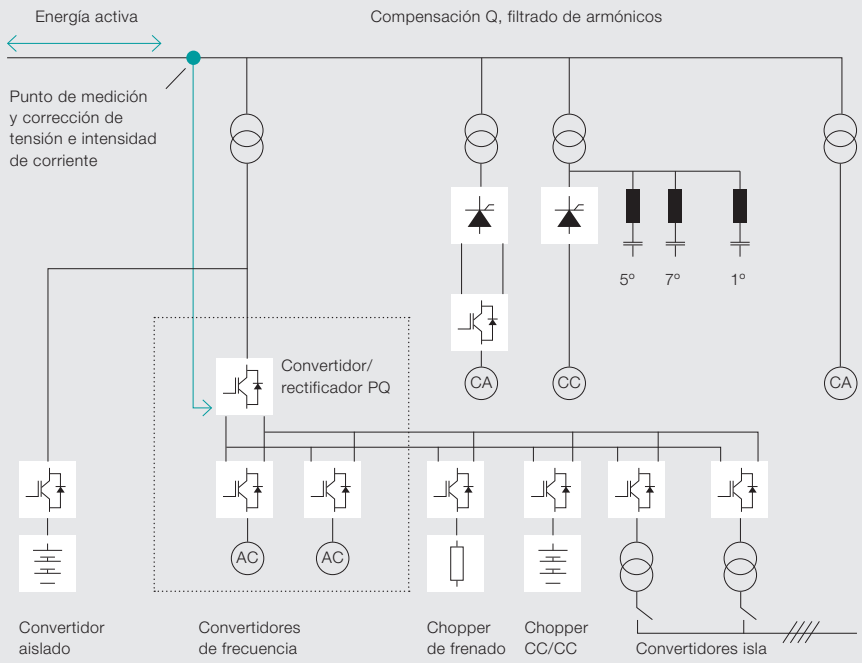


Polifacético

La electrónica de potencia del ACS800 puede hacer más que girar un motor

REIJO KOMSI – Los accionamientos industriales hacen girar, literalmente, las ruedas del comercio. Esto los convierte a ellos y a la tecnología que los controla en productos muy importantes en el entorno industrial. Si varias unidades forman parte de un único proceso, como en una máquina de papel, por ejemplo, y hay que acoplar de algún modo cada uno de los motores de accionamiento, conviene utilizar el denominado multiaccionamiento para que se encargue de todos ellos. El multiaccionamiento ACS800 de ABB es uno de estos dispositivos. El ACS800 contiene software sofisticado y electrónica de potencia que gestionan el flujo de energía a la unidad. Sin embargo, con el adecuado software de aplicaciones, el módulo de electrónica de potencia es capaz de mucho más que simplemente hacer girar el motor. Por ejemplo, puede realizar una valiosa corrección de la calidad de la energía eléctrica y permitir que la electrónica de potencia apoye un funcionamiento en isla intencionado.

1 Un esquema de ACS800 estándar de multiaccionamiento. También pueden configurarse convertidores isla, un chopper de frenado, un chopper CC/CC y almacenamiento de energía



La solución del multiaccionamiento ha tenido mucho éxito en toda la industria. En lugar de muchas unidades individuales que actúan por separado, productos tales como el multiaccionamiento ACS800 de ABB se encargan de varios accionamientos y permiten su acoplamiento. Esto es importante en procesos tales como la fabricación de papel, donde hay que acoplar perfectamente muchos accionamientos para asegurar una buena calidad del producto en todo momento a lo largo del proceso de producción. Estas aplicaciones, y otras acopladas menos estrictamente, se benefician también de las demás ventajas de la solución de multiaccionamiento ACS800, como son la reducción del espacio que ocupa; ahorro en cableado, instalación y costes de mantenimiento; menor número de componentes y mayor fiabilidad; e implantación de funciones de control y seguridad global posibilitadas por el suministro común del multiaccionamiento ACS800.

El multiaccionamiento ACS800 tiene una unidad rectificadora y dos o más convertidores de frecuencia conectados a un enlace común de CC ➔ 1. El tipo más perfeccionado de unidad rectificadora es una unidad de suministro IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) (ISU), que consta de una etapa potencia activa similar a la del convertidor de frecuencia. Esta unidad permite la circulación de energía activa bidireccional, lo que hace posible alimentar en la red la energía regenerativa del frenado. Además, la distorsión armónica de un rectificador activo de este tipo es mucho menor que la de un rectificador de diodos o tiristores.

El elemento fundamental del rectificador (seis IGBT y seis diodos de rueda libre) se puede utilizar para otros fines incorporando el software adecuado. Este artículo describe dos de ellos: corrección de la calidad de la energía (PQ) y funcionamiento en isla intencionado.

El elemento fundamental del rectificador se puede utilizar para otros fines incorporando el software adecuado.

Corrección de la calidad de la energía eléctrica

Las capacidades de corrección de la PQ de la unidad permiten una compensación de la energía reactiva y el filtrado activo de armónicos. Se pueden filtrar cuatro de las corrientes armónicas características más significativas: quinta, séptima, undécima y decimotercera ➔ 2.

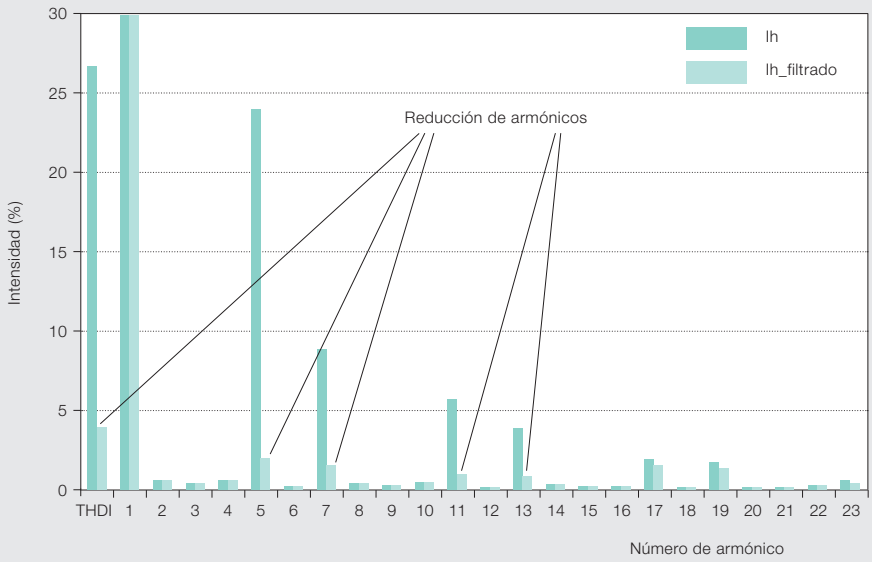
La corrección de PQ está disponible al mismo tiempo que la unidad está suministrando energía activa para los accionamientos de motores. El punto de medición y corrección de tensión e intensidad puede estar en el lado de la baja tensión (LV) o de la media tensión (MV), siendo este último más beneficioso porque tiene en cuenta la potencia reactiva del transformador o transformadores. Una tarjeta específica efectúa la medición de tensión e intensidad. El análisis, la generación de referencia y el control se realizan internamente y no se precisa comunicación con la automatización externa ➔ 1.

La corrección de la PQ también se puede utilizar en paralelo con filtros pasivos como una especie de compensador híbrido. Esto requiere menos gasto total, pero el rendimiento sigue siendo tan bueno como con la corrección activa total.

Imagen del título
El ACS800 de ABB permite un control sofisticado de los motores industriales, como el que se muestra aquí. Pero la electrónica de potencia del ACS800 se puede utilizar además para otras tareas.

Las capacidades de corrección de la PQ de la unidad permiten una compensación de la energía reactiva y el filtrado activo de armónicos.

2 Armónicos reducidos



La compensación de la energía reactiva y las corrientes armónicas puede reducir considerablemente las corrientes de media tensión: el 45 por ciento en un caso de referencia. Esto representa menores esfuerzos en líneas de transporte de media tensión y transformadores, mayor cos fi, menores niveles de distorsión armónica y un aumento de la capacidad de carga de las líneas de media tensión. La reducción de la energía reactiva puede equipararse directamente al ahorro en la factura de electricidad. Además, una energía reactiva menor lleva a una variación menor de la tensión y, por tanto, a un índice de parpadeo menor.

Funcionamiento en isla intencionado

El otro software de control presentado aquí permite utilizar la etapa de potencia del ACS800 como un convertidor isla, es decir, proporcionar una tensión trifásica sinusoidal potente, similar a un generador giratorio, para el proceso. El funcionamiento en isla intencionado es la seccionalización deliberada de la red eléctrica durante perturbaciones para crear "islas" de energía que mantienen un suministro continuo de electricidad a un proceso crítico.

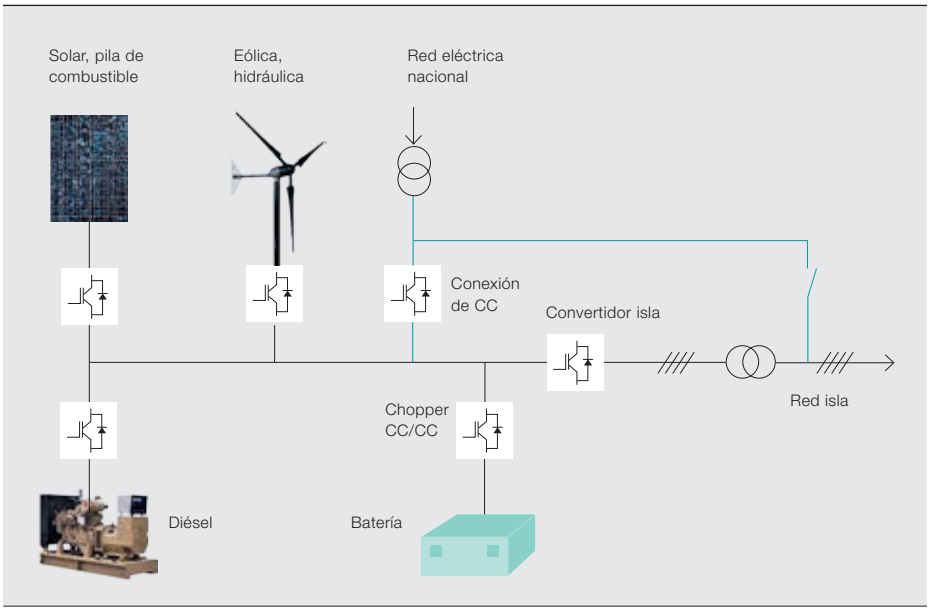
La energía necesaria para ello puede proceder de cualquier fuente de CC: por ejemplo, una red de CA rectificada, una turbina eólica, un generador diésel, una célula solar, una pila de combustible o un banco de baterías. Puede conectarse la reserva de baterías directamente a la conexión de CC o a través de un chopper CC/CC. La conexión común de CC realiza directamente la distribución de energía a los accionamientos del proceso. Este mismo concepto puede utilizarse en aplicaciones de redes inteligentes en las que no se dispone de líneas de transporte pero existe una necesidad de suministro de electricidad a "islas" de energía. En las aplicaciones de redes inteligentes, el almacenamiento de energía en baterías es esencial para equilibrar la producción de generadores distribuidos y el consumo de la red isla → 3.

Normalmente, se precisa alimentación de emergencia (de baterías) para superar una avería de la red de suministro o para ganar tiempo para poner en marcha los generadores diésel de reserva. El dimensionado del almacenamiento de energía depende de la topología utilizada, la potencia real precisa y el tiempo de reserva.

También se puede utilizar el almacenamiento de energía para equilibrar la entrada de energía activa de la red si el proceso industrial es muy dinámico. La ventaja de utilizar el almacenamiento de energía en un proceso dinámico es que se puede utilizar una unidad rectificadora de menor tamaño, debido a la menor potencia de pico.

Un criterio importante para evaluar la calidad de funcionamiento del convertidor isla es la capacidad de corriente de fallo. Ahora que el convertidor forma parte de la red isla, tiene que proporcionar la corriente de fallo necesaria para resolver

3 Provisión configurable de potencia en aplicación de red inteligente



Pueden utilizarse convertidores de electrónica de potencia para construir una red isla inteligente y altamente fiable.

la avería y proteger los equipos y las personas.

El convertidor isla puede trabajar en paralelo con otros convertidores isla y en paralelo con la red nacional. El número de convertidores en paralelo no está limitado: desde el punto de vista técnico se puede conectar cualquier número de ellos para alimentar una red isla común. Sin embargo, en algún momento, el uso de un generador rotativo será más ventajoso que la incorporación de una enorme cantidad de convertidores en paralelo.

Otras aplicaciones basadas en la modulación DTC

El control de las dos aplicaciones presentadas anteriormente se basa en la plataforma de software del ACS800. En ambos casos, se utiliza el principio de modulación del control directo del par (DTC). El DTC es un método de control de los motores de CA desarrollado por ABB en el que todos los cambios de conmutación, para cada ciclo de control, se basan directamente en el estado electromagnético del motor; no hay modulador independiente de ancho de impulso controlado por tensión y frecuencia. Los primeros productos comerciales DTC con éxito fueron desarrollados por ABB en la década de 1980 para aplicaciones de tracción. El DTC depende en gran medida del procesamiento de señales digitales y de una electrónica especializada. El uso del DTC permite aplicaciones especiales de los convertidores basadas en el control de motor del ACS800 que hay que desarrollar. Este trabajo de desarrollo es llevado a cabo por un equipo dedicado de software de ABB.

Ventajas de escala

Todas las aplicaciones mencionadas se benefician de compartir elementos. Cada aplicación tiene su software específico, pero el hardware del módulo convertidor IGBT permanece invariable. Esto aporta ventajas de escala para precios, volúmenes, fiabilidad, repuestos y servicio postventa global.

Tamaño

La construcción modular de la serie de productos ACS800 es extremadamente útil y flexible cuando se construyen aplicaciones de convertidores complicadas. El menor tamaño razonable de módulo para aplicaciones de PQ y de funcionamiento en isla es de 150 kVA en un bastidor R7i y el mayor tamaño de módulo es de 500 kVA. Disponiendo en paralelo estos módulos de mayor tamaño, se puede obtener un convertidor único con una potencia nominal de unos 5 MVA.

El mayor convertidor de PQ hasta ahora es una unidad de suministro multiaccionamiento AC800 refrigerada por líquido de 4,5 MVA en un campo de pruebas en Helsinki. Proporciona energía activa a accionamientos de CA de gran tamaño. Además, compensa la potencia reactiva de todo el campo de prueba y filtra las corrientes armónicas características más significativas. Cuando estaban funcionando los rectificadores de alta potencia de seis pulsos en el campo de pruebas, se midió una reducción del 45 por ciento de la corriente de media tensión al activar el convertidor de PQ. Esta reducción de la energía reactiva tiene como consecuencia directa un ahorro de varios miles de euros al mes en la factura de electricidad.

Las mayores unidades de isla en funcionamiento hasta ahora son dos (a efectos de redundancia) convertidores refrigerados por líquido de 2,2 MVA dispuestos en paralelo en un nuevo buque noruego. El buque también dispone de dos convertidores isla refrigerados por líquido de 0,9 MVA. Estos convertidores forman parte del sistema de multiaccionamiento.

Las aplicaciones descritas anteriormente muestran cómo los equipos ACS800, junto con un software especial, pueden ahorrar energía, aumentar su calidad y suministrar una energía eléctrica fiable en caso de que se produzcan perturbaciones. Otras aplicaciones dependen únicamente de desarrollar el software adecuado. Dadas las capacidades de la tecnología, se espera que aumenten el número y la variedad de nuevas aplicaciones.

Reijo Komsi
ABB Discrete Automation and Motion,
Drives and Controls
Helsinki, Finlandia
reijo.komsi@fi.abb.com

Punto caliente

Un nuevo sensor de infrarrojos mide la temperatura de los interruptores automáticos del generador

STEPHAN WILDERMUTH, ULF AHREND, MORITZ HOCHLEHNERT, MARCO ULRICH – El interruptor automático del generador (GCB) es de gran importancia para el funcionamiento sin problemas de una central eléctrica moderna. Se coloca normalmente entre un generador y su transformador para proteger este equipo y maneja intensidades muy elevadas, normalmente de decenas de kA. Con intensidades tan elevadas, basta un aumento pequeño de la resistencia en el recorrido de la corriente para causar un aumento muy elevado de la temperatura del interruptor, lo que puede tener consecuencias muy graves. La supervisión de la temperatura es, por tanto, esencial. Pero esta puede ser una labor muy difícil en un entorno de alta tensión (AT), por lo que ABB emprendió un programa de desarrollo para crear un nuevo sistema de sensores de temperatura para GCB.

1 Aplicación de central eléctrica de reserva por bombeo con HECPS-3S

Los GCB se utilizan, por ejemplo, en turbinas de centrales eléctricas de combustibles fósiles, nucleares y de gas, de ciclo combinado, hidroeléctricas y de bombeo. Desempeñan un trabajo muy duro. Durante el funcionamiento normal de la central eléctrica, el GCB tiene que transportar toda la intensidad nominal del generador, que puede alcanzar fácilmente los 23 kA sin refrigeración del bus o más de 30 kA con refrigeración activa, a tensiones de hasta 32 kV → 1.

Con intensidades tan elevadas, basta un aumento leve de la resistencia eléctrica en la trayectoria de la corriente para iniciar un fuerte aumento de la temperatura. El aumento de la resistencia puede deberse a la alineación defectuosa de las conexiones, a la acumulación de polvo dentro del GCB o al deterioro de las superficies de contacto. El calentamiento consiguiente puede dañar las zonas internas de contacto revestidas de plata, como las zonas de conexión de los conductos del bus, los seccionadores de línea y el sistema de contactos de la cámara de interrupción. La eliminación de calor del conductor principal se efectúa en parte por radiación, por lo que se aplica generalmente al conductor una pintura de alta emisividad; pero esto no basta para evacuar temperaturas muy elevadas (las temperaturas de funcionamiento normales oscilan entre 70°C y 90°C).

Una temperatura excesiva puede determinar la pérdida de la capacidad de interrupción o incluso provocar una descarga disruptiva por contorneo si los componentes empiezan a fundirse.

GMS600

El GMS600 de ABB es un sistema de vigilancia de GCB que indica la necesidad de mantenimiento y avisa con prontitud para evitar paradas imprevistas → 2. El GMS600 calcula el tiempo hasta la revisión general en función de los cortes acumulados de corriente, el número total de operaciones mecánicas, el tiempo transcurrido desde la última revisión, la supervisión del accionamiento principal del interruptor, la densidad de SF_6, etc. Un aspecto que faltaba en su repertorio era la supervisión de la temperatura. Esto se debía a que ningún sistema comercial de detección de la temperatura cumplía todos los requisitos técnicos, comerciales y funcionales para la vigilancia precisa y fiable de la temperatura de los GCB durante el funcionamiento.

Esta falta de un sistema comercial no es sorprendente, pues la supervisión de la temperatura de componentes de alta tensión puede ser complicada. Por ejemplo, el sensor de temperatura debe soportar duras condiciones electromagnéticas y puede verse expuesto a gradientes de temperatura pronunciados debidos, por ejemplo, al clima del desierto.

> Con intensidades tan elevadas, basta un aumento leve de la resistencia eléctrica en la trayectoria de la corriente para iniciar un fuerte aumento de la temperatura.

Fue necesario desarrollar un nuevo sensor de temperatura.

Desarrollo y diseño del sensor

Un análisis técnico detallado determinó que un esquema de medición de la temperatura basado en la detección de la radiación infrarroja (IR) era el mejor méto-

Imagen del título
La vigilancia precisa y fiable de la temperatura en los GCB (se ilustra el HEC8 de ABB) es esencial, ya que el más ligero aumento de la resistencia puede desencadenar un aumento rápido de la temperatura debido a las elevadas intensidades. ¿Cómo se puede vigilar la temperatura en un medio tan desfavorable?

El objetivo era tomar un sensor IR comercial y modificarlo para que funcionara de manera fiable en el duro entorno del GCB.

2 GMS600 central para la supervisión del estado

do. Decidido esto, el objetivo era tomar un sensor IR comercial y empaquetarlo para obtener lecturas fiables en el exigente entorno del GCB.

El componente esencial del sensor de temperatura IR es el propio elemento detector. Se eligieron detectores de termopila no refrigerados basados en Si por su buena relación coste/rendimiento. La única forma de garantizar el funcionamiento correcto del sensor en las duras condiciones del GCB –gradientes de temperatura espacial y temporal y potentes campos electromagnéticos con transitorios rápidos– era empaquetar adecuadamente el detector IR y la electrónica.

Además del detector ASIC se añadieron componentes electrónicos para convertir la señal digital de salida SMBus a Modbus. Estos componentes también deben soportar el riguroso entorno de EMI (interferencias electromagnéticas) de un GCB. El paquete del sensor debe cumplir tres objetivos importantes:

- Supresión de los fuertes gradientes espaciales de temperatura en el elemento sensor IR
- Supresión de los fuertes gradientes temporales de temperatura en el elemento sensor IR
- Supresión de EMI

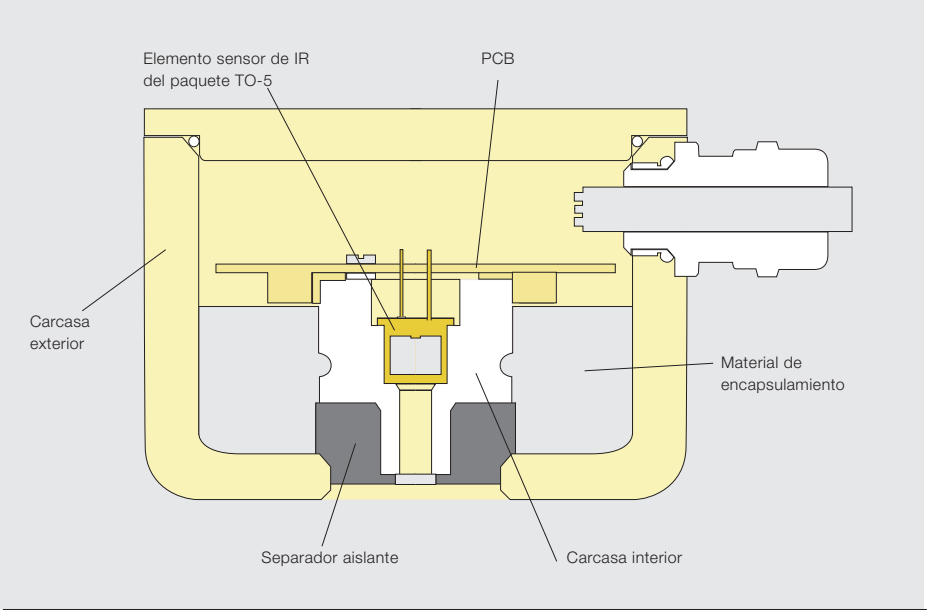
Para cumplir el primer objetivo, la carcasa del elemento sensor IR se recubrió con un material de alta conductividad térmica → 3. Esto garantiza el equilibrio inmediato de los gradientes de temperatura y la homogeneidad del campo térmico en torno al sensor.

El segundo objetivo puede alcanzarse eligiendo un diseño que determine una constante de tiempo térmica elevada (del orden de varios minutos). La constante de tiempo del paquete del sensor puede incrementarse aportando al sensor y a la abertura una masa térmica elevada y reduciendo la conductividad térmica alrededor del sensor para retrasar la entrada de calor en el mismo.

La carcasa del elemento sensor IR se envolvió en un material con alta conductividad térmica.

El paquete es, por tanto, una carcasa de dos partes con un acoplamiento térmico débil entre los componentes interior y exterior → 3. Este enfoque cumple intrínsecamente los requisitos dieléctricos y de EMI: la carcasa exterior actúa como jaula de Faraday y el aislamiento térmico actúa como aislante eléctrico y como barrera de calor. Como contramedida EMI añadida, la carcasa exterior está conectada a tierra

3 Esquema de la sección transversal del paquete sensor que muestra los principales componentes funcionales



La carcasa exterior actúa como jaula de Faraday y el aislamiento térmico funciona como pantalla eléctrica y como barrera térmica.

a través de la envolvente del GCB y la carcasa interior está conectada a un potencial de tierra local.

El dimensionamiento del paquete se definió mediante simulación por el método de elemento finitos (FEM) de transitorios térmicos de un modelo térmico simplificado → 4. El objetivo de diseño fue lograr una constante de tiempo térmica superior a 10 minutos. Esta duración se predijo por medio de la simulación y se verificó mediante pruebas experimentales.

Prototipos y pruebas

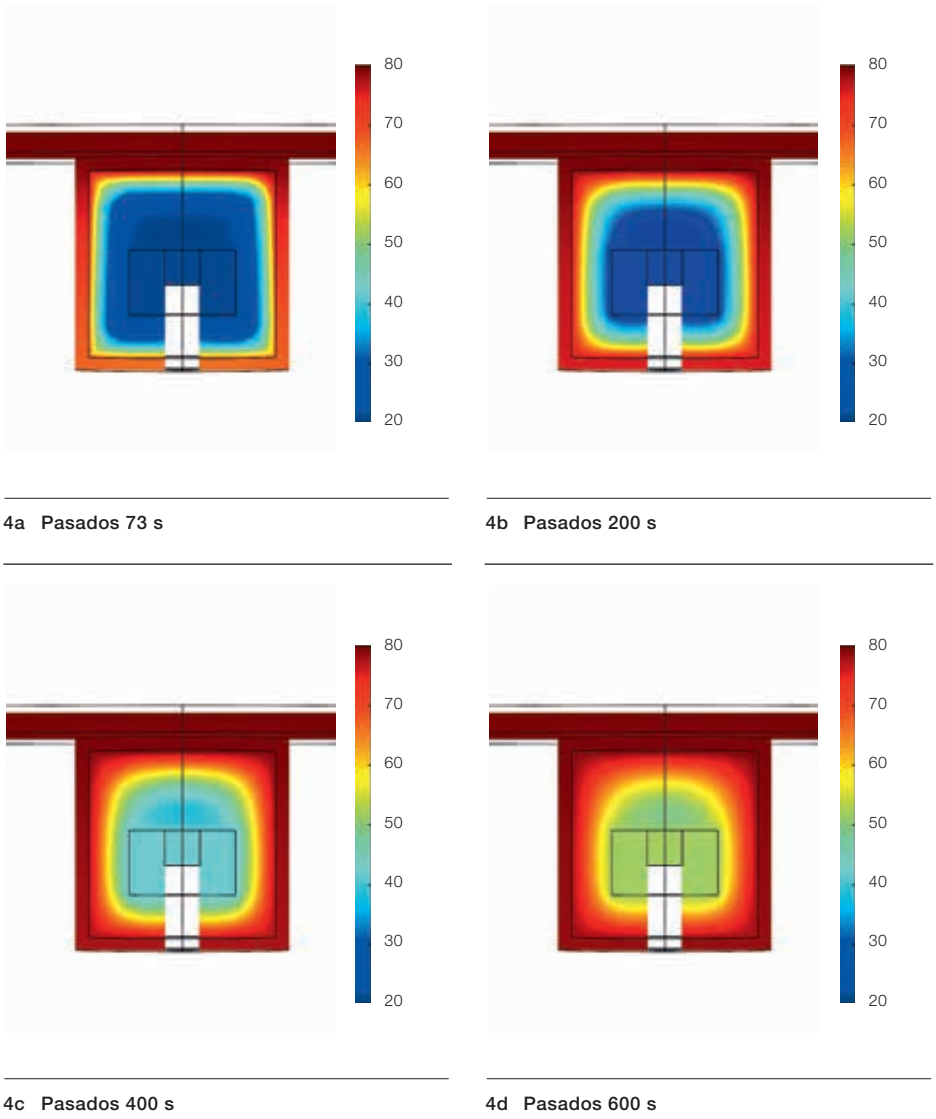
Se realizaron experimentos de cambios bruscos de temperatura para comprobar el diseño térmico y verificar el buen acoplamiento térmico del sensor IR y su entorno. El sensor de temperatura IR se expuso a un cambio de temperatura ambiente de 25°C a 70°C. El ritmo de aumento de 5°C/min estaba limitado por el potencial de calentamiento de la cámara climática utilizada. Durante el experimento el sensor de temperatura IR se colocó frente a un radiador de cuerpo negro mantenido a una temperatura constante de 80°C. Se comprobó un muy buen comportamiento del sensor (error inferior a 2°C) si el acoplamiento térmico a la carcasa interior estaba garantizado por una grasa o adhesivo térmico.

Para verificar el comportamiento del sensor de temperatura IR se construyeron 21 prototipos de sensores y se sometieron a distintos escenarios medioambientales simulados por la cámara climática. Se ensayó la respuesta del sensor en un intervalo de temperaturas del radiador de cuerpo negro de 30°C a 120°C a una temperatura ambiente constante (sensor) de 25°C. La respuesta del sensor mostró un comportamiento lineal. El error de linealidad se mantuvo por debajo de 3°C en todo el intervalo de temperaturas estudiado. Las variaciones (desviación típica) entre los prototipos individuales fueron de 0,8°C y 1,2°C a una temperatura estudiada de 75°C y 120°C, respectivamente.

Los elevados gradientes temporales de temperatura en el sensor IR pueden evitarse eligiendo un diseño que conduzca a una constante de tiempo térmica de varios minutos.

La única forma de garantizar el funcionamiento correcto del sensor en las duras condiciones de un GCB era empaquetar adecuadamente el detector IR, la carcasa y la electrónica.

4 Simulación FEM del calentamiento del paquete sensor. Proporciona una estimación inicial de la constante de tiempo térmica del paquete completo, utilizada para definir las dimensiones



4a Pasados 73 s

4b Pasados 200 s

4c Pasados 400 s

4d Pasados 600 s

Una tarea muy importante para el sistema IR de vigilancia de la temperatura es la detección de sobrecarga del GCB, cuando la temperatura del conductor principal puede aproximarse a 120°C. Esta situación se simuló cambiando el intervalo de temperaturas estudiado de 80°C a 120°C → 5. El sensor IR captó con precisión este cambio de temperatura y la desviación de la medición permaneció holgadamente dentro del intervalo de precisión requerido de ± 3°C.

Para evaluar la influencia de los cambios de temperatura ambiente, los sensores de temperatura IR se expusieron a tres ciclos consecutivos de temperatura de –5°C a 60°C a un ritmo de 0,1°C/min. Se eligió este ritmo de cambio de temperatura para simular un escenario típico día/noche.

De nuevo, el error típico de medición del sensor se mantuvo por debajo de los 3°C. Además, en las pruebas de humedad, el error de medición del sensor fue inferior a 2,5°C hasta con un 90% de humedad relativa, a una temperatura ambiente de 60°C.

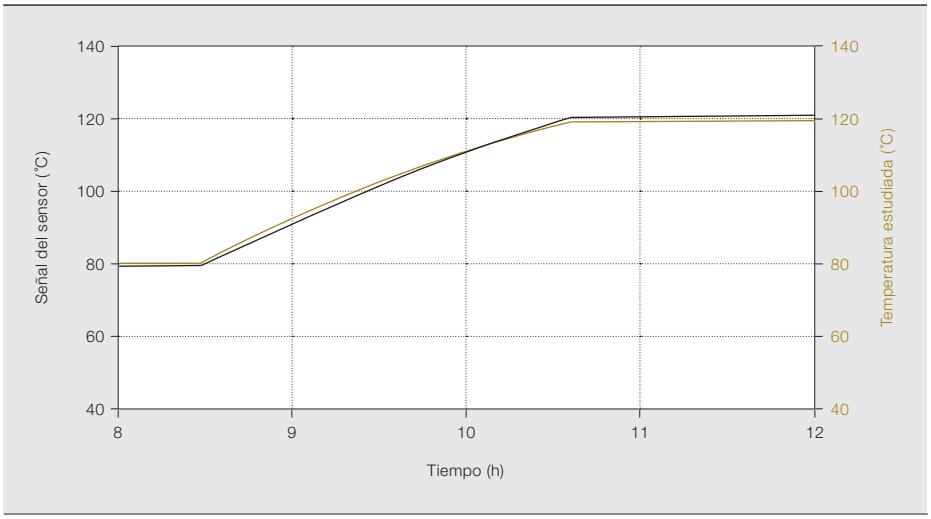
Los sensores de temperatura IR también se probaron para otros factores perturbadores propios del entorno del GCB. Esto incluye una completa prueba de vibraciones para simular el impacto mecánico de las operaciones de conmutación del GCB. Se probó la inmunidad electromagnética según las normas IEC 61000-4 e IEC 61000-6, probando la inmunidad a los campos electromagnéticos de RF y las descargas electrostáticas, y se realizaron pruebas de transitorios eléctricos rápidos (se exigió un nivel de gravedad 3). Todas las pruebas se superaron de forma satisfactoria, por lo que el sistema sensor se homologó para funcionar en un GCB.

Fase de conversión en producto

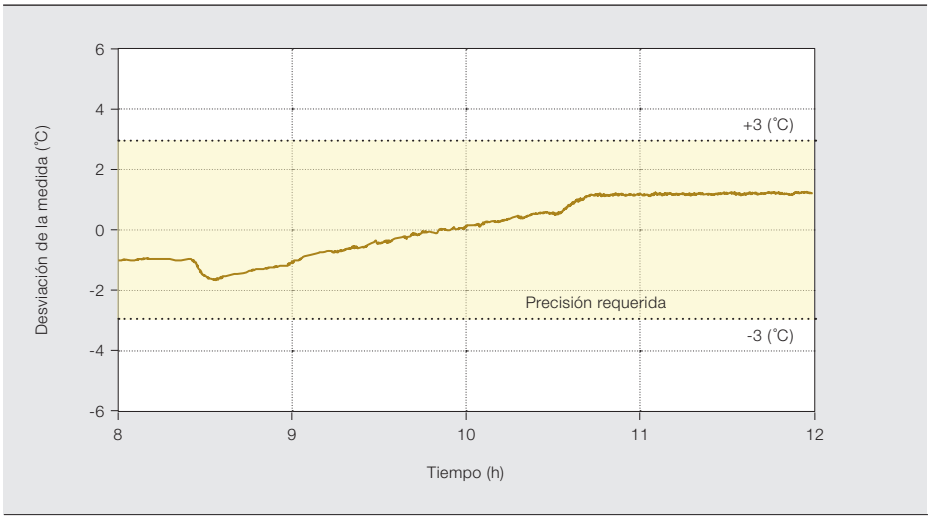
La participación de un posible fabricante desde el principio del proyecto se tradujo en un prototipo de tecnología muy maduro. Sólo fueron necesarios unos pocos cambios para la conversión completa en producto.

La conversión en producto se realizó en paralelo al trabajo de adaptación en el propio sensor. Esto cubría el conjunto del sensor, el diseño de los mazos de cables, la integración mecánica de los sensores en la envolvente del GCB, la canalización de los cables y una actualización del software de vigilancia GMS600 para registrar, guardar y presentar los datos de temperatura al cliente para nueve sensores (tres por fase). La cadena de suministro se

5 Simulación en cámara climática del sobrecalentamiento del GCB: respuesta del sensor de temperatura IR



5a Señal del sensor IR a una temperatura estudiada de 80°C a 120°C a lo largo de varias horas



5b La desviación de la medida se mantiene claramente dentro del intervalo de ± 3°C en toda la rampa de temperaturas.

Se realizaron experimentos de cambios bruscos de temperatura para comprobar el diseño térmico y verificar el buen acoplamiento térmico del sensor IR y su entorno.

implantó en colaboración con el fabricante, que también premonta los sensores y los cables en un bastidor de montaje para acelerar la instalación en el GCB.

Servicio ampliado

La rentabilidad puede mejorarse sustancialmente con un enfoque de servicio inteligente, como el mantenimiento predictivo. Pero un mantenimiento predictivo eficaz, adaptable y sostenible y las estrategias de vida del equipo dependen en gran medida de la validez de las señales que el sensor envía desde el lugar de instalación.

El sistema robusto y rentable del sensor de temperatura descrito aquí permite una vigilancia fiable de la temperatura de los GCB durante el funcionamiento. En combinación con otros datos del sensor (por ejemplo, vibraciones o erosión de los contactos), es posible obtener una visión clara del estado del equipo y formular estrategias de mantenimiento predictivo. Esto es especialmente importante para los GCB en los que el sobrecalentamiento del conductor principal puede provocar la parada de la central eléctrica, con la consecuencia de costes elevados y daños potencialmente catastróficos en los equipos.

El acceso a este tipo de datos sobre el estado también permite crear nuevos conceptos y modelos de negocio y proporciona información valiosa para el diseño de nuevos dispositivos. Por último, el análisis estadístico de los datos de un parque completo de dispositivos puede revelar información que no podría obtenerse de un solo dispositivo. Esto abre nuevas oportunidades y propuestas de valor que ABB puede ofrecer a los clientes finales a través de su cartera de servicios.

Stephan Wildermuth
Ulf Ahrend
Marco Ulrich
ABB Corporate Research
Ladenburg, Alemania
stephan.wildermuth@de.abb.com
ulf.ahrend@de.abb.com
marco.ulrich@de.abb.com

Moritz Hochlehnert
ABB Power Products, Productos de Alta Tensión
Zurich, Suiza
moritz.hochlehnert@ch.abb.com

A un nivel superior

Un SAI de media tensión para la total protección del suministro de energía eléctrica

SOPHIE BENSON-WARNER – ABB ha desarrollado una gama de sistemas de alimentación ininterrupida (SAI) de media tensión (MT) con valores nominales de hasta 6 MVA. La instalación de un SAI en el nivel de media tensión tiene muchas ventajas prácticas y es una solución adoptada por clientes de la industria y grandes centros de datos con cargas sensibles o críticas. La gama de SAI de media tensión PCS100 complementa los SAI de baja tensión (BT) y los productos de acondicionamiento de la energía de ABB.

Imagen del título
Llevar los SAI hasta el nivel de MT tiene muchas ventajas para los usuarios industriales y los centros de datos.

1 El SAI de MT PCS100 es adecuado para proteger cargas sensibles

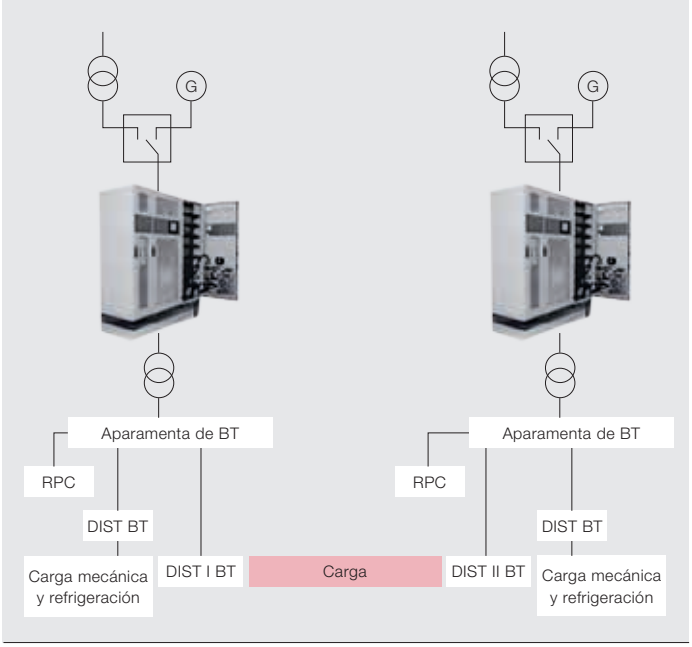
Nuestra sociedad moderna depende en estos días de la disponibilidad inmediata de una gran cantidad de datos. Casi cualquier organización –autoridades sanitarias, bancos, ministerios, tiendas minoristas, sociedades, etc.– requiere el almacenamiento seguro de enormes cantidades de información. Además, gran parte de las actividades industriales y domésticas ha pasado a ser totalmente dependientes de una amplia variedad de dispositivos eléctricos. Una complicación añadida es la incorporación a la red eléctrica de un número cada vez mayor de generadores renovables, lo que ha dado lugar a un aumento de los problemas relacionados con la calidad de la energía, como picos, subidas y bajadas de tensión, ruido y armónicos que suponen un riesgo para todos los usuarios de la electricidad.

La dependencia de un suministro sólido de energía eléctrica de buena calidad ha impulsado en los últimos años el gran crecimiento del comercio de los SAI y los acondicionadores de energía. Tradicionalmente, estos dispositivos se instalan en el nivel de la baja tensión, pero esto suele plantear una dificultad si el espacio disponible es limitado. Además, cuando hay que proteger muchos dispositivos, la gran cantidad de SAI necesarios puede presentar problemas en términos de gestión, supervisión, mantenimiento y disponibilidad. La solución es instalar el SAI en el nivel de media tensión.

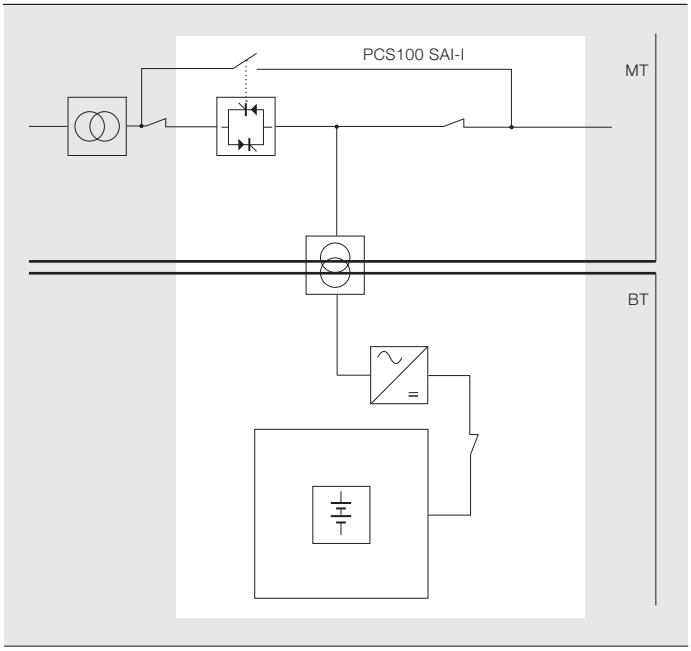
Cuando se instalan en niveles de media tensión, se pueden colocar los SAI en espacios menos abarrotados lejos de los dispositivos protegidos, por ejemplo, en salas eléctricas de media tensión o subestaciones de la central.

Cuando se instala en niveles de media tensión, se pueden colocar los SAI en espacios menos abarrotados lejos de los dispositivos protegidos, por ejemplo, en salas eléctricas de media tensión o en subestaciones de la central, lo que libera espacio para infraestructuras más importantes como servidores o herramientas de fabricación.

2 Un SAI de MT se puede configurar para la protección de la carga de un centro de datos completo o simplemente de las cargas mecánicas



3 La electrónica de potencia y el almacenamiento de energía pueden mantenerse a BT con el transformador conectado a MT



La gama de SAI de media tensión PCS100 de ABB apunta directamente a este segmento de mercado. Ha sido diseñada específicamente para proporcionar una energía limpia, fiable y eficiente, y unos costes menores para los clientes de la industria y de los grandes centros de datos con cargas sensibles o críticas.

Los SAI de media tensión PCS100 se pueden instalar para proteger el suministro completo o sólo cargas sensibles seleccionadas ➔ 1. En un centro de datos podría incluir las cargas mecánicas ➔ 2. La instalación de protección con SAI al nivel de media tensión proporciona la configuración más eficaz desde el punto de vista energético ya que las intensidades menores para esta tensión se traducen en menores pérdidas.

La primera versión admite hasta 6,6 kV y 6 MVA, y a ella le seguirán productos aún mayores de la clase de 15 kV (incluidas opciones de 11 kV y 13,2 kV), caracterizados por mayor MVA.

Tecnología SAI de media tensión PCS100

La topología de una sola conversión utilizada es la elección natural para media tensión ya que las pérdidas son muy pequeñas, lo que permite conseguir eficiencias muy por encima del 99,5 por ciento. También permite un diseño de sistema donde el convertidor de energía y el almacenamiento de energía se pueden dejar en baja tensión, con un transformador de acoplamiento de estos a la media tensión ➔ 3. También en el nivel de media tensión se encuentra un interruptor de desconexión de equipos basado en tiristores que impide una retroalimentación a la red en caso de una pérdida de potencia o una caída de tensión.

Menor coste

El coste inicial es siempre importante en la selección de equipos, pero el coste total de propiedad suele ser el criterio de coste más importante para el cliente. La eficiencia incomparable del SAI de media tensión PCS100, sus bajos costes de mantenimiento y el reducido espacio que ocupa minimizan los costes de propiedad. El hecho de que el almacenamiento y el convertidor de energía estén en el nivel de media tensión también simplifica enormemente el mantenimiento y reduce el coste del sistema. Por último, el SAI de media tensión PCS100 ofrece muchas posibilidades de remodelación que permiten diseños a medida, que se adapten a aplicaciones en centrales que están actualmente sin protección o donde se precisa la sustitución de soluciones SAI rotativas clásicas.

Opciones de almacenamiento

Puesto que el almacenamiento de energía se mantiene en niveles de baja tensión, se dispone de una amplia variedad de opciones de almacenamiento de la energía. La más corriente es la de ultracondensadores, baterías de iones de litio y baterías de plomo-ácido selladas de alta capacidad de descarga. Se espera que los ultracondensadores se utilicen ampliamente en las aplicaciones industriales debido a su larga vida útil y tamaño reducido. Para las aplicaciones de mayor autonomía, las baterías de iones de litio similares a las utilizadas en los coches eléctricos ofrecen una menor ocupación de espacio y una vida útil mayor en comparación con las soluciones de plomo-ácido de coste mínimo. Las baterías de iones de litio presentan unas excelentes características de vida útil, lo que ofrece oportunidades para añadir funciones de apoyo de redes inteligentes, tales como la desconexión de carga.

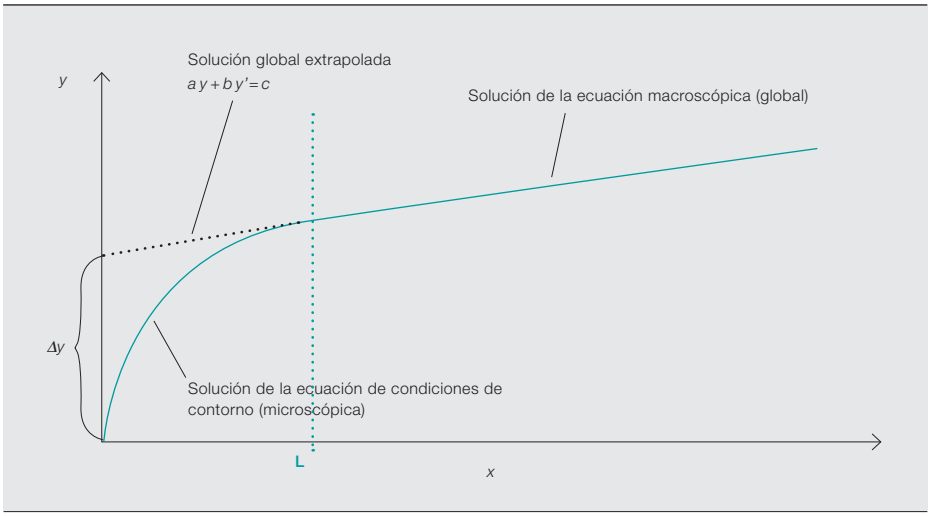
Sophie Benson-Warner
ABB Discrete Automation and Motion,
LV Power Converter Products
Napier, Nueva Zelanda
sophie.benson-warner@nz.abb.com

Fronteras del conocimiento

El conocimiento de las condiciones de contorno es crucial para unas simulaciones fiables

KAI HENCKEN, THOMAS CHRISTEN – Las ecuaciones en derivadas parciales (EDP) son el idioma básico con el que los físicos describen muchos fenómenos naturales, tales como campos eléctricos y magnéticos, acústica, mecánica de fluidos y conducción del calor. Las EDP que describen la física dentro de un dominio espacial de interés (denominadas ecuaciones globales) son los elementos clave en las simulaciones numéricas de los productos de ABB [1]. Sin embargo, en las fronteras de muchos sistemas la variedad de procesos físicos subyacentes que hay que tener en cuenta es mucho más rica que en el volumen interior. Además, los contornos suelen condicionar el resultado de una simulación aunque sólo ocupen una pequeña parte de todo el sistema. En consecuencia, para obtener simulaciones numéricas con un significado, unas condiciones de contorno adecuadas pueden desempeñar un papel decisivo. Su descripción matemática no es, generalmente, una tarea fácil y precisa una consideración profunda de la física que hay detrás.

1 Obtención de las condiciones de contorno para una ecuación macroscópica a partir de la física microscópica subyacente



Las EDP describen el comportamiento de las propiedades o cantidades físicas en el espacio y en el tiempo. Ejemplos típicos son la ecuación del calor para la temperatura, la ecuación de Laplace para el potencial eléctrico y las ecuaciones de la dinámica de fluidos para masa, impulso y flujo de energía.

La presencia de las derivadas espaciales (matemáticas) en estas EDP se asocia a un acoplamiento de un determinado punto del espacio con su entorno, a menudo debido a un fenómeno de transporte. Para obtener soluciones de EDP bien definidas, es decir, únicas, deben especificarse las condiciones de contorno. Esto es similar al requisito de una condición inicial para resolver un proceso que depende del tiempo: las condiciones en el momento inicial de una simulación pueden interpretarse como una condición de contorno para el eje temporal, como una analogía. La forma matemática general de unas condiciones de contorno específicas depende principalmente de dos propiedades estructurales de las ecuaciones globales.

La primera propiedad es el orden de las EDP, que indica la derivada espacial de mayor orden que se presenta en la ecuación global. Por ejemplo, la ecuación del calor es de segundo orden, al presentarse una derivada de la forma $\partial^2 T/\partial x^2$. Las condiciones de contorno serán, en general, una relación entre las cantidades físicas y sus derivadas (espaciales) de un orden que esté un grado por debajo del propio de la EDP, porque las derivadas de orden mayor se pueden eliminar con la ayuda de la EDP global. Por ejemplo, en la ecuación del calor en estado estacionario, $\partial^2 T/\partial x^2 = 0$, la condición de contorno puede, en principio, contener derivadas espaciales arbitrarias, no sólo la propia T y su derivada. Pero los términos de la forma "$\partial^2 T/\partial x^2$" o superior se pueden eliminar empleando $\partial^2 T/\partial x^2 = 0$.

La segunda propiedad se refiere a cómo se propaga la información dentro del volumen del cuerpo, es decir, cómo influye en su valor una perturbación o un cambio de una cantidad física en un punto, a cierta distancia del mismo o en un momento posterior.

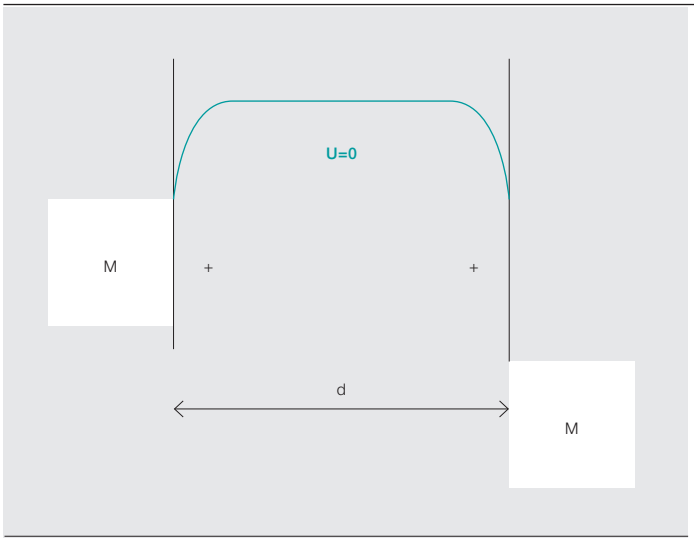
El ejemplo más simple es una EDP de orden cero. Las derivadas espaciales y la propagación no aparecen entonces y las condiciones de contorno son superfluas. La ecuación es, en este caso, un sistema (distribuido) de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) en lugar de una EDP. Un ejemplo físico de ello es la polarización eléctrica inducida en un medio dieléctrico, que se puede describir mediante un proceso de relajación de la densidad local de polarización.

Existen otros casos en que una condición de contorno es innecesaria, aunque se presenten derivadas espaciales. Por ejemplo, el estado de un fluido supersónico en una descarga viene determinado completamente por medio de la información procedente del volumen total. Puesto que el fluido fluye más deprisa que la velocidad de sonido, que es la velocidad de la información en este caso, ninguna información puede retornar desde el contorno al volumen del cuerpo. En consecuencia, este contorno no afectará al estado del cuerpo.

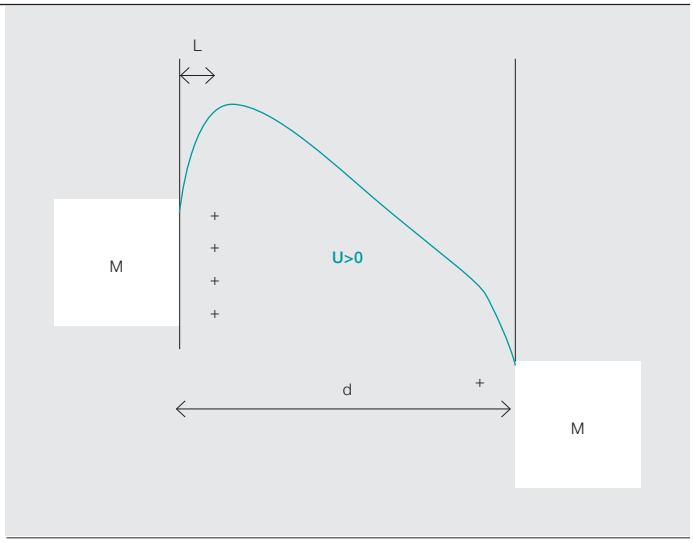
Para simulaciones numéricas significativas, los modelos globales tienen que complementarse con las condiciones de contorno adecuadas.

Las condiciones de contorno suelen ser necesarias y se clasifican en función del comportamiento de la propagación de las EDP: difusiva, instantánea, convectiva o por ondas. Por ejemplo, la propagación

Imagen del título
Los productos contienen muchas fronteras o discontinuidades internas, superficies e interfaces que determinan en gran manera su comportamiento y que deben describirse en las simulaciones mediante condiciones de contorno.



2a Aislante sin portadores de carga intrínsecos sino inyectados (agujeros positivos) desde los dos electrodos unidos. (Azul: potencial de equilibrio.)



2b La aplicación de una tensión inclina el potencial de energía detectado por los portadores, alcanzando un máximo cerca del electrodo inyector.

Hay que formular las condiciones de contorno de forma que el modelo esté bien planteado, es decir, que exista una solución físicamente razonable.

instantánea corresponde a soluciones de estado estacionario, donde se asume implícitamente que la propagación y, por tanto el equilibrio, en el sistema es mucho más rápida que la escala de tiempos considerada. Un ejemplo es la formación de un campo eléctrico (por ejemplo, en el vacío), que se suele describir con la ecuación de Laplace instantánea.

En la práctica, los transitorios pueden ignorarse frecuentemente debido al hecho de que el campo eléctrico viaja a la velocidad de la luz.

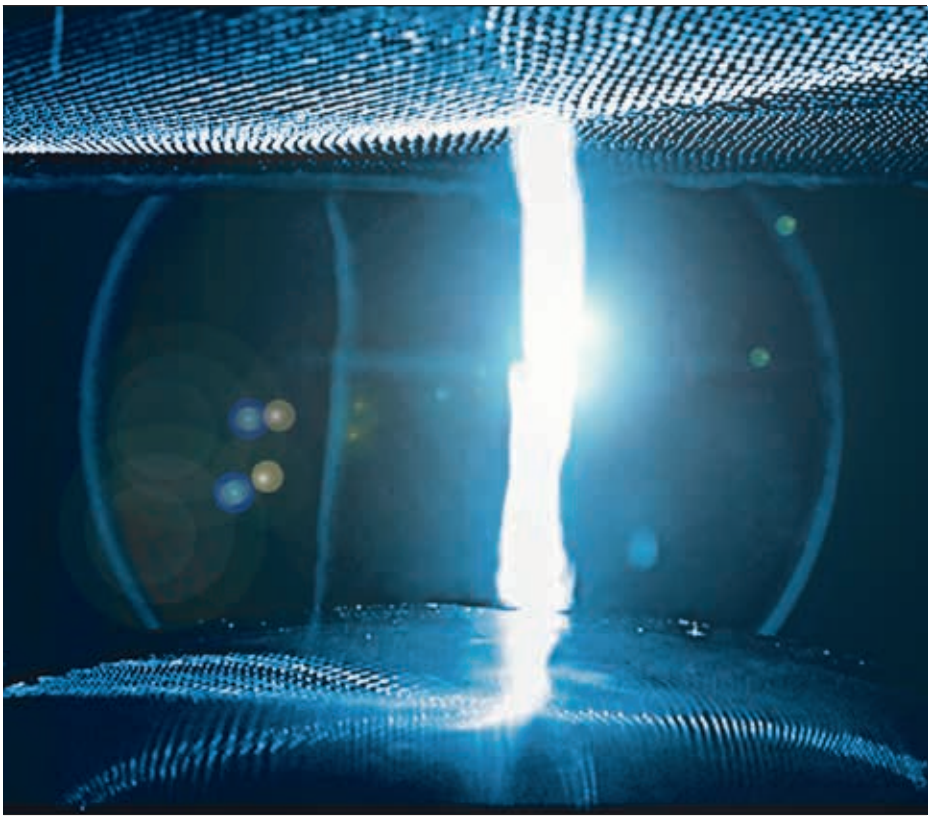
Hay que formular las condiciones de contorno de forma que el modelo esté bien planteado, es decir, que exista una solución físicamente razonable. Esto puede imponer restricciones en el número y los tipos de condiciones que se precisan en cada frontera.

La física de las condiciones de contorno va más allá de la física del volumen global

Como se ha indicado, las ecuaciones globales limitan y rigen la forma funcional de las condiciones de contorno. Sin embargo, los valores de los coeficientes o parámetros que se presentan en ellos siguen estando libres y deben ser determinados por la física subyacente. Esta puede ser una tarea compleja, ya que las condiciones de contorno necesitan una consideración más detallada en el sistema físico que las EDP globales. Las EDP globales se obtienen promediando cantidades, como la energía térmica, sobre pequeños elementos de volumen en los que estas características se consideran homogéneas. En las fronteras, las propiedades cambian bruscamente, haciendo necesaria la consideración de una escala menor, por ejemplo, microscópica. En consecuencia, la modelización de las condiciones de contorno debe llevar la física a un nivel superior de detalle y tener en cuenta una mayor variedad de fenómenos que la ecuación global.

Un ejemplo importante de ello está representado por las ecuaciones globales de un gas en el supuesto de equilibrio termodinámico local, en las que la temperatura está bien definida y las velocidades de las partículas siguen la distribución de Maxwell. Cuando se aproxima a la frontera, la distribución de velocidades se desvía de la existente en el volumen global debido a los efectos superficiales y el equilibrio termodinámico deja de

3 Un arco eléctrico producido entre dos electrodos. La raíz del arco constituye un contorno interesante y complejo



ser uno determinado ➔ 1. En otras palabras, las ecuaciones macroscópicas para la cantidad física *y(x,t)* a lo largo del eje *x* de ➔ 1son válidas para distancias mayores que una determinada longitud microscópica *L*, pero no por debajo de ella. Se supone que la magnitud de esta región frontera es mucho menor que la escala que se ha resuelto en la simulación numérica. La extrapolación de la solución global al contorno no coincide necesariamente con la solución microscópica. Sin embargo, la condición de contorno debe cumplir el conjunto de relaciones matemáticas establecido por la ecuación global.

En este caso viene dada por una relación general de la forma

$$ay + by' = c$$

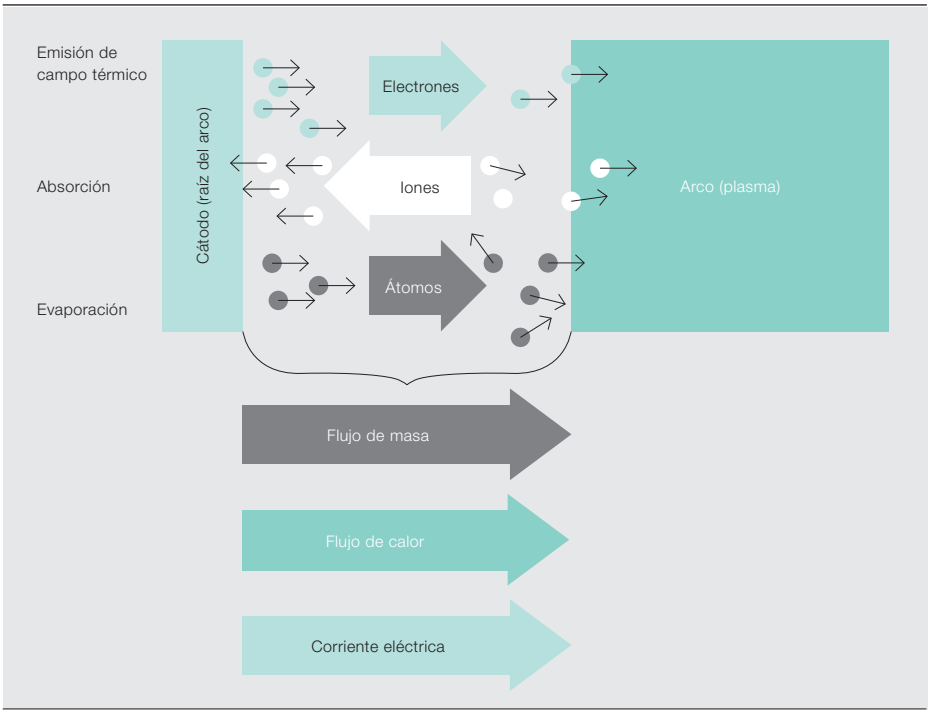
Los coeficientes *a*, *b* y *c* deben obtenerse llevando a cabo una transición suave desde la solución microscópica a la macroscópica. Por ejemplo, aunque la física microscópica fundamental requiere $y = 0$ en la frontera ($x = 0$), la condición de contorno macroscópica puede presentar una discontinuidad debido a la física en la capa límite microscópica. Un ejemplo importante es una condición de contorno de deslizamiento para la velocidad del flujo de gas (macroscópico) en una tubería, donde se admite una velocidad finita hasta la pared, aunque microscópicamente, es decir, en una capa límite viscosa muy delgada, disminuye rápidamente hasta cero en la pared.

La física subyacente que debe tenerse en cuenta en la frontera es mucho más rica que en las ecuaciones globales.

Conducción de la CC en aisladores

En los cables de CA, la distribución del campo de 50 Hz se calcula generalmente resolviendo una ecuación de Laplace para el potencial eléctrico en los materiales dieléctricos, con las condiciones de contorno adecuadas en las piezas conductoras. La propiedad relevante del material es la permitividad del dieléctrico

4 Diversos fenómenos físicos se producen en la raíz de un arco eléctrico: únicamente una vista microscópica muestra la interdependencia entre ellos



La inyección de carga desde los electrodos puede ser muy importante cuando se diseñen cables y accesorios de HVDC.

y se puede despreciar cualquier acumulación de cargas en el interior de los materiales del dieléctrico.

Sin embargo, los cálculos de campos en el aislamiento de CC son mucho más complejos porque se pueden acumular cargas espaciales en el interior del material. Debido a este proceso, a veces muy lento, la distribución de campos puede variar considerablemente a lo largo del tiempo. Un ejemplo ilustrativo de la interacción acoplada de la frontera con el volumen del cuerpo es la formación de una corriente limitada por carga espacial (SCLC). Consideremos un material que esté inicialmente libre de cualquier portador de carga y con un contacto metálico en cada lado → 2. Incluso sin tensión aplicada, los portadores de carga (digamos agujeros positivos para simplificar) se difundirán desde los electrodos al aislante.

Allí, crean una fina capa de acumulación de cargas que lleva a una mayor distribución de potencial, casi plana, en el interior del aislante. El campo eléctrico, que es esencialmente la pendiente negativa del potencial, es entonces casi cero en todas partes entre las placas, excepto cerca de los contactos → 2a. Una alta tensión aplicada a través de los electrodos induce una inclinación fuerte del potencial lo que implica un potencial máximo cerca de uno de los electrodos → 2b.

Normalmente, esta distancia es demasiado pequeña para ser resuelta en la simulación macroscópica y se excluye. Pero este máximo tiene consecuencias importantes. El campo eléctrico es cero en el máximo, como lo es, por definición, la pendiente del potencial. Esta condición se denomina “electrodo virtual” y los electrodos con esta propiedad de hacer desaparecer el campo en estas condiciones se denominan “electrodos óhmicos”. Dado que la corriente eléctrica –que es proporcional al producto del campo eléctrico, la densidad de portadores de carga y su movilidad– sigue siendo finita, un campo eléctrico evanescente junto con una corriente no nula implica que la densidad de portadores de carga diverge (se hace infinita) en el electrodo virtual. En

Los interruptores dependen en gran medida de los efectos de contorno, por ejemplo, la vaporización metálica en los interruptores de vacío y la ablación de boquillas en los interruptores de gas.

realidad, la densidad sigue siendo, por supuesto, finita debido a la acción de la difusión, que se ignoraba en esta imagen sencilla. El electrodo inyecta un gran número de portadores de carga, lo que produce una densidad de carga en el contacto tan grande que suprime el campo eléctrico. Esto puede dar lugar a un refuerzo del campo en otro lugar o después de la inversión de la polaridad.

La inyección y la acumulación de carga son de gran importancia a la hora de diseñar los dispositivos aislantes de HVDC. Una consecuencia importante es que la distribución del campo eléctrico viene entonces determinada, no sólo por una conductividad global, sino que se ve también influida por los contactos y la frontera entre ellos, lo que requiere adoptar medidas especiales para hacer resistente el aislamiento del HVDC [2].

Raíces del arco en los interruptores de vacío

En los interruptores de vacío (VCB), la interrupción de la corriente se produce a través de la formación y la extinción de un arco eléctrico [3] ➔ 3. En primer lugar, puesto que el material del volumen es vacío, la importancia de las condiciones de contorno apropiadas es obvia puesto que el plasma metálico en el VCB se origina completamente en los electrodos. En segundo lugar, el ejemplo presenta un problema multifísico de límites complejo, ya que participan varios fenómenos físicos distintos que pueden tratarse de forma independiente en el volumen global, pero están conectados en el nivel inferior.

Las raíces del arco son las áreas en las que el arco se conecta a los electrodos metálicos. Se forma una capa eléctrica en la raíz del arco. Esta cubierta no neutra establece una tensión entre el volumen de plasma y el electrodo, es decir, la caída de tensión en el electrodo, similar a la que se muestra en ➔ 2a. Esta caída de tensión crea un fuerte campo eléctrico en la superficie. Se precisa establecer una gran corriente eléctrica desde el metal al plasma haciendo que los electrones salgan del cátodo o entren en el ánodo y haciendo que los iones se desplacen a la superficie ➔ 4. Este movimiento y recombinación de iones es el mecanismo de calefacción dominante para el metal. La superficie del electrodo en la raíz del arco se calienta tanto que el metal se evapora. El arco de vacío es en realidad un arco de vapor metálico que se alimenta a sí mismo exclusivamente del material emitido desde las raíces del arco. El equilibrio entre el calentamiento superficial debido al plasma y el enfriamiento causado por la evaporación del metal determina la temperatura de los electrodos y, con ello, el rendimiento del interruptor.

Cada uno de estos procesos es complejo de por sí, pero, ya que las mismas partículas (electrones, iones y átomos) son portadoras de distintas propiedades (masa, calor y corriente eléctrica), las condiciones de contorno están interrelacionadas y esto tiene que considerarse si se desea obtener una simulación coherente.

Otro ejemplo de la importancia de los efectos del contorno se halla en la ablación de material inducida por la radiación del arco en los interruptores de gas, lo que es importante para el aumento de presión necesario en el proceso de conmutación [1].

Otros ejemplos se pueden encontrar en sensores, equipos de alta tensión aislados con aceite y otros.

Simulación fiable

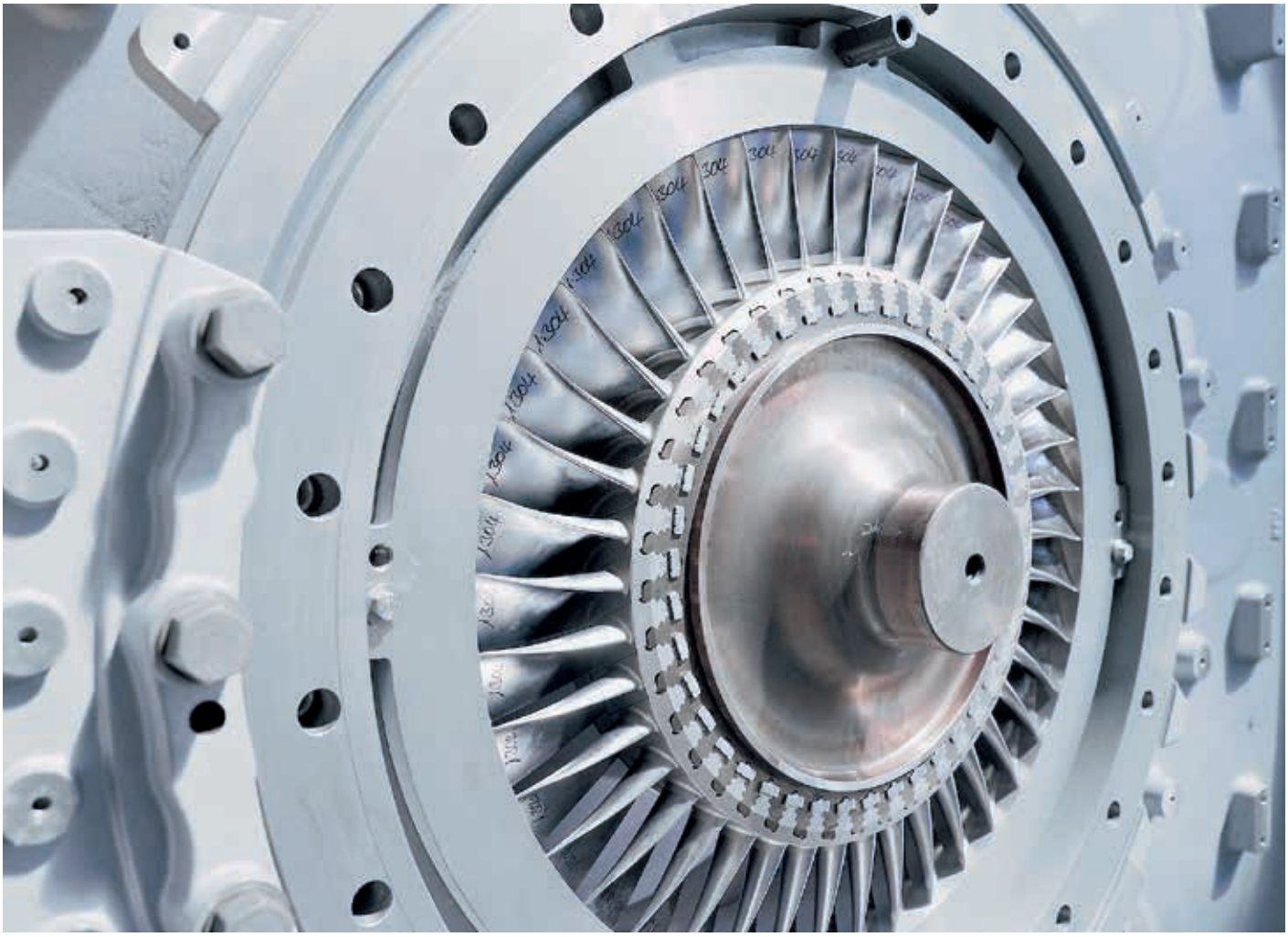
Para obtener simulaciones numéricas representativas, se deben complementar los modelos globales con condiciones de contorno adecuadas. Las fronteras tienen a menudo un efecto importante sobre el resultado aunque sólo cubren una pequeña parte de todo el sistema. Además, la variedad de procesos físicos subyacentes que debe tenerse en cuenta en las fronteras es mucho más rica que en el volumen global, cuyas ecuaciones suelen obtenerse de la simplificación de las leyes de conservación.

Es recomendable, al validar los resultados de la simulación, revisar las condiciones de contorno utilizadas, por dos razones. En primer lugar, debido a su gran efecto, a veces es fácil obtener los resultados deseados ajustando los parámetros de las condiciones de contorno. En segundo lugar, la física que se encuentra tras las condiciones de contorno suele ser muy compleja y puede ser engañosa. La elección de una buena condición de contorno no es una tarea fácil y precisa un examen a fondo de la física subyacente, pero el esfuerzo merece la pena al producir resultados de la simulación mucho más fiables. Por último, pero no por ello menos importante, una fuente importante de innovación técnica puede ser la comprensión de la física que rige el contorno.

Kai Hencken
Thomas Christen
ABB Corporate Research
Baden-Dàttwil, Suiza
kai.hencken@ch.abb.com
thomas.christen@ch.abb.com

Referencia

[1] *Revista ABB* 3/2013: Simulación, 2013, páginas 1–84.
[2] T. Christen, “Characterization and Robustness of HVDC Insulation”, en la Conferencia IEEE sobre dieléctricos sólidos, Bolonia 2013, pp. 238–241.
[3] I. Kleberg, W. Shang, “La formación de arcos. Simulación de arcos de alta corriente en vacío”, *ABB review* 1/2004, pp. 22–24.

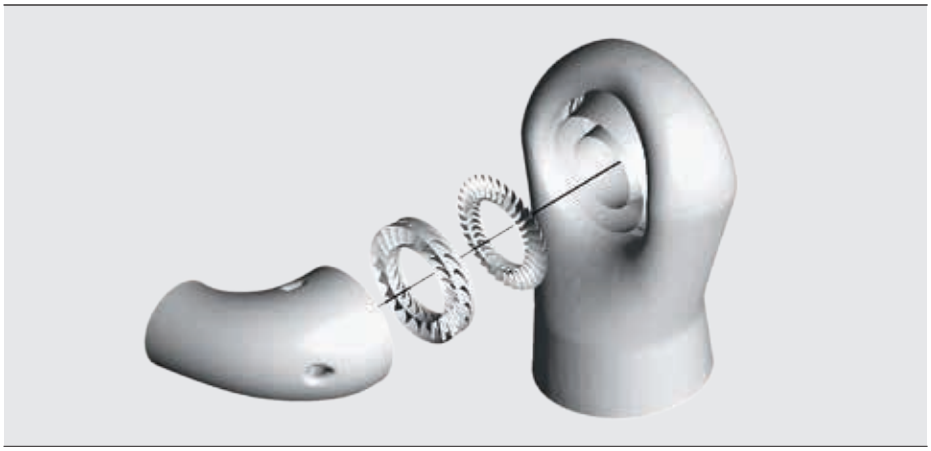


Forzar los límites

Simulación de turbinas para los turbocompresores de la próxima generación

KWOK-KAI SO, BENT PHILLIPSEN, MAGNUS FISCHER – La dinámica de fluidos computacional (DFC) ha madurado y ahora es una herramienta indispensable para el diseño y el desarrollo de turbinas. En particular, el análisis aerodinámico y la optimización de rotores y estatores axisimétricos basados en DFC se ha convertido en un procedimiento normal en el proceso de desarrollo. Las mediciones de turbocompresores en banco de pruebas han demostrado que la deformación del flujo simétrico en la entrada y en la salida de la turbina puede tener una influencia considerable sobre su rendimiento. Las simulaciones DFC de toda la turbina completa del turbocompresor, desde el borde de admisión hasta el de salida, han confirmado esta influencia y han ayudado a descubrir una geometría de turbina menos sensible a las distorsiones. Estas simulaciones han forzado los límites de la aplicación de la DFC al diseño de turbinas.

1 Modelo computacional de la turbina. De izquierda a derecha: colector de admisión, anillo de tobera, rotor y colector de escape



2 La turbocompresión multiplica la potencia

ABB lidera en todo el mundo el sector de la fabricación y el mantenimiento de turbocompresores para motores diésel y de gas desde 500 kW hasta más de 80 MW. La tecnología y la innovación de ABB permiten que los equipos de los clientes se comporten mejor y produzcan menos emisiones, incluso en los ambientes más exigentes. Unos 200.000 turbocompresores ABB trabajan en todo el mundo en buques, centrales eléctricas, grupos electrógenos, locomotoras diésel y grandes vehículos todo terreno. ABB dispone de más de un centenar de centros de servicio en más de cincuenta países y garantiza servicios y repuestos originales.

Un turbocompresor típico consta de dos sistemas principales ➔ 3: la turbina (sección naranja de la figura), que recupera la energía de los gases de escape del motor diésel; y el compresor (sección azul), que inyecta aire comprimido en el motor diésel. Con un turbocompresor, un motor diésel suministra una potencia cuatro veces mayor que con aspiración natural. En otras palabras, el turbocompresor multiplica la potencia del motor. Además, la tecnología de turbocompresión es el principal impulsor de la reducción de costes de combustible y emisiones de NO_x en motores diésel y de gas.

Un turbocompresor para una aplicación de alta potencia normalmente tiene una etapa de turbina axial con un anillo de tobera y un rotor. El colector de admisión del turbocompresor dirige el flujo de gases hacia la etapa de turbina axial situada antes del anillo de tobera. Los gases se expanden en la etapa de la turbina y mueven el rotor. Aguas abajo del rotor, el colector de salida funciona como un difusor, un elemento crucial para el rendimiento de la etapa de turbina ➔ 1–2. El flujo de gases a través de los componentes del turbocompresor debe diseñarse para garantizar el máximo rendimiento de la turbina y, en este sentido, la DFC desempeña un papel crucial en el desarrollo de turbocompresores.

Problemas en la simulación de turbinas

La simulación convencional de la etapa axial de una turbina mediante DFC se efectúa normalmente sobre dos componentes: el anillo de la tobera y el rotor. Normalmente solo se simula la circulación dentro de un segmento del anillo de la tobera y el rotor; se asume una condición simplificada de flujo axisimétrico periódico. Tradicionalmente, la simulación y el diseño de los colectores de admisión y salida se llevan a cabo en un proceso separado e independiente. La ventaja de esta estrategia secuencial del diseño es que la demanda de recursos de cálculo para la simulación del flujo para un canal del anillo de la tobera y el rotor es relativamente baja. Además, este enfoque funciona bien para condiciones axiales regulares de flujo de admisión y salida. Sin embargo, la simulación de los colectores por separado, sin la etapa de turbina, no es una simulación completa, ya que no se tiene en cuenta la interacción entre las etapas de la turbina y los colectores.

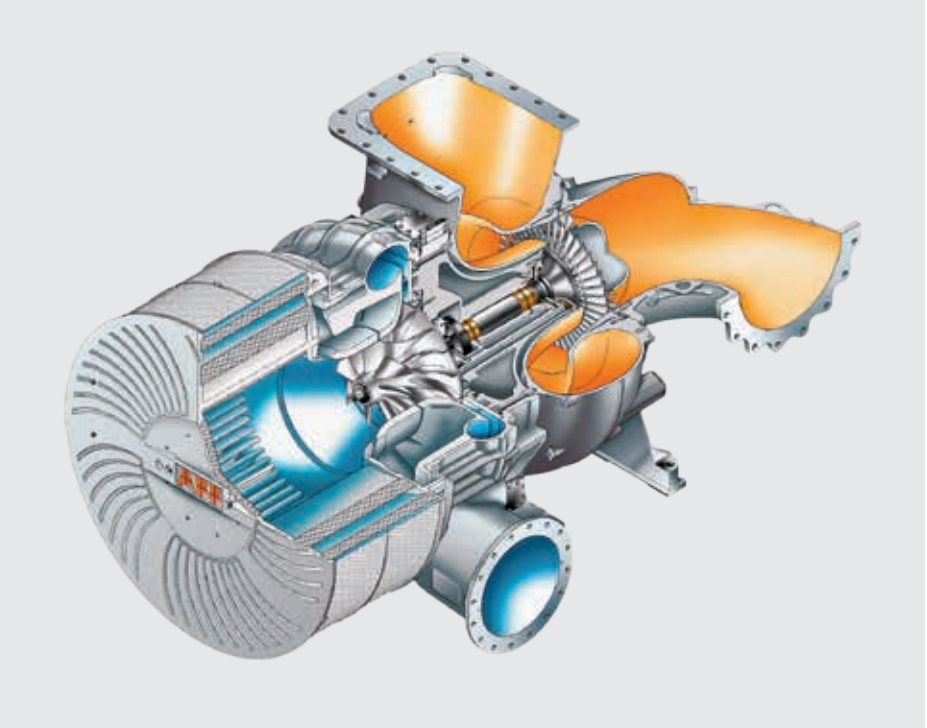
> El flujo a través de los componentes debe diseñarse para garantizar el máximo rendimiento de la turbina y, en este sentido, la DFC desempeña un papel crucial.

La dificultad en la simulación de la etapa de turbina se produce cuando el colector de admisión y el de salida presentan giros bruscos y curvas radiales debido a limitaciones de espacio. En este caso ya no se sostiene la hipótesis de que los caminos de admisión y de salida son axialmente simétricos. Estas desviaciones de flujo pueden tener un efecto considerable en el rendimiento del difusor y de la turbina, ya que pueden producirse recirculación y separación no deseadas del flujo en la zona del difusor, con la consiguiente caída de la eficiencia de la turbina. Hasta ahora, encontrar un difusor adecuado requería varias iteraciones de diseño y pruebas muy completas.

Imagen del título
¿Cómo se pueden aprovechar todas las funciones de la DFC para mejorar el diseño de las turbinas de los turbocompresores?

La dificultad de la simulación DFC multicomponente estriba en la mayor demanda de cálculo que impone el dominio de 360°.

3 Turbocompresor A175-L de ABB



Para comprobar el caudal de la etapa de turbina axial con diversos colectores de admisión o de salida sin tener que probar estas variantes de diseño en un banco de turbinas, se pueden realizar simulaciones de DFC multicomponente. A este respecto se llevaron a cabo simulaciones del colector de admisión radial junto con el anillo de la tobera para estudiar la falta de homogeneidad del flujo de entrada que se origina en el colector de admisión, en particular, el comportamiento del flujo en el difusor que está dentro del colector de salida en condiciones de ausencia de simetría axial entre la admisión y la salida. El problema de la simulación mediante DFC multicomponente es la mayor demanda de recursos de cálculo debido al dominio de cálculo en 360° que ahora es necesario como consecuencia de la invalidación de la hipótesis de caudal axisimétrico. Como sucede en general en las simulaciones mediante DFC multicomponente, son esenciales los modelos numéricos de emparejamiento de mallas para situaciones multicomponente y la definición fiable de las condiciones de límite.

A pesar de estos problemas, las simulaciones mediante DFC multicomponente sí ofrecen la oportunidad de entender mejor el flujo a través de distintos componentes. En particular se puede estudiar en detalle el efecto acoplado en la salida del rotor de la turbina sobre las condiciones de flujo en el difusor. Además, como la simulación DFC de la etapa completa de turbina, desde el borde de admisión hasta el de salida, corresponde a la configuración de medida normal en banco, los resultados numéricos de la DFC pueden validarse contra mediciones experimentales.

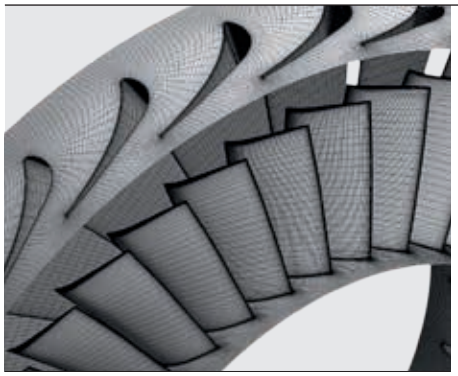
Para las simulaciones de borde a borde deberá alcanzarse un equilibrio entre el esfuerzo de cálculo y la precisión de la solución cuando se investiga la influencia de las condiciones del flujo no axial de admisión y de salida.

La DFC de alta fidelidad es la solución

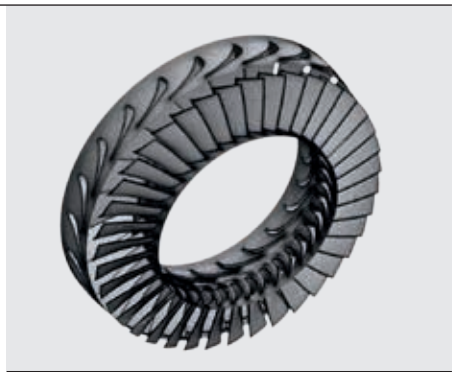
Dado el objetivo de la simulación de borde a borde, deben definirse adecuadamente las mallas de DFC, necesarias para el cálculo numérico y los modelos. Para ello se utiliza una herramienta específica de mallado que puede atender a la geometría de los álabes en el anillo de tobera y el rotor de la turbina ➔ 4, mientras que se utiliza la herramienta de mallado de uso general para los colectores de admisión y salida, donde su flexibilidad le permite abordar eficazmente los diversos perfiles curvos.

En las simulaciones DFC de régimen estacionario, las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds sirven como ecuaciones de regulación del flujo. El modelo de transporte de esfuer-

4 Adaptaciones de mallado DFC

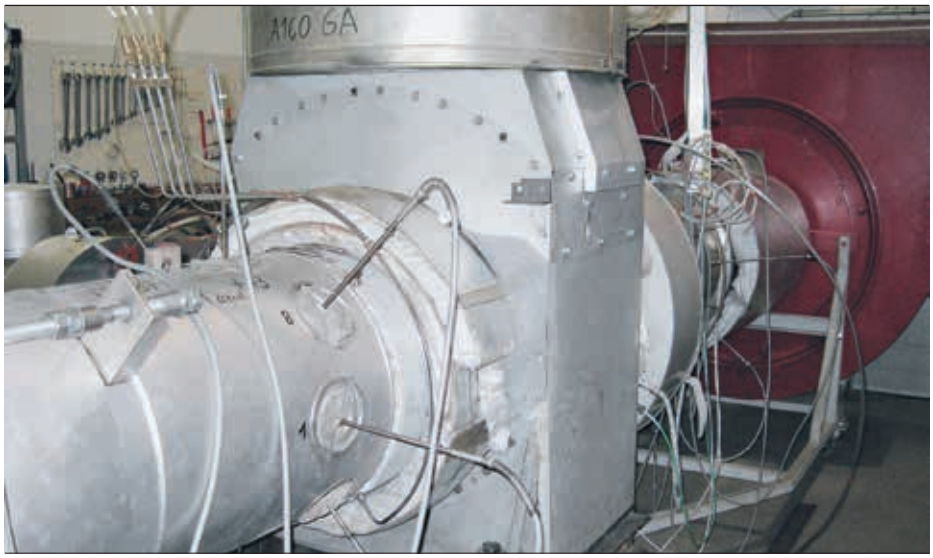


4a Álabe de tobera



4b Pala de rotor

5 La turbina en el banco de pruebas



Dado que de la simulación DFC de la etapa de turbina completa corresponde a la configuración normal de medida en banco, los resultados pueden validarse contra las mediciones experimentales.

zos cortantes k-ω, junto con un enfoque de función de pared, se ha adoptado para predecir la turbulencia, la aparición y la magnitud de la separación del flujo. La simulación DFC se configura para evitar la resolución de los efectos transitorios a corto plazo.

El anillo estacionario de la tobera y la rueda giratoria de la turbina del dominio de cálculo se acoplan mediante el llamado modelo de interfaz inmovilizado del dominio del rotor. Este modelo de interfaz es un algoritmo eficaz para calcular una solución DFC de régimen estacionario para componentes fijos y rotativos.

El modelo y la configuración DFC descritos se basan en una plataforma DFC industrial de uso generalizado cuya precisión ya está verificada. El dominio de cálculo típico consta de unos 20 millones de células y nodos. Las simulaciones a gran escala se llevan a cabo en un clúster de cálculo de altas prestaciones de ABB que ejecuta en unas pocas semanas las simulaciones de distintos componentes en diferentes condiciones de funcionamiento y de prueba.

Validación física

La configuración y ejecución del modelo de simulación es solo la mitad del trabajo. Los resultados de la simulación deben validarse contra observaciones físicas, normalmente mediciones de prueba, para garantizar que describen con precisión los fenómenos físicos.

En la instalación de prueba ➔ 5 puede medirse una extensa lista de magnitudes características de la etapa de turbina, incluidos los estados estáticos y totales de presión y temperatura en distintos puntos de la turbina, la velocidad de flujo de masa, el caudal, el trabajo y la potencia de la turbina y la eficiencia de la etapa de turbina. Esto proporciona un entorno excelente para definir con precisión las condiciones de límite en el modelo DFC y servir de base a la comparación y validación de los resultados de la simulación.

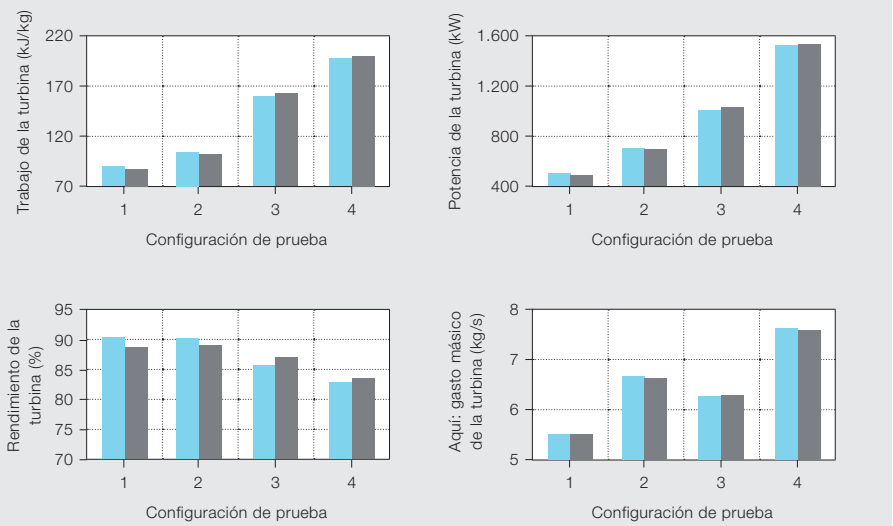
Resultados de la DFC

Se han simulado distintos supuestos en el modelo DFC: varios diseños y combinaciones de anillo de la tobera, rotor de la turbina, colectores de admisión y salida y distintas condiciones de funcionamiento con gases fríos y calientes.

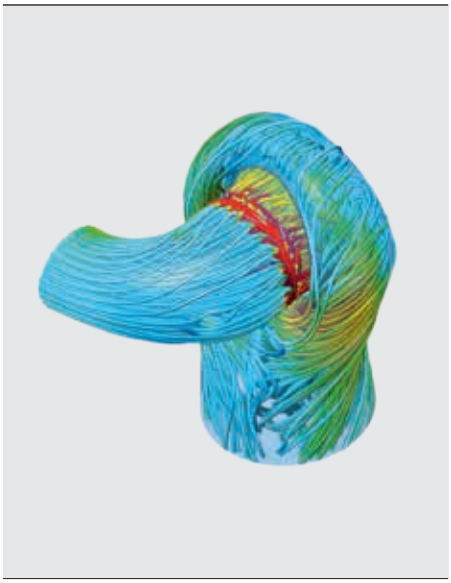
En general, el acuerdo entre las mediciones de prueba y las simulaciones DFC de las magnitudes características de la etapa de turbina fue excelente ➔ 6. Dado que las simulaciones DFC se comprueban y validan contra mediciones en banco para distintas configuraciones, se logra un conocimiento muy detallado de las condiciones de flujo en la etapa de turbina desde el borde de admisión hasta el de salida ➔ 7.

Por ejemplo, se puede simular un colector radial de admisión y un giro de 90° en la abertura de salida del colector de escape. Esta configuración presenta un alto potencial de separación y recirculación no deseadas del caudal en la zona del difusor.

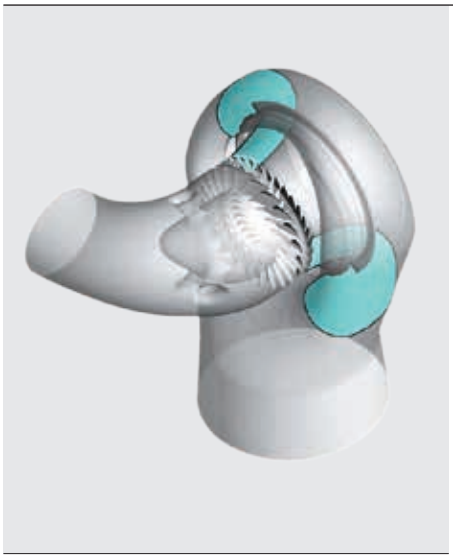
6 Comparación de determinadas magnitudes características medidas en pruebas (azul) y mediante DFC (gris)



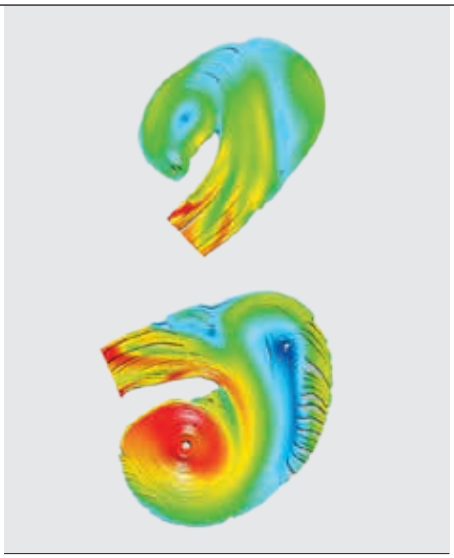
7 Líneas de corriente; el color de las líneas indica la velocidad del flujo



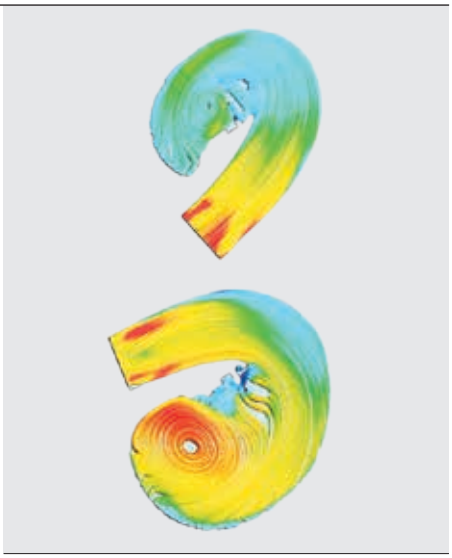
8 Líneas de corriente para diferentes diseños del colector de escape



8a Planos de interés



8b Separación de flujo no deseada y recirculación en el difusor



8c Expansión deseada en el difusor

Como demostraron las mediciones de prueba, el rendimiento de la etapa de turbina se deteriora en determinadas condiciones de funcionamiento a causa de la asimetría del flujo de admisión. La caída de la eficiencia de la turbina se puede captar y reproducir mediante simulación DFC, y las condiciones de flujo dentro del difusor se pueden analizar más profundamente estudiando las simulaciones DFC → 8. A título ilustrativo, el plano expuesto a separación y recirculación del flujo dentro del difusor se ha resaltado en → 8a Se pueden simular colectores de salida con distintos diseños de difusor para identificar los que evitan la separación del caudal dentro de la zona del difusor → 8b–8c. De esta forma, el rendimiento de la turbina se mantiene incluso con las restricciones impuestas por los colectores radiales de admisión y salida y las condiciones adversas de flujo de admisión y salida.

Panorama más allá del límite

En ABB se utiliza la DFC para conocer mejor nuevas áreas de la tecnología de turbocompresión, como la simulación de la transferencia de calor y el análisis térmico para el diseño de la refrigeración y la selección de materiales o la simulación acústica para reducir el ruido. Simultáneamente se mejoran continuamente las instalaciones de desarrollo de ABB, las herramientas de simulación DFC, el centro de pruebas y el clúster HPC. Gracias a estos esfuerzos nacerá la próxima generación de turbocompresores.

Kwok-Kai So
Bent Phillipsen
Magnus Fischer
ABB Process Automation, Turbocharging
Baden, Suiza
kwok-kai.so@ch.abb.com
bent.phillipsen@ch.abb.com
magnus.fischer@ch.abb.com

Consejo de redacción

Claes Rytoft
Director de Tecnología
I+D y tecnología del Grupo

Ron Popper
Jefe de Responsabilidad empresarial

Eero Jaaskela
Jefe de gestión de cuentas del grupo

Andreas Moglestue
Jefe de redacción de la *ABB Review*

Editorial
ABB Review es una publicación de I+D y Tecnología del Grupo ABB.

ABB Technology Ltd.
ABB Review
Affolternstrasse 44
CH-8050 Zurich
Suiza
abb.review@ch.abb.com

ABB Review se publica cuatro veces al año en inglés, francés, alemán, español y chino.
ABB Review es una publicación gratuita para todos los interesados en la tecnología y los objetivos de ABB. Si desea suscribirse, póngase en contacto con el representante de ABB más cercano o suscríbase en línea en www.abb.com/abbreview

La reproducción o reimpresión parcial está permitida a condición de citar la fuente.
La reimpresión completa precisa del acuerdo por escrito del editor.

Editorial y copyright © 2014
ABB Technology Ltd.
Zurich, Suiza

Impresión
Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn/Austria

Diseño
DAVILLA AG
Zurich, Suiza

Cláusula de exención de responsabilidad
La información contenida en esta revista refleja el punto de vista de sus autores y tiene una finalidad puramente informativa. El lector no deberá actuar sobre la base de las afirmaciones contenidas en esta revista sin contar con asesoramiento profesional. Nuestras publicaciones están a disposición de los lectores sobre la base de que no implican asesoramiento técnico o profesional de ningún tipo por parte de los autores, ni opiniones sobre materias o hechos específicos, y no asumimos responsabilidad alguna en relación con el uso de las mismas. Las empresas del Grupo ABB no garantizan ni aseguran, ni expresa ni implícitamente, el contenido o la exactitud de los puntos de vista expresados en esta revista.

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview

Avance 3|14

Minería

Nuestro diminuto planeta azul está dotado de una enorme diversidad de elementos y minerales, y los seres humanos han encontrado ingeniosas aplicaciones para muchos de ellos. Las actividades mineras suscitan actitudes encontradas y con frecuencia controvertidas. Pero la mayor parte de los materiales de importancia comercial, incluidos los que conforman los objetos que nos rodean, se han extraído en algún momento de la corteza terrestre o se han fabricado con instrumentos construidos con esa clase de materiales. La minería es un aspecto fundamental de la existencia humana, pero suele infravalorarse.

La presencia de ABB en el sector minero cubre campos muy distintos. Va desde el suministro de electricidad hasta equipos mecánicos como ascensores o ventiladores, así como los accionamientos que los controlan. También abarca instrumentos y sistemas de control y vigilancia y muchos otros aspectos.

El número 3/2014 de *ABB Review* estará dedicado a la contribución de ABB al sector minero.

ABB Review en tablets

Ya hay una versión de *ABB Review* para tabletas. La encontrará en http://www.abb.com/abbreview

Manténgase informado . . .

¿Alguna vez se ha perdido un número de *ABB Review*? Ahora le proponemos una forma sencilla de recibir un aviso cada vez que se publique un nuevo número (o un informe especial) de *ABB Review*.
Puede suscribirse a los avisos por correo electrónico en www.abb.com/abbreview

Los tiempos cambian.
La calidad permanece.

Vea nuestra nueva app *ABB Review*.
Disponible en cuatro idiomas, esta app tiene funciones interactivas para tablets y smartphones, búsqueda de todo el contenido, diapositivas, películas y animaciones.
http://www.abb.com/abbreview

ABB review
Available on the App Store
GET IT ON Google play

Power and productivity
for a better world™

ABB