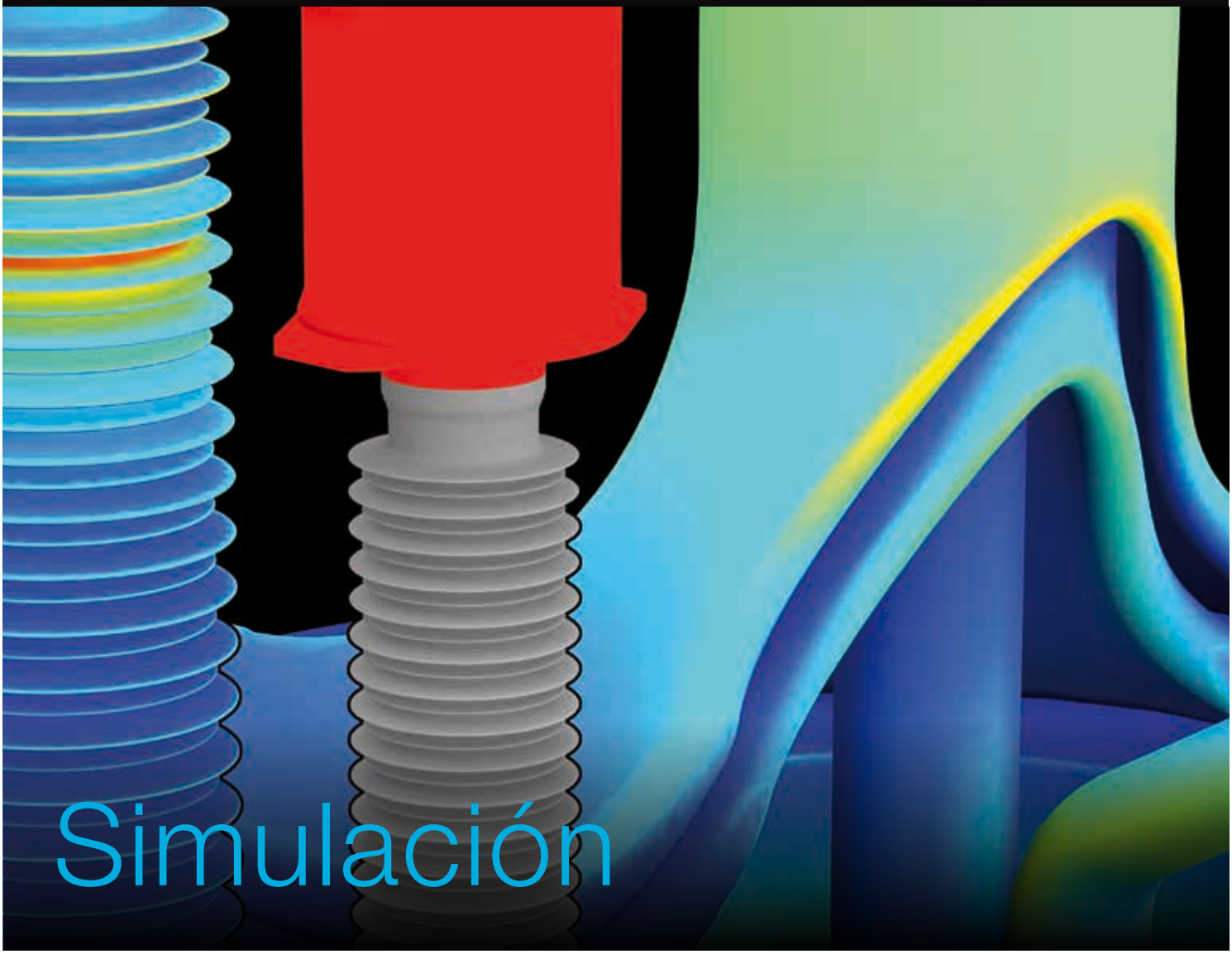
ABB review

3 | 13

La revista técnica corporativa

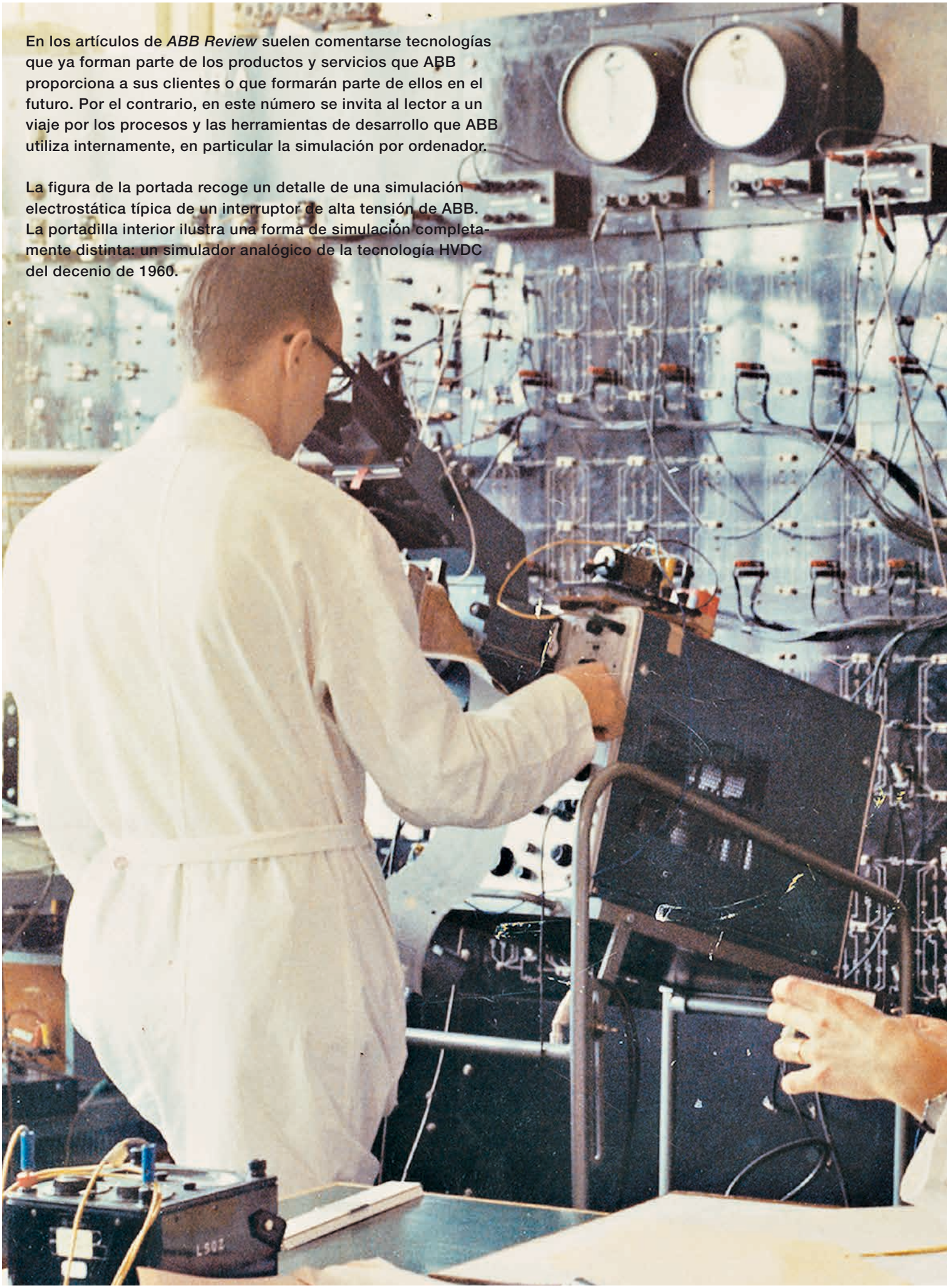
la revista ABB

Las matemáticas racionalizan los procesos 11
Seccionador ultrarrápido 27
A la cabeza en robótica 61
Vigilancia de seísmos 77



Simulación

Power and productivity for a better world™



En los artículos de *ABB Review* suelen comentarse tecnologías que ya forman parte de los productos y servicios que ABB proporciona a sus clientes o que formarán parte de ellos en el futuro. Por el contrario, en este número se invita al lector a un viaje por los procesos y las herramientas de desarrollo que ABB utiliza internamente, en particular la simulación por ordenador.

La figura de la portada recoge un detalle de una simulación electrostática típica de un interruptor de alta tensión de ABB. La portadilla interior ilustra una forma de simulación completamente distinta: un simulador analógico de la tecnología HVDC del decenio de 1960.

El mundo de la simulación

6 **Previsión de la realidad**
Potencia de simulación para un mundo mejor

11 **Reordenar el caos**
Las matemáticas aplicadas mejoran los productos, los procesos y las operaciones industriales

16 **Simulation Toolbox**
Diseño dieléctrico y térmico de aparatos eléctricos

22 **Resistir la obsolescencia**
El rostro cambiante de la simulación en ingeniería

Simulaciones de la energía

27 **Movimiento de apertura**
30 veces más rápido que un parpadeo: simulación de lo extremo en la aparamenta de HVDC

34 **Análisis de conmutación**
Simulación de arcos eléctricos en interruptores

39 **Imagen perfecta**
Simulación electromagnética de transformadores

44 **Una actuación inteligente**
Fortalecimiento de las redes inteligentes mediante una colaboración piloto en condiciones reales

Movimiento, presión y control

47 **Tiene sentido**
Diseño de sensores más precisos y resistentes mediante la simulación de sistemas y multifísica

54 **Sentir la presión**
Simulación del aumento de la presión en salas de aparamenta

61 **Diseño de robots**
La realización de prototipos y la puesta en servicio virtuales potencian el desarrollo de robots manipuladores y sistemas de automatización

65 **Ingenio integrado**
Nuevos algoritmos de simulación para el diseño rentable de convertidores de frecuencia para electrónica de potencia altamente integrados y fiables

72 **Moldear el futuro**
Mejora del procesamiento de polímeros mediante simulaciones por ordenador avanzadas

77 **Shake, rattle and roll**
Resistencia sísmica de los equipos y reducción del ruido mediante simulaciones del diseño

Simulación

Claes Rytoft

Estimado lector:

Las simulaciones por ordenador desempeñan una función decisiva y cada vez más importante en el desarrollo de productos. Dado que cada generación de un producto supera a la anterior en términos de complejidad y optimización, para los ingenieros es cada vez más importante adquirir un conocimiento más detallado de los fenómenos físicos que limitan el rendimiento. Este conocimiento detallado no puede adquirirse sólo mediante ensayos, sobre todo a la vista de las limitaciones de tiempo y dinero que impone el mercado. Además, la posibilidad de comparar nuevas variantes de un diseño y de explorar varios supuestos refuerza la confianza en la configuración elegida, y da al cliente la certeza de contar con una solución óptima.

La simulación más refinada carece de valor si el receptor de la información no entiende correctamente su margen de exactitud (todos hemos experimentado la frustración de confiar más de la cuenta en una previsión del tiempo demasiado optimista). La simulación se nutre de un amplio abanico de campos científicos, pero también ha evolucionado hasta convertirse en una disciplina por derecho propio. Los ingenieros especializados en simulación pueden responder a preguntas como éstas: ¿describe el modelo adecuadamente el fenómeno simulado? ¿qué grado de finura han de tener el mallado y la resolución temporal para que los resultados tengan una exactitud suficiente? ¿Qué simplificaciones son aceptables y cuáles no lo son? Hay que señalar que la fiabilidad de las simulaciones ha llegado a un punto tal que las comisiones de normalización, como la IEC, las aceptan como alternativa a los ensayos para algunos criterios.

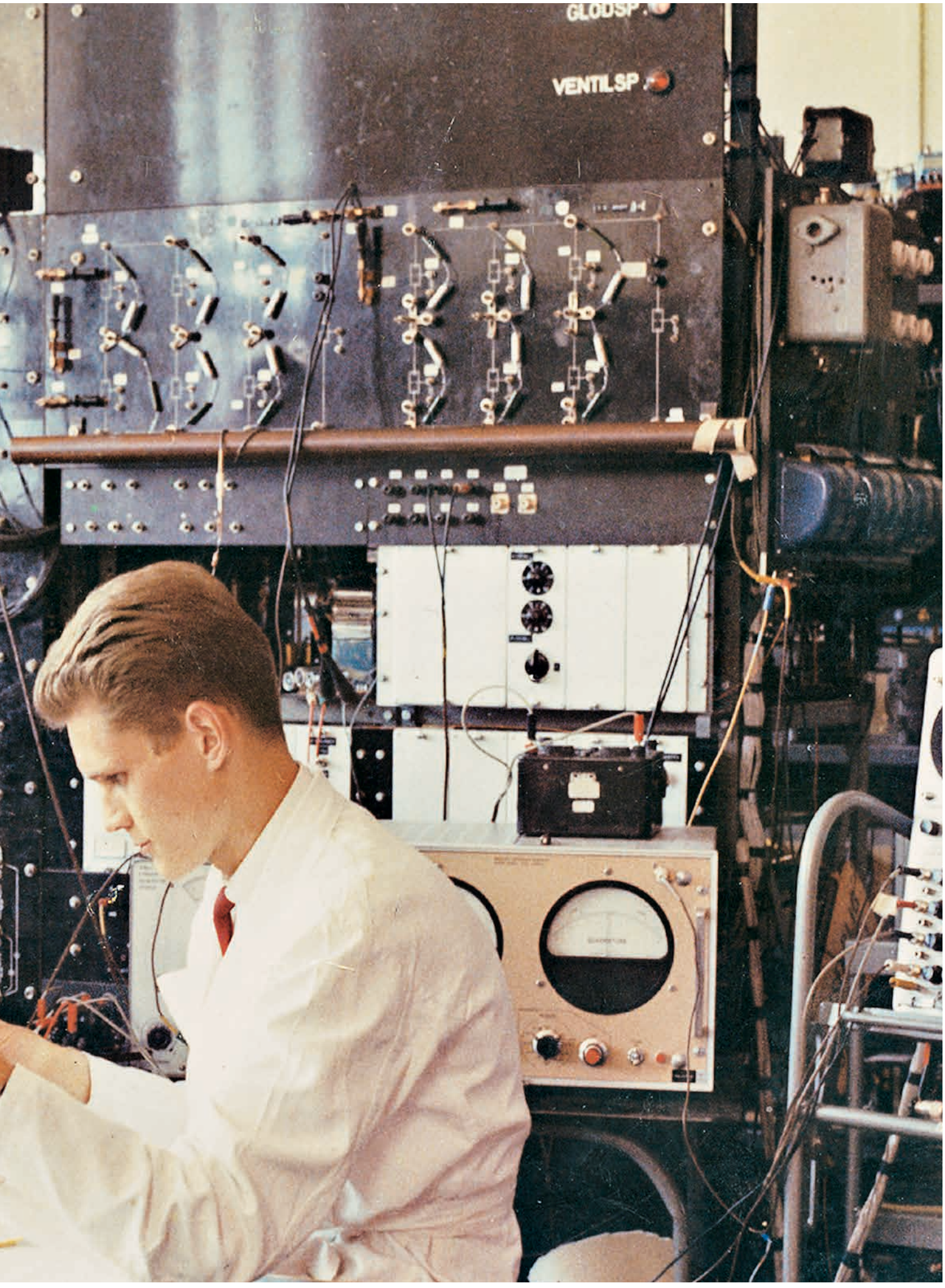
Un problema de simulación importante es la interacción entre distintos fenómenos físicos, algo que los ingenieros de simulación llaman “multifísica”. En un interruptor de corriente, por ejemplo, los fenómenos electromagnéticos, termodinámicos, de dinámica de fluidos y mecánicos se influyen mutuamente. Por tanto, la simulación debe abordar estos efectos y sus interacciones.

Este número de *ABB Review* recoge un espectro notable de aplicaciones de la simulación que va desde los transformadores hasta la electrónica integrada. Las simulaciones estudiadas cubren escalas temporales comprendidas entre la conmutación ultrarrápida y el desgaste a lo largo de toda la vida útil, pasando por el vaciado y fraguado de materiales durante la fabricación.

En un número dedicado a la simulación parece apropiado adelantar también la virtualización de *ABB Review*. En el número anterior anunciamos el lanzamiento de un servicio de aviso por correo electrónico para informar a los lectores del lanzamiento de nuevos números. Continuando por este camino, ahora hemos lanzado una versión para tabletas. Encontrará información sobre estas novedades en la página 83.

Que disfrute de la lectura.

Prith Banerjee
Consejero delegado de tecnología y
Vicepresidente ejecutivo Grupo ABB

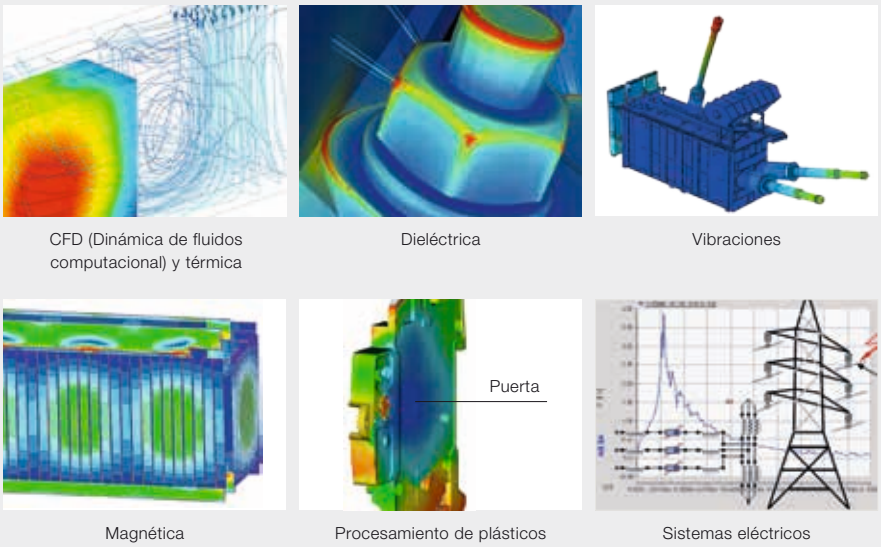

VENTILSP

Previsión de la realidad

Potencia de simulación para un mundo mejor

GEORG SCHETT, MAREK FLORKOWSKI, ARTHOUROS IORDANIDIS, PETER LOFGREN, PIOTR SAJ – Las simulaciones ocupan actualmente un lugar central en investigación e ingeniería. Los avances, tanto en la potencia de los ordenadores como en las técnicas de cálculo, permiten la ampliación constante de la gama de aplicaciones de simulación y de su precisión. El ámbito de las aplicaciones abarca desde la multifísica al estudio de sistemas, pasando por los procesos de fabricación y producción. La mayoría de los casos examinados en este número de *ABB Review* se refieren al cálculo de la distribución espacial y temporal de magnitudes físicas, como campos electromagnéticos, de caudales y de temperaturas. Este artículo se centra en algunos de los principios básicos.

1 Ejemplos de tipos de áreas y herramientas de simulación



CFD (Dinámica de fluidos computacional) y térmica | Dieléctrica | Vibraciones

Magnética | Procesamiento de plásticos | Sistemas eléctricos

El objetivo principal de la simulación en el diseño de ingeniería es comprender los fenómenos que tienen lugar en un objeto o sistema físico real, y optimizar el proceso de diseño → 1. El proceso general se inicia con la digitalización del objeto real y finaliza con la aplicación de la información digital obtenida en los cambios de diseño → 2.

Existen numerosos métodos diferentes de simulación:
- Mallado (discretización geométrica)
- Sin mallado
- Estudios de sistemas y redes
- Análisis de procesos de producción
- Otros

Modelado matemático

El modelado matemático es la primera etapa de una simulación por ordenador. En esta fase, el problema físico se describe en términos de ecuaciones matemáticas. En la simulación solo se pueden captar los fenómenos físicos descritos por las ecuaciones. La dificultad del modelado matemático estriba en encontrar un equilibrio entre la complejidad del sistema real y los fundamentos de ingeniería necesarios para la aplicación del modelo al diseño del producto. La descripción matemática correcta de los fenómenos físicos es una rama de la física teórica (o de la matemática), un campo científico a caballo entre la física y las matemáticas.

Preprocesamiento

El preprocesamiento es la etapa de preparación de la geometría para realizar las simulaciones. Se trata de otra etapa de idealización en la que la geometría se simplifica hasta el punto de que, por un lado, conserve las características geométricas relevantes y, por el otro, permita la generación de una malla apropiada. A partir de este punto, la geometría real se sustituye por una geometría mallada. La creación de una malla de alta calidad es uno de los principales obstáculos en la aplicación industrial de simulaciones. En efecto, las geometrías industriales reales suelen tener una gran complicación y no son fáciles de cubrir adecuadamente por una malla de cálculo. Por otra parte, si la malla creada es de mala calidad, es probable que dificulte la convergencia de la simulación o induzca soluciones físicamente incorrectas.

Solución

Las ecuaciones del modelo matemático se resuelven numéricamente en la malla de cálculo. El método de discretización transfiere las ecuaciones del modelo desde el dominio continuo al discreto. ABB utiliza habitualmente los métodos de elementos finitos y de frontera (FEM y BEM, respectivamente, en sus siglas en inglés) en los cálculos mecánicos y electromagnéticos, y los métodos de volúmenes finitos (MVF) en la dinámica de fluidos computacional (DFC). Estos son los métodos que ABB suele utilizar en los cálculos de campo, aunque existen numerosas herramientas comerciales y académicas basadas en otros métodos de discretización. También es habitual que las empresas tecnológicas (como ABB) desarrollen métodos y solucionadores de cálculo específicos para sus propias necesidades de ingeniería[1].

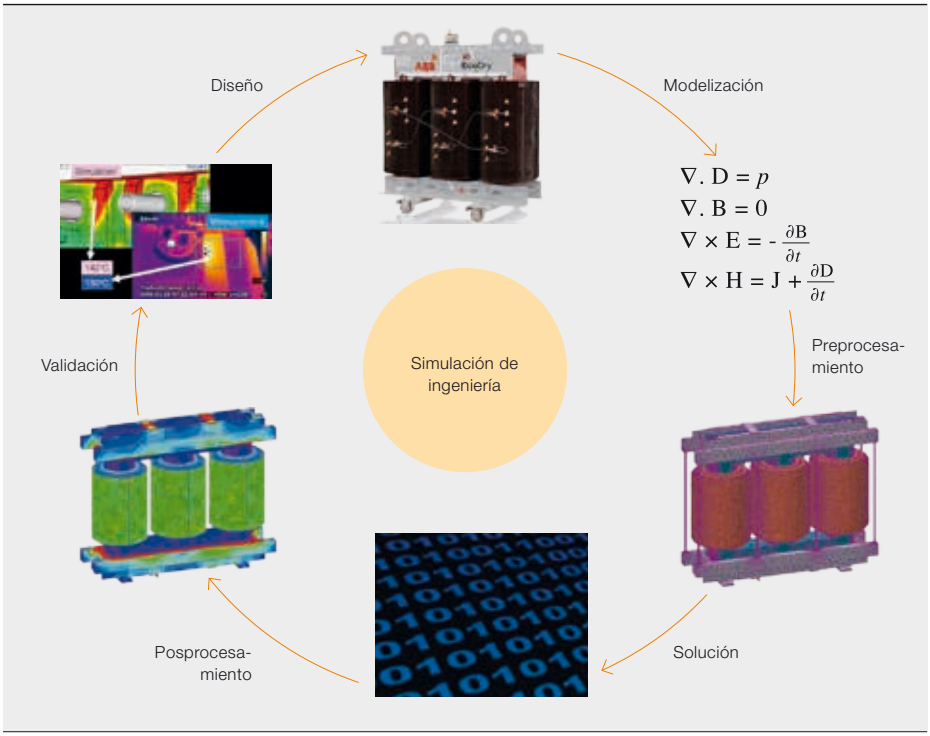
Posprocesamiento

El posprocesamiento es la etapa en que se visualizan los resultados obtenidos y es una parte integrante del proceso de simulación. En general, consiste en la presentación visual de los resultados de la simulación, normalmente en forma de un mapa (contornos) en 2-D o 3-D en el que se muestra la distribución de una magnitud obtenida a partir de los cálculos. El comportamiento dinámico del objeto o el proceso simulado se puede visualizar mediante animaciones. Este tipo de presentaciones espaciotemporales de las magnitudes físicas calculadas hace

Imagen del título
La simulación desempeña un papel fundamental en el diseño y el desarrollo de nuevos productos. La imagen del título ilustra el montaje de escudos de corona en la sala de pruebas de UHV (tensión ultraalta) de ABB en Ludvika, Suecia.

Nota a pie de página
1. Véase también “Simulation Toolbox: diseño dieléctrico y térmico de aparatos eléctricos” en la página 16 y “Análisis de conmutación: simulación de arcos eléctricos en interruptores” en la página 34 de este número de *ABB Review*.

2 Representación esquemática de un ciclo de proceso de simulación



que las simulaciones sean especialmente adecuadas y atractivas para analizar fenómenos físicos complejos en dispositivos reales. No obstante, además de las visualizaciones de campo, existen otras formas de presentación, como los gráficos de puntos y las magnitudes promedio espaciotemporales que tienen también una gran importancia, ya que se pueden comparar directamente con las mediciones. El rápido crecimiento reciente de las tecnologías de imagen digital en 3-D ha abierto también nuevas posibilidades para la visualización de datos de cálculo.

Validación

La relativa simplicidad de obtener una visión completa de fenómenos físicos complejos mediante la simulación expone su principal problema: las simulaciones pueden ofrecer resultados falsos sin relación con los fenómenos físicos reales o las llamadas "bonitas imágenes en color" con información incorrecta o incluso engañosa. Estas soluciones espurias pueden ser resultado de deficiencias en las etapas del proceso de simulación: modelo erróneo, geometría simplificada en exceso, datos de materiales inexactos, malla inadecuada y solucionador inapropiado.

Con el fin de cerciorarse de que existe una relación entre los resultados simulados y la física real, es preciso realizar una validación. Esta comprobación final se suele llevar a cabo comparando los resultados calculados y los experimentales. El proceso de validación se complica por el número limitado de parámetros que se pueden medir directamente. A pesar de las dificultades, la etapa de validación es ineludible, ya que las simulaciones validadas se distinguen por su poder predictivo (a diferencia de las simulaciones calibradas en las que la validez de los resultados es siempre discutible fuera del intervalo de calibración).

Diseño

Por último, el bucle de simulación se cierra extrayendo información de las simulaciones y realizando cambios de diseño basados en los datos. En esta etapa, el enorme potencial de las simulaciones se puede aprovechar para facilitar el desarrollo de productos. En primer lugar, las simulaciones permiten comprender los detalles de los fenómenos físicos, por lo que resultan de gran importancia para los diseñadores. Además, se tarda mucho menos tiempo en obtener resultados de las simulaciones que en construir y probar un prototipo. Uno de los puntos fuertes de la simulación reside en la capacidad de realizar estudios paramétricos que sustituyen a los costosos bucles de ensayo y error de los procesos de diseño clásico.

Simulación en ABB

Como empresa tecnológica líder, ABB ha introducido una serie de simulaciones en sus actividades de investigación y desarrollo.

Un buen ejemplo es la prueba de cortocircuito de los mayores transformadores elevadores de ABB. Es primordial que un transformador pueda soportar las fuerzas electromagnéticas que se originan a partir de las elevadas intensidades de cortocircuito. Debido a la magnitud de la energía generada, hay pocas instalaciones en el mundo donde se puedan probar estos transformadores. El problema se acrecienta por las enormes dimensiones de estos transformadores, que limitan seriamente su transporte. Por otra parte, este tipo de pruebas se asocia con unos requisitos elevados de costes y tiempo. Merece la pena destacar que los últimos avances en simulación han dado lugar a cambios en las normas internacionales, que ahora permiten demostrar la capacidad de resistencia frente a cortocircuitos mediante cálculo (IEC 60076-5).

Otro ejemplo de simulación avanzada, que proporciona una extraordinaria visión de los fenómenos físicos que tienen lugar en el dispositivo, es la simulación del arco en los interruptores. Los interruptores están diseñados para resistir e interrumpir corrientes de cortocircuito de centenares

de kA durante decenas de milisegundos. Someterlos a prueba no solo supone un gran gasto de dinero y tiempo, sino que el número de parámetros medibles es también muy limitado. ABB puede realizar simulaciones acopladas electromagnéticas, de dinámica de fluidos y mecánicas para conocer el comportamiento real del interruptor cuando se produce un corte de la corriente[2].

Las simulaciones permiten que los diseñadores obtengan un conocimiento en profundidad de las condiciones de flujo del interruptor. Pueden medir la presión y la tensión en cualquier punto del interruptor y calcular las fuerzas que actúan sobre los componentes críticos. Se trata de una técnica potente que posibilita la aparición de diseños de interruptores cada vez más fiables. Por último, casi todos los productos de ABB manejan tensiones. Si bien en los niveles de tensión más bajos se puede conseguir un aislamiento dieléctrico mediante reglas sencillas de diseño, cuando se trata de altas tensiones, el trabajo de diseño es prácticamente imposible sin los cálculos del campo eléctrico. Por lo tanto, los cálculos del campo eléctrico en 2-D y 3-D son elementos indispensables en el proceso de diseño en numerosos procesos de desarrollo de ABB.

El uso de este tipo de herramientas reduce el esfuerzo dieléctrico en las piezas críticas de los productos y evita así averías y fallos. Hasta hace poco, estas investigaciones de cálculo se realizaban mediante una serie de simulaciones con el fin de seleccionar los mejores parámetros de esta serie a menudo limitada. Actualmente, gracias a los avances en los métodos de optimización y potencia de cálculo, se pueden hallar soluciones óptimas combinando el cálculo del campo eléctrico con una optimización automática. Estos métodos avanzados ya se han integrado en las herramientas de diseño de ABB, como la Simulation Toolbox, y se está descubriendo su enorme potencial[3].

Debido a la importancia de la simulación y su rápido crecimiento en las actividades de investigación y desarrollo de ABB, se han organizado en la empresa congresos de simulación internos mundiales con el fin de compartir experiencias y buenas prácticas. En estos actos, ABB ha adquirido también conocimientos procedentes de empresas líderes en sectores afines, como el automóvil, la aviación o el consumo.

Con los conocimientos y la experiencia adquiridos, ABB ha optimizado aún más su entorno de simulación:
- Haciendo que todos los ingenieros tengan un acceso fácil a las herramientas de simulación esenciales.
- Compartiendo clústeres de simulación en el caso de simulaciones grandes y de uso intensivo de CPU.
- Organizando foros virtuales para el intercambio de las mejores prácticas.
- Facilitando apoyo de simulación a los equipos de desarrollo con menos experiencia.

Actualmente, ABB puede afirmar con seguridad que se encuentra en una sólida posición en cuanto a la aplicación de la simulación y su uso en el desarrollo de los mejores productos para los clientes. En este número de la *ABB Review* se analiza una amplia gama de simulaciones avanzadas que abarca desde los efectos electromagnéticos en los transformadores al procesamiento de plásticos.

Tendencias futuras en simulación

El progreso en la simulación ha sido posible gracias a los avances en software y hardware, principalmente de los procesadores, el almacenamiento y la comunicación. En el pasado, la simulación de gran complejidad solo se podía realizar en superordenadores o grandes clústeres, mientras que actualmente cada vez es más frecuente que ordenadores de sobremesa de alto rendimiento tengan una capacidad suficiente. La potencia de cálculo de los superordenadores pronto se medirá en hexaFLOPS y los portátiles actuales de alto rendimiento ya alcanzan valores de teraFLOPS, una magnitud difícil de imaginar hace apenas una década. Por otra parte, gracias a los nuevos procesadores de gráficos, se puede apreciar un enorme avance en el posprocesamiento y la visualización, incluida la animación de los resultados. Esta tendencia continúa, como se puede observar, por ejemplo, en la increíble potencia de cálculo de los dispositivos móviles actuales. El cálculo en la nube todavía se encuentra en la etapa de incubación, pero en un futuro próximo será posible iniciar simulaciones complejas a partir de dispositivos de escritorio o móviles y calcularlas en algún lugar de la nube.

Las áreas futuras de la simulación son ilimitadas, y van más allá de nuevos diseños, estudio de sistemas y optimización de la producción. Es posible imaginar que, en un futuro próximo, la simulación in situ se podrán basar en servicios móviles, se podrá realizar una optimización multifísica paramétrica completa e incluso habrá impresoras en 3-D equipadas con módulos de simulación y optimización que recalcularán objetos sobre la marcha antes de la impresión.

Notas a pie de página

2. Véase también “Análisis de conmutación: simulación de arcos eléctricos en interruptores” en la página 34 de este número de *ABB Review*.
3. Véase también “Simulation Toolbox: diseño dieléctrico y térmico de aparatos eléctricos” en la página 16 de este número de *ABB Review*.

Georg Schett
Power Products
Beijing, China
georg.schett@cn.abb.com

Marek Florkowski
Piotr Saj
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
marek.florkowski@pl.abb.com
piotr.saj@pl.abb.com

Arthouros Iordanidis
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Suiza
arthouros.iordanidis@ch.abb.com

Peter Lofgren
ABB Corporate Research
Västerås, Suecia
peter.lofgren@se.abb.com

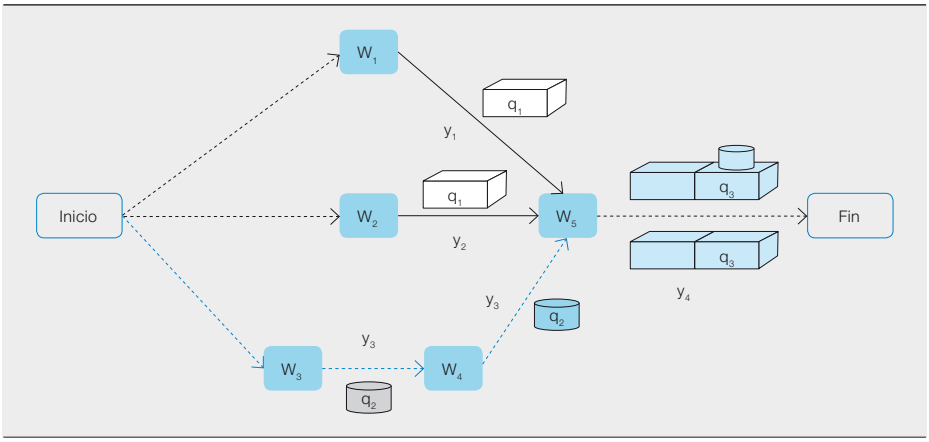
Reordenar el caos

Las matemáticas aplicadas mejoran los productos, los procesos y las operaciones industriales

LUCA GHEZZI, ALDO SCIACCA – En un mundo de recursos finitos y un número casi infinito de restricciones vinculantes, las herramientas de modelado matemático y de simulación ayudan a optimizar sistemas complejos. Las matemáticas aplicadas aportan una perspectiva racional, una definición y una representación precisas de los problemas, unas capacidades de predicción cualitativas y cuantitativas, y la posibilidad de simular la manera en que las propiedades estocásticas o las fuerzas externas impredecibles influyen en el rendimiento de un sistema. Las matemáticas aplicadas pueden generar ahorros considerables en los procesos industriales y de fabricación, así como en el mundo de las operaciones, por ejemplo, en la logística de distribución, la planificación de la producción y la organización del equipo de ventas.

Imagen del título
Durante más de 70 años, las matemáticas se han utilizado para encontrar soluciones óptimas a los problemas de múltiples variables. Las mismas técnicas se pueden utilizar en los entornos de fabricación para identificar las estrategias de producción más rentables.

1 Representación esquemática de una línea de producción sencilla en forma de grafo dirigido



Con frecuencia ocurre que en los períodos bélicos se producen avances en la tecnología y la ciencia. La investigación de operaciones (IO) y su herramienta principal, la programación matemática (PM), florecieron durante los dramáticos años de la II Guerra Mundial. En aquellos años, el objetivo era utilizar las matemáticas para resolver problemas destinados literalmente a salvar vidas, como el emplazamiento de las primeras instalaciones, escasas y caras, de radares para detectar y combatir los ataques aéreos que provenían del continente. Se necesitaba un nuevo método para optimizar una función objetivo que maximizase el territorio cubierto por el radar, teniendo en cuenta las restricciones físicas, económicas y de integridad, ya que no era posible ubicar la cuarta parte de un radar en Dover y las otras tres cuartas partes en Folkestone. Las mismas técnicas se utilizaron para determinar el tamaño y la composición óptimos de los convoyes de suministro del Atlántico Norte.

El número de aspectos abordados por la IO es cada vez mayor, incluyendo problemas de optimización combinatoria limitados por igualdades y desigualdades y que funcionan con variables discretas o continuas. Los procesos industriales, las redes de logística, la organización de ventas, la planificación y otros muchos aspectos de las grandes organizaciones están repletos de ejemplos de situaciones que se pueden optimizar con una aplicación adecuada de IO.

Programación matemática

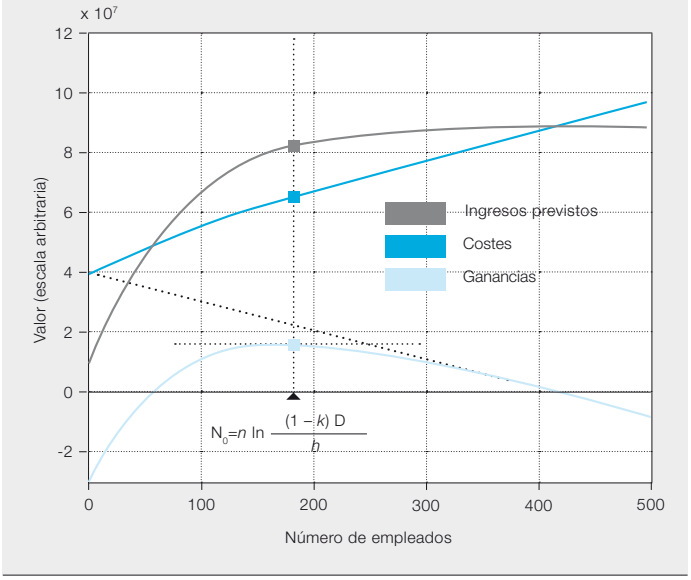
La respuesta matemática a la cuestión de la complejidad combinatoria se denomina programación matemática, en la que un "programa" es el problema de minimizar una función objetivo f(x,z), sujeta a las restricciones de igualdad y desigualdad g(x,z)=0, h(x,z)≤0, con variables reales (continuas) y/o enteras (discretas). Existen enfoques sólidos para estos programas de carácter convexo, para los que la existencia y la unicidad de una solución se pueden suponer de antemano.

El arte del modelado consiste en reducir problemas complicados a formulaciones matemáticas lo más sencillas posibles que, sin embargo, conserven la esencia del problema. Por ejemplo, en una planta de producción normal, la función objetivo suele ser el beneficio. Se trata de una función lineal de la cantidad de productos vendidos y el coste de producción que, a su vez, depende linealmente de la cantidad de producción → 1. El mercado requiere una cantidad mínima de productos que, a su vez, requieren cantidades mínimas de subproductos y así sucesivamente hasta llegar a las materias primas, trasladándose una restricción de cantidades mínimas de una etapa a la siguiente. En cada estación de trabajo del proceso, el tiempo de máquina acumulado requerido está limitado por el tiempo de máquina disponible. Algunas estaciones requieren mano de obra que se extrae de la reserva de capacidad finita (con las restricciones de especialización de competencias correspondientes), lo que plantea nuevas restricciones de desigualdad. Los depósitos y almacenes intermedios pueden formar agrupaciones dinámicas de reserva de artículos, que se agotarán o aumentarán, con límites inferiores (margen de seguridad frente a la rotura de stock), límites superiores (capacidad) y otras contribuciones de costes.

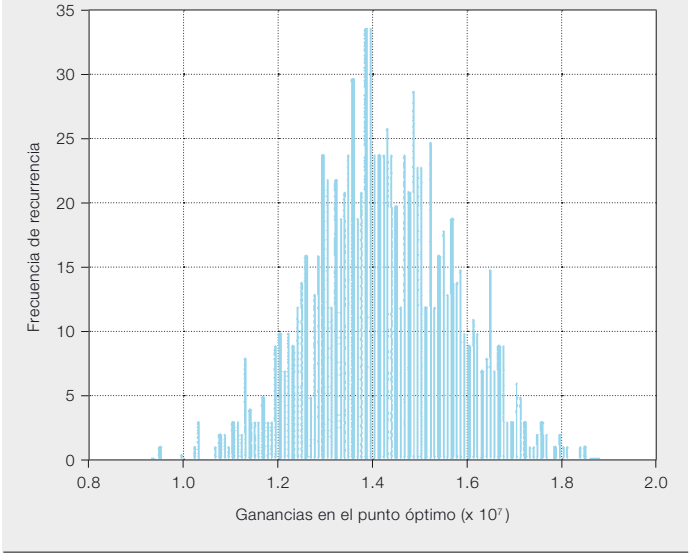
> El arte del modelado consiste en reducir problemas complicados a formulaciones matemáticas lo más sencillas posibles que, sin embargo, conserven la esencia del problema.

Lo anterior se puede transformar en un programa convexo, y la PM facilitará una estrategia de gestión óptima. Una amplia serie de bloques de construcción, con miles de variables y restricciones lineales, permite modelar una línea de producción completa, o incluso una fábrica, incluidas las etapas de contratación de servicios externos. De hecho, este mismo ejercicio se realizó para la planta de motores eléctricos de ABB en Vittuone, Italia.

2 Un método sencillo produce resultados



2a Ingresos previstos (gris), costes (azul) y ganancias (azul claro) en función del personal de ventas, con dimensionamiento óptimo



2b Propagación de la varianza sobre las ganancias en un caso ilustrativo

Teoría de grafos

Como se ve en el ejemplo anterior, un grafo ofrece una representación clara, ordenada, intuitiva y visual del problema que se desea resolver. En efecto, la teoría de grafos es una herramienta principal de la IO, tanto para fines de solución como de representación.

Desde la perspectiva de la teoría de grafos, todos los sistemas arbitrarios representados por nodos y conexiones se pueden tratar de la misma manera. Por lo tanto, una red de logística de distribución o una red de suministro se pueden modelar gráficamente de la misma manera que una planta de producción. Los clientes a los que hay que prestar servicio, los puntos de tránsito, los centros logísticos, los almacenes y el equipo de producción son los nodos del grafo, mientras que las rutas admisibles son las líneas de conexión. Las restricciones de capacidad influyen en el transporte, la gestión de las operaciones y la producción. Las demandas del mercado plantean límites inferiores para las mercancías enviadas (el resto corresponde al inventario del almacén) y a todo se le asigna un coste.

Muchos problemas de PM canónicamente formulados para la optimización de redes se corresponden con los problemas de la teoría de grafos clásica, en la que teoremas sencillos pero potentes ofrecen soluciones exactas, directamente y sin demasiados cálculos numéricos.

Parte de la red logística de ABB en Italia se ha simulado de esta manera con el fin de desarrollar una estrategia de gestión óptima.

Heurística

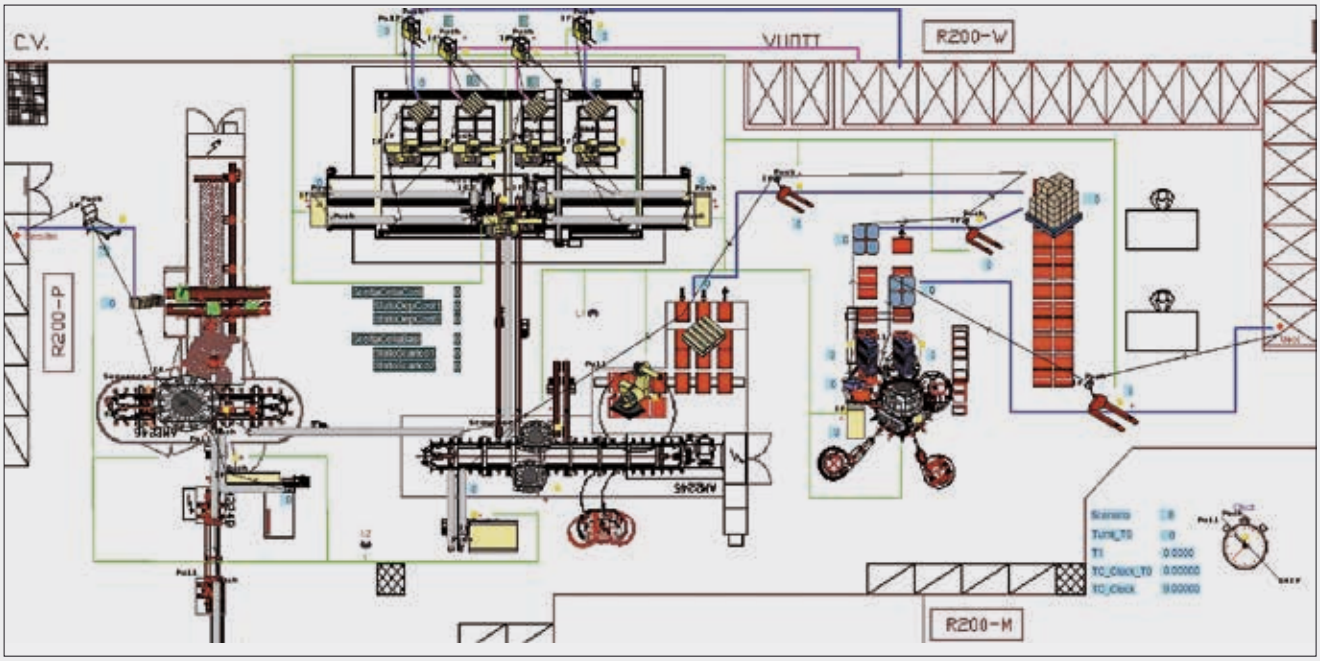
A menudo, el cálculo de una solución exacta lleva demasiado tiempo. Además, los datos suelen ser intrínsecamente inciertos y mutables y se necesita en todos los casos un margen de seguridad. Por lo tanto, es frecuente que una solución subóptima sea la opción más razonable.

Basándose en diferentes enfoques, como la aplicación de secuencias de reglas de mejora o la imitación de la evolución de los sistemas físicos, humanos o biológicos, los métodos heurísticos son métodos de descubrimiento que conducen a una solución que no es necesariamente la óptima, pero que se le acerca de una manera aceptable. En ocasiones, la clave de un buen método heurístico puede provenir de las matemáticas puras.

Por ejemplo, siguiendo, de una manera heurística, los mismos pasos del famoso algoritmo euclidiano del máximo común divisor de números enteros, es posible secuenciar una serie de diferentes elementos pertenecientes a determinadas familias, como los productos de fabricación de un plan de producción, para tratar de maximizar su dispersión (es interesante que en este caso se busca más caos, no menos).

A menudo, se tarda demasiado tiempo en calcular una solución exacta, por lo que, en muchos casos, una solución subóptima puede ser una opción más razonable.

3 Simulación de un suceso discreto de la parte “final de máquina” de una línea de montaje de interruptores diferenciales F200 en la factoría de ABB en Santa Palomba, Italia



La simplificación del problema es siempre un buen enfoque de partida. Una apreciación de la sensibilidad de las variables y los efectos del orden de magnitud también ayuda en la formulación de un problema.

Este método, acompañado de otros enfoques heurísticos, adaptables y basados en el mix de producción, y recetas empíricas deducidas de las mejores prácticas de campo, es actualmente un componente del programador de línea a corto plazo (una semana) que se utiliza en la planta de interruptores de vacío de ABB en Dalmine, Italia. La combinación de diferentes herramientas en un sistema flexible y reactivo, que interactúa fácilmente con la inteligencia humana, es, en sí misma, una súper herramienta heurística que sirve de respuesta a la complejidad y el caos.

Modelado analítico exacto

La simplificación del problema es siempre un buen enfoque de partida. Una apreciación de la sensibilidad de las variables y los efectos del orden de magnitud también ayuda en la formulación de un problema. Exactamente es lo que se requiere, por ejemplo, cuando se simulan cifras de ventas. Se puede describir una curva de saturación de ingresos, que modela los regímenes del mercado virgen y maduro, mediante una ecuación diferencial con algunos parámetros que se pueden derivar a partir de los datos históricos del mercado disponibles. Añadiendo una curva de costes dependiente de los ingresos, se puede generar un modelo analítico diferenciable lo suficientemente sencillo como para resolverse en forma cerrada, lo que permitirá identificar los ingresos y sus valores máximos → 2.

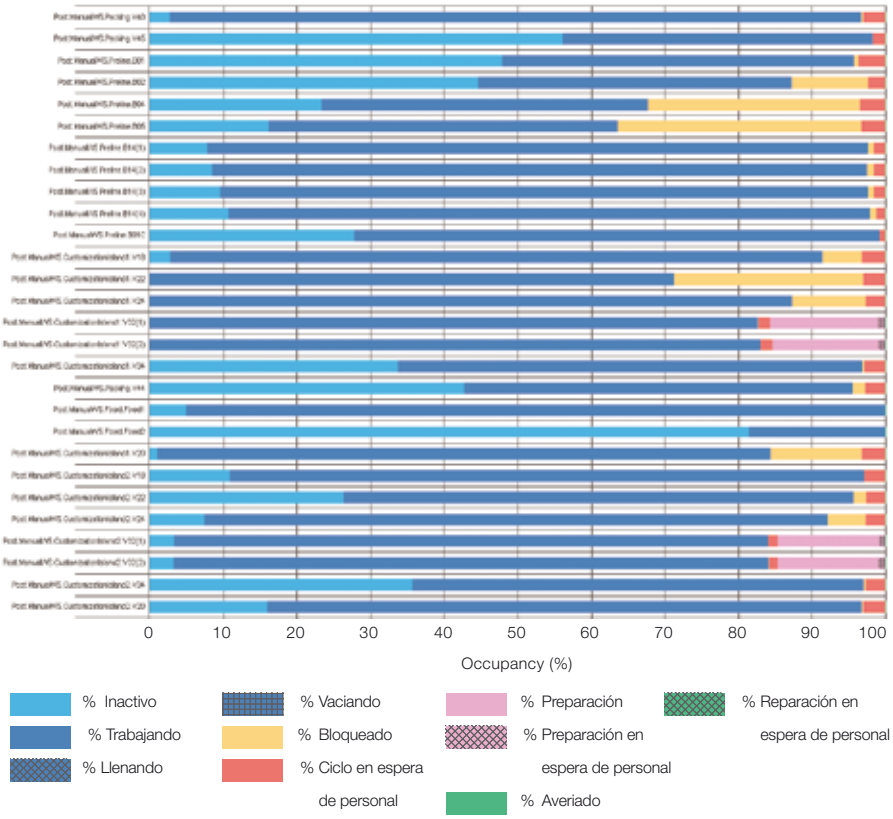
Sistemas estocásticos

Muchos procesos tienen incertidumbre en sus datos de entrada, por lo que a menudo se expresan como una función de densidad de probabilidad (FDP) que describe, para cada entrada, la probabilidad de ocurrencia de cada uno de sus valores admisibles. Naturalmente, los datos de salida del proceso serán no deterministas. Hay diversos métodos que describen esta imprevisibilidad.

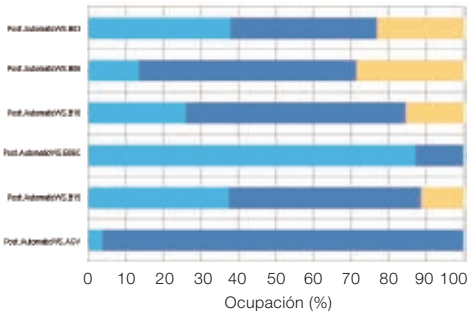
El famoso método Monte Carlo (MC) desarrolla la FDP de salida ejecutando numerosas entradas (a menudo más de un millón) seleccionadas aleatoriamente a través de un simulador determinista de caja negra. La tasa de convergencia asintótica es independiente del número de elementos de datos de entrada (lo que no significa que con pocas o muchas variables aleatorias el tiempo de convergencia sea el mismo). El MC es fácil de entender y barato de implementar, pero a menudo es demasiado lento.

Una alternativa reciente es el llamado método del caos polinomial (CP). La idea básica es ampliar la FDP de salida hasta obtener una serie truncada de funciones básicas conocidas, por ejemplo, polinomios ortogonales (de ahí el nombre). La

4 Ocupación tras una simulación de sucesos discretos.
Los códigos de color indican ocupado, corriente bloqueada aguas arriba o aguas abajo, en espera de trabajo o reparación, etc.



4a Ocupación de la máquina



4b Ocupación de la mano de obra

ortogonalidad polinomial permite determinar con rapidez los coeficientes de expansión, generalmente con tan solo unas ejecuciones del simulador determinista.

Simulación de sucesos discretos

Los métodos cuantitativos, estratégicos y de alto nivel, como la PM, ayudan, pero no son suficientes, para reflejar con precisión las situaciones de la vida real. La entrega tardía de piezas, las averías y el mantenimiento de las máquinas, la planificación de la mano de obra y otros factores que complican las operaciones de producción se deben tener también en cuenta.

Una solución es la simulación de sucesos discretos. Se trata de una réplica virtual de la fábrica (o la red de logística, el almacén, etc.) que refleja los elementos que pasan a través de las diferentes estaciones de producción y los efectos sobre el proceso de las interferencias deterministas y estocásticas. Se pueden utilizar herramientas comerciales para reproducir el sistema real hasta el nivel de detalle necesario y ejecutar distintos escenarios con el fin de determinar la distribución óptima de mano de obra, la asignación de máquinas, la estrategia de planificación, etc.

Varias fábricas de ABB se han analizado con simulaciones de sucesos discretos. De esta forma se obtienen representaciones visuales e intuitivas, como vistas CAD de diseño en la que aparecen los empleados, las piezas y los productos desplazándose de una máquina a otra ➔ 3. Uno de los resultados principales es un conjunto de tablas en las que se muestra la cantidad de tiempo real utilizado por los empleados y las máquinas en el procesamiento, o el tiempo de inactividad provocado por los cuellos de botella a lo largo del proceso o las necesidades de reparación ➔ 4. Esta información es fundamental para una asignación de recursos adecuada.

Un esfuerzo continuo

En algunos casos, una única simulación es suficiente. En otros casos, la simulación se puede convertir en una herramienta integrada que se utilizará constantemente. En cualquier caso, si no existe una validación empírica permanente, no será posible realizar un modelado y una simulación eficaces.

Los requisitos clave para que la implementación de las técnicas mencionadas en este artículo tenga éxito son un compromiso firme acompañado de un enfoque bien estructurado de recopilación y gestión de datos. Este enfoque implica una inversión que va más allá de la implementación de una determinada solución de TI y cuyo retorno también es tangible en ausencia de simulaciones.

Con las simulaciones se evalúan cuantitativamente las medidas de ahorro de costes o de mejora antes de que se adopten y permiten una mejor ejecución de las operaciones a corto, medio y largo plazo. Por lo tanto, una aplicación minuciosa y con talento de la PM puede aportar mejoras considerables en el margen de beneficios de una empresa.

Luca Ghezzi
Aldo Sciacca
ABB LPED
Milán, Italia
luca.ghezzi@it.abb.com
aldo.sciacca@it.abb.com

Simulation Toolbox

Diseño dieléctrico y térmico de aparatos eléctricos

ANDREAS BLASZCZYK, JÖRG OSTROWSKI, BOGUSLAW SAMUL, DANIEL SZARY – La demanda y la tendencia de los aparatos eléctricos van hacia la compacidad y la eficacia en relación con el coste, por lo que los creadores se ven obligados a emplear aislamientos híbridos sólido/gas y a optimizar la forma de los electrodos para mantener la tensión no disruptiva por encima de niveles aceptables. Además, los altos valores de las corrientes nominales de los aparatos pueden producir problemas de disipación de calor que exigirían un sistema de refrigeración complejo y aumentarían de esa forma el tamaño y el precio del aparato, con lo que también es esencial un diseño térmico inteligente. El software de simulación ayuda al proyectista a incorporar estos aspectos dieléctricos y térmicos, pero ello exige análisis especiales que no proporcionan las herramientas de simulación usuales, especialmente cuando se trata de evaluar las descargas eléctricas y la dependencia entre el flujo del fluido y los efectos electromagnéticos. Este vacío se ha visto reducido por Simulation Toolbox, una colección patentada de herramientas y procedimientos de simulación creada por ABB.

La ventaja fundamental del método reticular es el rendimiento.

La creación de la Simulation Toolbox de ABB en el decenio de 1990 se vio fuertemente impulsada por la necesidad de que los proyectistas simularan situaciones dieléctricas y térmicas complejas en aparatos eléctricos sin necesidad de recurrir a expertos en simulación en exclusiva. Al mismo tiempo, se ha conseguido que la Simulation Toolbox sea fácil de usar.

– Los procedimientos de simulación se integran directamente en las herramientas de diseño, como el diseño asistido por ordenador (CAD) o los sistemas de diseño específicos del producto. La mayor parte de las interacciones con el usuario se pueden llevar a cabo dentro del sistema de diseño nativo, sin necesidad de herramientas especializadas de terceros.
– El tiempo de aprendizaje de los procedimientos específicos de simulación es de unos pocos días o semanas.
– Los procedimientos de simulación proporcionan las respuestas a planteamientos de problemas normales en un plazo razonable, cuando ello es posible.
– Estos procedimientos están siendo constantemente mejorados y puestos al día por los investigadores de ABB y sus colegas universitarios.
– La infraestructura de hardware y software necesaria para simulaciones de altas prestaciones está disponible a través de la intranet de ABB. No se precisa ninguna inversión en el emplazamiento del desarrollador.

Más de 100 usuarios de todo el mundo pueden acceder ahora a la plataforma, a la que envían más de 10.000 trabajos de simulación al año.

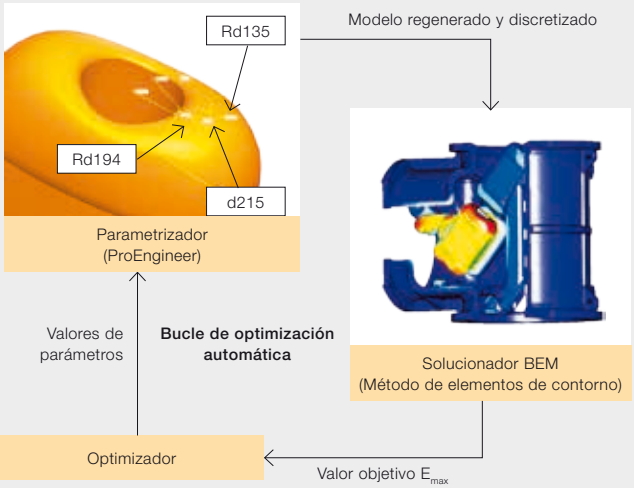
La primera puesta en práctica de la Simulation Toolbox, basada en un clúster de Linux Beowulf creado durante un proyecto universitario hace más de 10 años [1], fue bien recibida en ABB. Más de 100 usuarios de todo el mundo pueden acceder ahora a la plataforma, a la que envían más de 10.000 trabajos de simulación al año. El mantenimiento está en manos de un equipo especial que presta apoyo y formación.

Imagen del título
La simulación del comportamiento térmico y electromagnético de aparatos eléctricos compactos exige más potencia de simulación de la que proporcionan los productos comerciales. Simulation Toolbox de ABB ofrece esa potencia extra necesaria.

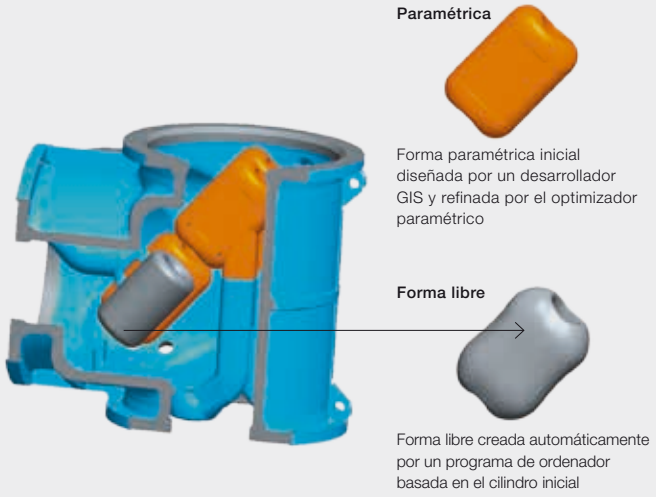
El método de elementos de contorno

Normalmente, el primer paso de una simulación de dieléctrico implica el cálculo del campo electrostático para una geometría 3-D compleja. Este tipo de cálculo, basado en la resolución de ecuaciones lineales de

1 Optimización paramétrica para el diseño del dieléctrico de aparamenta aislada en gas: arquitectura del proceso básico y ejemplo de cálculo.



2 Optimización de dieléctrico de forma libre de un componente GIS



Recientemente, en una colaboración entre ABB y varias universidades europeas, se ha investigado otro método de optimización: la optimización de forma libre.

Laplace, ha estado disponible en muchos paquetes comerciales de software electromagnético desde el decenio de 1980. Sin embargo, una simulación realmente efectiva exige la posibilidad de llegar a modelizar hasta muy pequeños detalles en 3D, pues es este detalle el que suele determinar la calidad global del diseño. A principios del decenio de 1990, ABB demostró que el denominado método de elementos de contorno (BEM) resolvía eficazmente modelos muy complejos y detallados. Esta técnica constituyó uno de los primeros componentes de la Simulation Toolbox y sigue siendo ampliamente utilizada actualmente por los ingenieros de ABB [2].

Optimización paramétrica

La ventaja fundamental del método Simulation Toolbox es su estrecha integración con los sistemas CAD, que cubre la definición de las condiciones de contorno, las propiedades de los materiales y el mallado. A diferencia de las herramientas de elementos finitos, no se precisa el mallado del espacio exterior (el llamado “airbox”). Todas estas características permitieron la creación totalmente automática de modelos discretos (mallados) y abrió un nuevo campo de diseño dieléctrico avanzado: la optimización paramétrica → 1. El procedimiento (desarrollado conjuntamente con un asociado universitario [3]) lleva a cabo de forma totalmente automática, para cada caso calculado, muchos cientos de cálculos complejos en 3D. Normalmente, un proyectista que envía al sistema de la Simulation Toolbox un modelo CAD/ProEngineer preparado, recibe en unas pocas horas una respuesta en forma de geometría optimizada o de secuencia de resultados para un conjunto recomendado de parámetros geométricos.

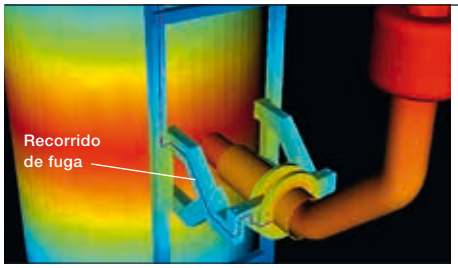
La optimización de forma libre

Recientemente, en una colaboración entre ABB y varias universidades europeas, se ha investigado otro método de optimización: la optimización de forma libre [3]. Este procedimiento numérico se basa en una formulación del “problema adjunto”, que entrega la información de gradiente utilizada por el optimizador para modificar las coordenadas de los nodos del mallado. En contraste con el método paramétrico, la optimización de forma libre no precisa la especificación de parámetros geométricos. En su lugar, el algoritmo de cálculo crea una nueva forma y ello reduce considerablemente el esfuerzo que los proyectistas precisan para preparar la geometría inicial. En el ejemplo que se presenta en → 2, se ha utilizado como geometría inicial un simple cilindro. El optimizador de forma libre ha convertido el cilindro en una nueva forma muy parecida al resultado del procedimiento paramétrico. El nuevo método sigue precisando alguna investigación pero, como componente de la Simulation Tolbox, puede estar disponible para los ingenieros de ABB de forma inmediata, mucho antes de que se pueda obtener con herramientas comerciales un procedimiento similar.

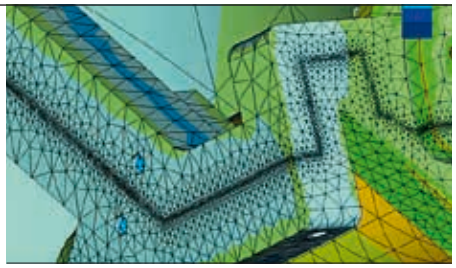
Diseño dieléctrico para transformadores y aparamenta

La predicción de la tensión no disruptiva es una de las tareas de simulación más complicadas del diseño de aparatos eléctricos.

3 Ejemplo de evaluación del recorrido de una descarga: recorrido de fuga definido para un transformador eléctrico a lo largo del soporte de un conductor de salida

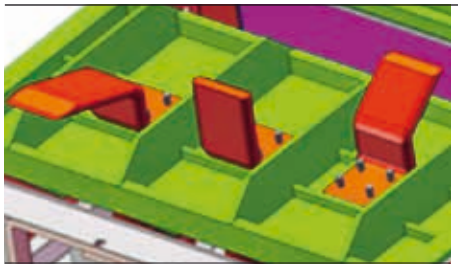


3a Distribución potencial

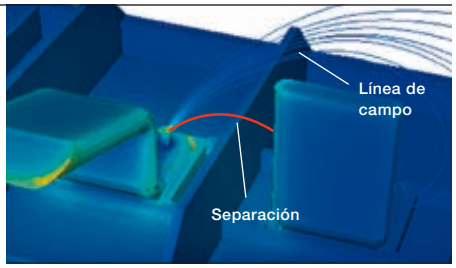


3b Distribución de la intensidad de campo

4 Ejemplo de evaluación del recorrido de una descarga: aparamenta de media tensión aislada en aire con aislamiento híbrido.



4a Vista general de los terminales



4b Líneas de campo para evaluación de la tensión de establecimiento y el recorrido de la descarga a lo largo de la separación entre el punto de establecimiento de la descarga y la fase próxima (línea roja)

Una simulación realmente efectiva exige la posibilidad de llegar a modelizar hasta detalles muy pequeños en 3D, pues es este detalle el que suele determinar la calidad global del diseño.

No basta con un conocimiento de la intensidad de campo máxima para hacer predicciones acerca de la eficacia del aislamiento en configuraciones físicas complejas que implican barreras aislantes y electrodos empotrados en dieléctrico sólido.

Es esencial evaluar adecuadamente las características de una descarga ("streamer" o trayectoria precursora del arco y "leader" o canal conductor) que se puede iniciar en puntos críticos. Un sistema aislante adecuadamente diseñado debe asegurar que, incluso si se inicia un *streamer*, la descarga de propagación se extinguirá en el camino entre los electrodos, y la probabilidad de una avería será lo suficientemente pequeña como para superar las pruebas de tipo del dieléctrico.

Se puede simular la distribución potencial de un recorrido de fuga a lo largo del conductor de salida, y el proyectista puede comprobar si el esfuerzo debido a la fuga acumulada se encuentra dentro de los márgenes permitidos por la norma técnica de ABB → 3. Asimismo, las líneas de campo para un terminal de un componente de aparamenta de media tensión se pueden calcular y utilizar para evaluar la tensión de iniciación del *streamer* para la que el número de electrones generado por el mecanismo de avalancha es suficiente para crear una cabecera del *streamer* que se autopropague → 4. Si se produce la iniciación, se debe basar el nuevo dimensionamiento en la separación entre el punto de iniciación y el electrodo próximo; el proyectista comprobará que la intensidad de campo media a lo largo de la separación es menor que el campo de estabilidad del *streamer* determinado empíricamente para el impulso positivo en aire [4].

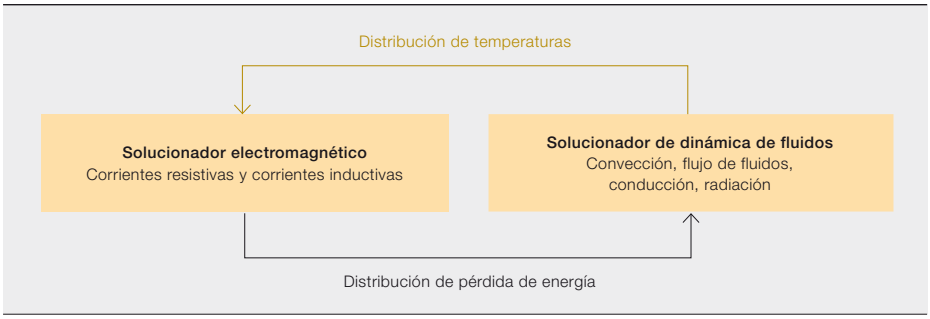
Simulaciones electrotérmicas

La simulación de un aumento de temperatura en los aparatos eléctricos es una tarea compleja. Los conductores se calientan con las pérdidas debidas a corrientes resistivas e inductivas, se enfrían por convección y radiación del calor, y el calor se distribuye por conducción. De esa forma, en la simulación hay que tener en cuenta la interacción entre los fenómenos electromagnéticos, de dinámica de fluidos y de radiación, que ya son bastante difíciles de simular individualmente.

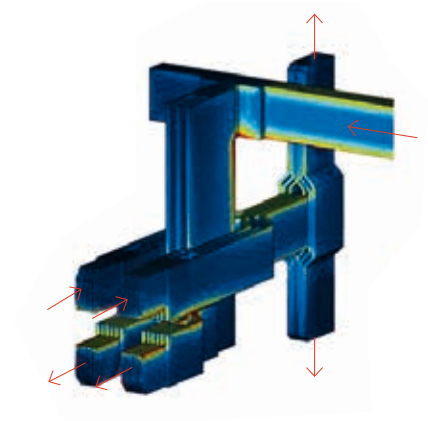
En el campo electromagnético, las corrientes resistivas son dominantes, pero a veces hay que tomar en cuenta fenómenos inductivos tales como los efectos pelicular y de proximidad. El enfriamiento convectivo turbulento sigue constituyendo un reto en la dinámica de fluidos computacional (CFD), especialmente por lo

La Simulation Toolbox de ABB permite a los proyectistas simular situaciones complejas dieléctricas y térmicas en aparatos eléctricos sin necesidad de recurrir a expertos en simulación.

5 Acoplamiento electrotérmico: el solucionador electromagnético calcula la distribución de pérdidas que se traslada al solucionador CFD, que devuelve la distribución de temperaturas.



6 Cálculo combinado electromagnético/térmico para un sistema de barra de bus de baja tensión



6a Distribución de corriente (calculada por el solucionador electromagnético propio [5]). La circulación de corriente de entrada/salida está indicada por flechas rojas

6b Distribución de temperaturas (calculada por Ansys/Fluent)

que se refiere a la convección natural. Por esa razón, se ha desarrollado una jerarquía de métodos de cálculo para las simulaciones electrotérmicas.

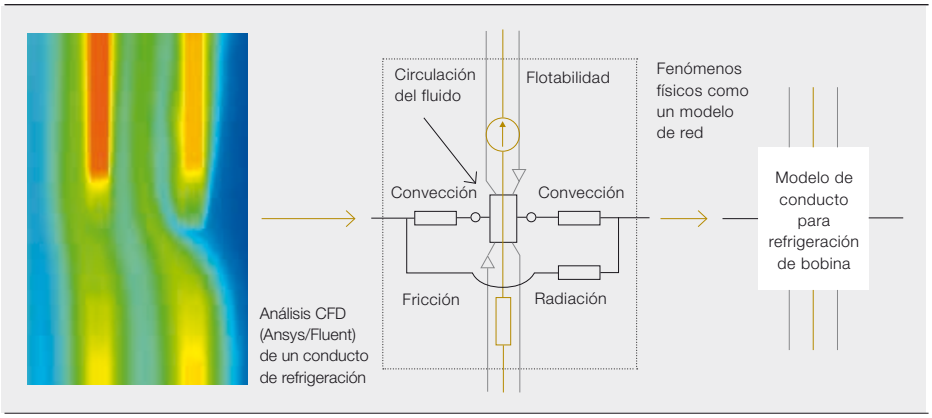
Cálculos combinados electromagnéticos y de dinámica de fluidos

Un tratamiento numéricamente riguroso del problema de la simulación electrotérmica se basa en el denominado acoplamiento débil de doble vía de un solucionador de campos electromagnéticos con otro de CFD → 5. Todos los efectos físicos anteriormente citados se pueden tener en cuenta utilizando el método bien asentado de elementos finitos para la simulación de campos electromagnéticos [5] y el método de volúmenes finitos para la simulación de dinámica de fluidos (como, por ejemplo, en la formulación comercial Ansys/Fluent). Es preciso un acoplamiento de dos vías si se debe tener en cuenta la dependencia con la temperatura de los parámetros de los materiales electromagnéticos. Si la dependencia con la temperatura es insignificante, o si se conoce con antelación la temperatura aproximada, pueden anticiparse los parámetros de los materiales y bastará con una presentación de una sola dirección de la distribución de las pérdidas eléctricas.

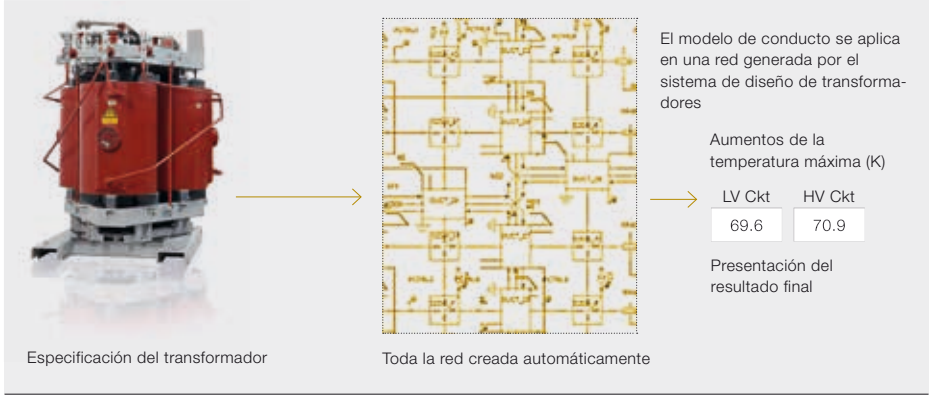
Este método computacional es favorable si los efectos inductivos desempeñan un papel importante o si existen puntos locales calientes en la distribución de temperaturas. Entonces, se deben resolver espacialmente con claridad las distribuciones de pérdidas y de temperaturas. Un ejemplo es el sistema de barras bus de altas intensidades (un componente de la aparamenta de baja tensión) → 6. La distribución de las pérdidas eléctricas se ve influida en gran manera por el efecto pelicular y el efecto de proximidad en las barras de bus → 6a.

Sin embargo, este acoplamiento electrotérmico riguroso y localmente preciso es un procedimiento complejo que consume muchas horas-hombre porque hay que reticular y calcular la geometría con dos solucionadores diferentes acoplados. Por lo tanto, es deseable dar con un método de cálculo más sencillo para los casos de diseños menos exigentes.

7 Método de redes aplicado a las simulaciones térmicas de transformadores



7a Desarrollo de modelos encapsulados de redes validados por simulaciones CFD



7b Aplicación de modelos encapsulados de redes en un sistema de diseño de transformadores para calcular el aumento de temperatura en el devanado

Redes térmicas y de presión

El método reticular ofrece una alternativa atractiva a la complejidad del análisis electrotérmico acoplado [6]. La idea básica es sustituir los componentes geométricos por modelos reticulares abstractos que incluyan formulaciones termodinámicas y electromagnéticas válidas para una parte concreta del aparato. Un ejemplo de modelo de este tipo que representa un conducto de refrigeración de una bobina de transformador se presenta en → 7. Su topología interna incluye unos pocos elementos de red que son responsables de la modelización de los fenómenos físicos en el interior del conducto: transferencia de calor desde las capas del contorno (convección), circulación del fluido, factores de fricción, presión de flotación y radiación. Los modelos elementales se validan utilizando métodos CFD avanzados y se encapsulan en componentes de red de fácil utilización. Pueden ser utilizados por proyectistas de transformadores para la creación del modelo completo de transformador para calcular los aumentos de temperatura en los devanados [7]. La precisión de dichos cálculos en redes es aceptable: algunos grados Kelvin. El error viene determinado en gran manera por las inexactitudes en los datos de entrada y las tolerancias de fabricación y medición más que por las simplificaciones del modelo de red. La ventaja fundamental del método reticular es el rendimiento. Los rápidos tiempos de cálculo, que oscilan entre unas milésimas de segundo y unos pocos segundos, permiten la integración en sistemas interactivos de diseño y el uso de algoritmos de optimización que requieren muchos cientos o miles de cálculos para diseñar un transformador.

Perspectivas futuras

Las simulaciones dieléctricas y térmicas integradas en la plataforma Simulation Toolbox de ABB se han acomodado bien en el diseño de los aparatos eléctricos. La plataforma tiende un puente entre los proyectistas del producto y los investigadores de ABB y sus colaboradores de la universidad. Ello asegura la aplicación continua de los logros más recientes de la tecnología de simulación al diseño de los productos eléctricos de ABB.

Andreas Blaszczyk
Jörg Ostrowski
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Suiza
andreas.blaszczyk@ch.abb.com
joerg.ostrowski@ch.abb.com

Boguslaw Samul
Daniel Szary
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
boguslaw.samul@pl.abb.com
daniel.szary@pl.abb.com

Referencias

[1] A. Blaszczyk, *et al.*, "Valor neto – Computación por Intranet, bajo coste y altas prestaciones", Revista ABB 1/2002, páginas 35–42.
[2] N. De Kock, *et al.*, "*Application of 3-D boundary element method in the design of EHV GIS components*," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.14, n.º 3, páginas 17–22 mayo-junio de 1998.
[3] EU FP7 Marie Curie IAPP Project CASOPT *Controlled Component- and Assembly-Level Optimization of Industrial Devices*, ABB Corporate Research, TU Graz, TU Munchen, University of Cambridge, 2009–2013.
[4] A. Pedersen, *et al.*, "*Streamer inception and propagation models for designing air-insulated power devices*," IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, Estados Unidos, octubre de 2009.
[5] R. Hiptmair, *et al.*, "*A Robust Maxwell Formulation for All Frequencies*," IEEE Trans. Magn, vol. 44, n.º 6, páginas 682–685, Jun. 2008.
[6] A. Blaszczyk, *et al.*, *"Convergence behavior of coupled pressure and thermal networks,"* SCEE Conf. Zürich 2012, (aceptado para publ. en la revista COMPEL 2014).
[7] E. Morelli, et al., "Network based cooling models for dry transformers," ARWtr Conf., Baiona, España, 2013.

Resistir la obsolescencia

El rostro cambiante de la simulación en ingeniería

BARTOSZ DOBRZELECKI, OLIVER FRITZ, PETER LOFGREN, JOERG OSTROWSKI, OLA WIDLUND – Uno de los numerosos beneficios de la simulación por ordenador es la capacidad de resolver problemas industriales complejos de una forma rápida y relativamente barata. La simulación por ordenador es un campo en evolución, y la interacción entre la investigación de métodos numéricos y los avances en la arquitectura informática garantiza el progreso. Los últimos cambios en el panorama de la tecnología de procesamiento de la información se han caracterizado por un creciente paralelismo en este sentido. Actualmente, numerosas herramientas de simulación son capaces de utilizar decenas de núcleos de cálculo para resolver problemas cada vez más enormes y complejos con una mayor precisión y en plazos de tiempo razonables. Además de los paquetes comerciales de simulación y las herramientas reservadas y personalizadas de ABB, que se desarrollan internamente, existe también un creciente número de herramientas desarrolladas por comunidades de código abierto. ¿Qué fuerzas influyen en estos cambios de simulación en las aplicaciones de ingeniería?

1 Perspectiva futura de la infraestructura de cálculo para simulaciones

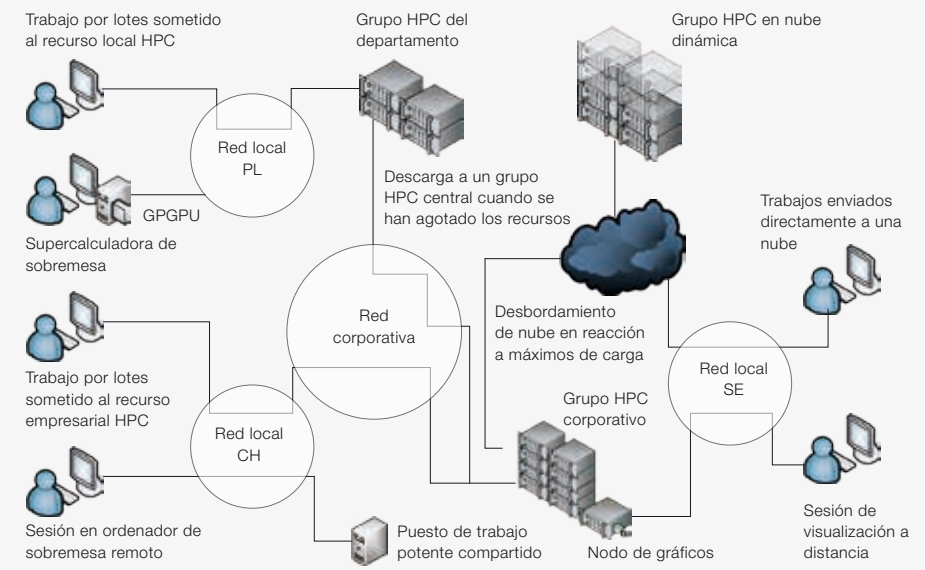


Diagrama de infraestructura que combina el estado actual con posibles direcciones futuras

La simulación es un elemento importante del desarrollo de productos en ABB. En comparación con los prototipos físicos suele ser más rápida, menos costosa, más detallada y más capaz de ofrecer maneras innovadoras de resolver problemas industriales complejos. ¿Cómo se consigue?

Clústeres, nubes y superordenadores de sobremesa

La clave de la simulación es, sencillamente, el cálculo de alto rendimiento (HPC, en sus siglas en inglés). Por esta razón, hace años que ABB invierte en sus propios clústeres de cálculo. Actualmente, la empresa cuenta internamente con una serie de recursos de HPC específicos. Si bien los grandes sistemas de HPC permiten la simulación de los productos más complejos, no son los únicos recursos de cálculo que utilizan los expertos en simulación.

La generalización de la informática de gama alta, acompañada de la revolución multinúcleo, ha aportado una escalabilidad paralela a los sistemas de sobremesa. Numerosas simulaciones se realizan localmente en estaciones de trabajo rápidas (es decir, un ordenador realiza todos los cálculos). Durante un tiempo se tuvo la impresión de que un enfoque de simulación de sobremesa, es decir la incorporación del súper cálculo en los ordenadores de sobremesa, se impondría con la aparición de los aceleradores GPU (unidad de procesamiento de gráficos, en sus siglas en inglés) dedicados al procesamiento de números, pero esta tecnología punta todavía no se ha aplicado a las simulaciones de ingeniería.

Otra fuerza emergente con el potencial de remodelar la infraestructura de simulación es el rápido desarrollo de los centros de datos de acceso público, que ofrecen una potencia de cálculo a demanda mediante un modelo de “pago por uso”. Este nuevo modelo de externalización se conoce como informática en la nube.

> La clave de la simulación es, sencillamente, el cálculo de alto rendimiento. Por esta razón, hace años que ABB invierte en sus propios clústeres de cálculo.

Las nubes de propósito general son poco aptas para cargas de trabajo de simulación, que a menudo requieren soluciones de red especializadas, que se caracterizan por un gran ancho de banda y una baja latencia. Sin embargo, algunos proveedores de nube diseñan partes de sus centros de datos teniendo en cuenta los requisitos de HPC. Los experimentos comparativos iniciales de nube realizados por ABB indican que las aplicaciones paralelas de memoria distribuida con una cantidad moderada de intercambios de mensajes ofrecen un rendimiento satisfactorio. Las proyecciones de costes simulados basadas en datos históricos de uso extraídos del sistema de HPC actual de ABB indican que el traslado de cargas de trabajo adecuadas a la nube podría reducir a la mitad el coste total de propiedad de la infraestructura de apoyo. El mayor obstáculo con respecto al uso corporativo de la informática en la nube es la seguridad de la información. Queda mucho trabajo por hacer en este campo antes de que las empresas de ingeniería y sus clientes se muestren dispuestos a almacenar y procesar los datos en una infraestructura que se encuentra fuera del control corporativo.

A corto plazo, un recurso de HPC centralizado será probablemente la solución más rentable. Este recurso se podrá

Imagen del título
A medida que evolucionan las capacidades de procesamiento de la información, también evolucionan las herramientas de simulación utilizadas en la ingeniería de nuevos productos.

Una fuerza emergente con el potencial de remodelar la infraestructura de simulación es el rápido desarrollo de los centros de datos de acceso público.

aumentar mediante clústeres departamentales más pequeños y localizados. El panorama potencial de la futura infraestructura informática para las simulaciones se presenta en → 1. En el futuro, además de las estaciones de trabajo con GPGPU (GPU de propósito general), podrá existir una configuración más dinámica que permita que los picos de actividad se gestionen transfiriendo parte de la carga entre los recursos corporativos y utilizando una nube pública (cloud bursting) cuando se agoten los recursos internos.

Una vez que se disponga de la infraestructura, será necesario desarrollar procesos adecuados para garantizar el uso eficiente de los recursos de hardware y software disponibles.

Utilización eficaz de los recursos

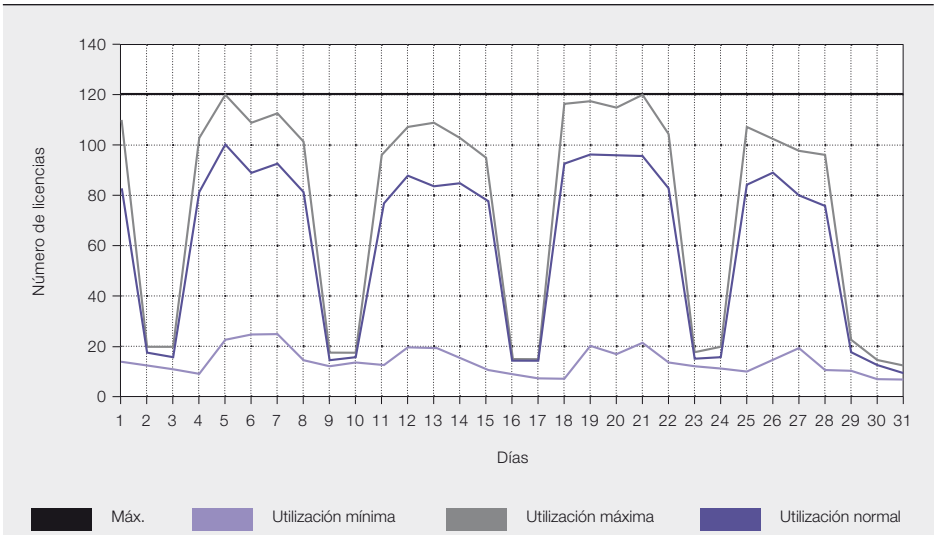
El coste de la inversión y el mantenimiento del hardware del HPC suele ser menor que el coste de adquirir una licencia de software de simulación. Con el fin de dimensionar y utilizar estos recursos limitados de una manera eficiente, se debe lograr un equilibrio entre varios factores: el número de núcleos de CPU, la topología del hardware (memoria compartida o distribuida), la interconexión de clústeres (velocidad de comunicación), el número de licencias disponibles y la configuración de los sistemas de colas (por ej., para maximizar el rendimiento de las simulaciones por lotes, pero seguir disponiendo de licencias para el uso interactivo durante el día).

La ponderación de estos factores está influenciada por el modelo de licencias utilizadas por el proveedor de software. Normalmente, para cada puesto de trabajo es necesaria una licencia cara de un solo núcleo, mientras que cada núcleo de CPU (unidad central de procesamiento) adicional requiere una licencia de HPC más barata. La mayoría de los proveedores disponen de una política de precios decrecientes con respecto a las licencias de HPC, de manera que el coste por licencia de HPC disminuye a medida que aumenta el número de licencias adquiridas. Por la estructura de precios suele ser conveniente, por lo general, ejecutar cada simulación en tantos núcleos como sea posible durante el espacio de tiempo más breve posible, de manera que las licencias caras de un solo núcleo se utilicen con una eficiencia óptima.

En los últimos ocho años, en el seno de ABB se ha desarrollado una extensa colaboración para coordinar y compartir los recursos de hardware y software. Esta iniciativa se inició de una manera bastante informal entre los grandes equipos de simulación, pero actualmente cuenta con el apoyo de la organización mundial de SI/TI. El objetivo principal es tomar conciencia de los costes, pero compartir los recursos tiene también otras ventajas. En el caso de los equipos con un uso de bajo volumen, o para nuevos usuarios, es posible compartir los recursos de otros equipos durante un tiempo limitado, lo que simplifica las pruebas y la evaluación de herramientas de simulación, y limita la inversión inicial. Especialmente en el caso de los centros de investigación corporativa, la capacidad de compartir fácilmente el hardware y las licencias con otras unidades de negocio tiene una gran importancia en la transferencia de tecnología en los proyectos; los usuarios de las unidades de negocio pueden tener un acceso temprano a las herramientas y los modelos desarrollados. La mayoría de los proveedores de software también reconoce que les reporta beneficios, ya que facilita a los nuevos usuarios un acceso fácil a sus productos y, por su parte, adquieren una mejor perspectiva de las necesidades de los clientes.

La capacidad de compartir las licencias de software en todas las unidades y las ubicaciones geográficas implica generalmente acuerdos contractuales a nivel mundial con los proveedores de software. La ventaja es que ABB se convierte en un cliente más visible. Actualmente, ABB dispone de contratos y grupos de licencias mundiales para grandes paquetes de software de simulación.

2 Herramienta de licencias de ABB



La herramienta permite una utilización óptima de licencias proporcionando datos de entrada inestimables para los procesos de adquisición de licencias.

En los últimos ocho años, en el seno de ABB se ha desarrollado una extensa colaboración para coordinar y compartir los recursos de hardware y software.

Un buen ejemplo de la puesta en común de los recursos de hardware de HPC es el nuevo clúster de Linux “leo”, alojado en uno de los centros de investigación corporativa de ABB. Este clúster se utiliza principalmente en simulaciones complejas de mecánica de fluidos y dinámica molecular. Leo lo financian conjuntamente dos centros de investigación corporativa y lo utilizan varios equipos en numerosos países. Otro clúster, “krak”, lo financia y mantiene un tercer centro de investigación corporativa, pero por razones prácticas se encuentra en la misma ubicación que el clúster leo. Krak sirve como motor de cálculo de la herramienta Simulation Toolbox de ABB, un sistema distribuido que facilita a todos los miembros de las unidades de negocio de la empresa a nivel mundial un acceso transparente a los recursos de HPC.

La puesta en común de los recursos tiene, por supuesto, sus problemas. Algunos son de carácter técnico y, por lo general, son fáciles de resolver, pero existen otras cuestiones “delicadas” más complejas que se deben abordar:

– La manera de resolver los conflictos
– La manera de acomodar los distintos patrones de uso
– La determinación de quién debe pagar por los nuevos recursos cuando existe escasez
– La manera de interpretar las estadísticas de licencias

En cuanto a la puesta en común de las licencias de software, la clave del éxito es la implementación de un proceso bien definido de gestión del grupo de licencias, es decir, la definición de políticas y normas comunes de uso de los recursos, la anticipación de posibles problemas y la propuesta de soluciones. Se podrían mantener conferencias telefónicas con los representantes de todos los equipos que contribuyan en el grupo, pero podría también existir un equipo más pequeño de personas encargado de gestionar las cuestiones cotidianas. Con el fin de garantizar la imparcialidad y una buena resolución de conflictos, cuando sea necesario, es sumamente importante recopilar y supervisar las estadísticas de uso y poner esta información a disposición de todos los usuarios. Con esta finalidad, ABB ha desarrollado una herramienta basada en la web llamada eLicense, que sirve para gestionar los grupos de licencias y supervisar el uso de las licencias → 2.

Modelos físicos y métodos numéricos

El punto de partida de cualquier herramienta de simulación es un modelo matemático que describa los fenómenos físicos del proceso. Una vez desarrollado, se puede implementar un algoritmo numérico que realice el cálculo del modelo.

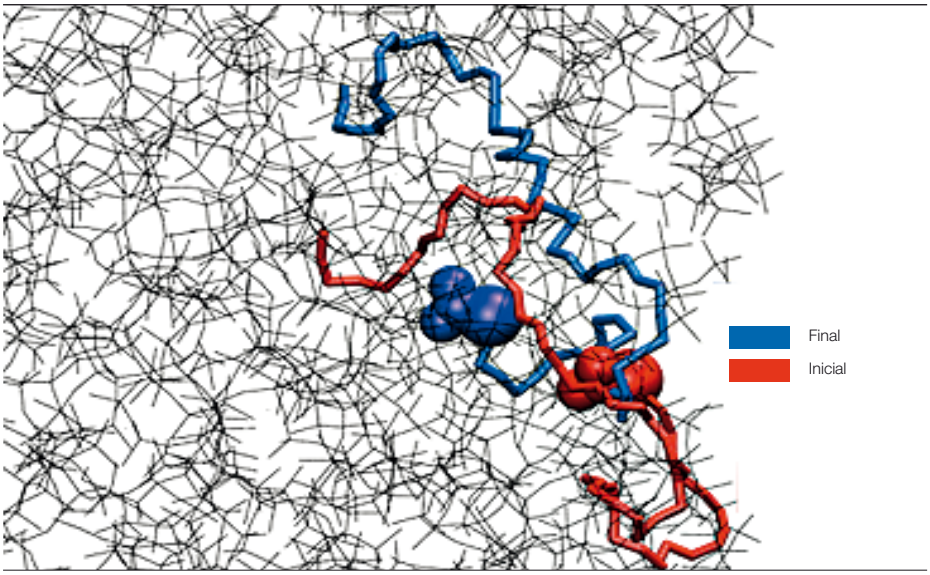
Los modelos matemáticos y los algoritmos numéricos son tan importantes como el propio ordenador. Por ejemplo, sería imposible calcular el campo electromagnético en un transformador eligiendo un modelo atomista, incluso en el más rápido de los superordenadores. Por el contrario, un modelo se crea promediando el comportamiento de los átomos y los electrones y derivando las propiedades del material en conjunto. Esta descripción en conjunto combinada con las ecuaciones fundamentales del campo electromagnético (ecuaciones de Maxwell) da lugar a un modelo que es adecuado para la simulación de los campos electromagnéticos en un transformador.

Pero no es suficiente. Después de elegir el modelo apropiado en un nivel adecuado de simplificación, se debe indicar al ordenador la manera de calcular el modelo, es decir, se debe elegir e implementar en el ordenador un algoritmo que resuelva las ecuaciones matemáticas constitutivas del modelo físico, lo que se conoce como un método numérico. El método de los elementos finitos es un ejemplo. Se debe elegir el método numérico de manera que el cálculo sea preciso, rápido y sólido. Un buen método de cálculo es una combinación bien coordinada y basada en el problema de un modelo físico, un método numérico y hardware.

Entre las tareas clásicas de simulación en ingeniería se incluyen los problemas de mecánica estructural, los problemas de dinámica de fluidos y los cálculos de campos electromagnéticos. Se pueden encontrar con frecuencia buenos métodos de cálculo para estas tareas estándar en productos de software comercial o de código abierto. En la simulación no estándar, sin embargo, se requiere el desarrollo de métodos de cálculo personalizados en los tres niveles: modelado, algoritmos y hardware.

Los ingenieros de ABB emplean las herramientas más eficaces y los modelos más potentes para ofrecer a sus clientes los mejores productos posibles.

3 Simulación de dinámica molecular



Se presenta una orientación inicial y final de una molécula cargada cerca de la superficie de un aislante PDMS. En la configuración final, el grupo cargado se encuentra enterrado más profundamente en la masa.

Las complicaciones pueden surgir a partir de propiedades de materiales no estándar o de configuraciones geométricas especiales. Entre los tipos de simulaciones no estándar se incluyen los cálculos multifísicos, en los que se deben acoplar diversos ámbitos físicos. El creciente interés en estos cálculos ha obligado a los proveedores comerciales a introducir este acoplamiento en sus productos. No obstante, en el caso de algunas combinaciones de fenómenos físicos no existen soluciones de mercado disponibles o si existen son ineficientes. Un ejemplo de fenómenos importantes en productos de ABB que no están bien respaldados por las herramientas existentes son los procesos de arco, en los que se deben acoplar la dinámica de fluidos y el electromagnetismo.

Más allá de los ámbitos clásicos manejables con métodos basados en malla, como los elementos finitos, se encuentran los elaborados métodos de cálculo para procesos moleculares o incluso atomistas. Los más conocidos son la teoría de funcionales de la densidad (TFD) y la dinámica molecular (DM). Si bien no se prevé que estos métodos de cálculo altamente avanzados sean de tanta importancia para ABB como lo son para la industria farmacéutica, existe un interés creciente en aplicar estos métodos en la resolución de cuestiones importantes en la ciencia de los materiales. En el campo del aislamiento de sistemas de transmisión de CA y CC de alta tensión, por ejemplo, mejoran la imagen microscópica del transporte eléctrico y otros procesos dinámicos. Una aplicación concreta del método de la dinámica molecular se ha desarrollado recientemente en colaboración con IBM Research. Se calculó la difusión de moléculas de peso ligero en polímeros de caucho de silicona (PDMS) para explicar un importante proceso de restauración de la hidrofobicidad superficial, que era crucial para la estabilidad a largo plazo del aislamiento de un cable exterior de AT. Como se muestra en → 3, se puede simular una orientación y polarización neta de moléculas con grupos metilo en la superficie. Este resultado ofrece una explicación de la pérdida de hidrofobicidad superficial en el caso de oxidación. Explica también la restauración de la hidrofobicidad a través de una interacción particular entre moléculas de ciclometicona, grupos metilo oxidados y iones Na^+.

La trayectoria de ABB en un panorama cambiante

Es posible que los avances de la informática en la nube y la tecnología de GPU con respecto a la tecnología de simulación numérica tarden en llegar, pero las simulaciones paralelas en ordenadores de varios núcleos y clústeres ya son esenciales.

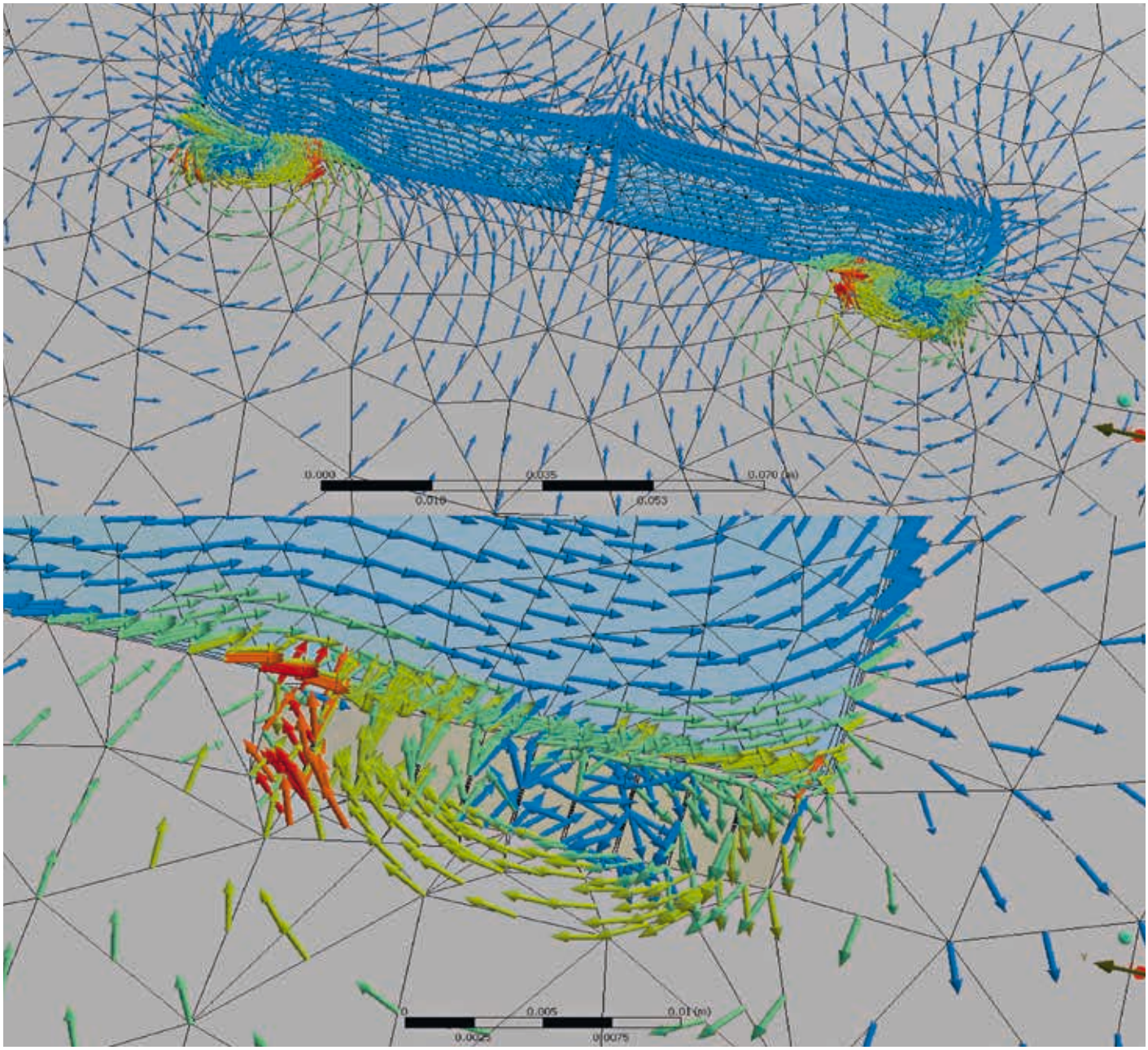
Al compartir los recursos de hardware y software, los diferentes equipos de una empresa pueden disponer de un acceso fácil y rentable a la última tecnología de simulación y a los recursos de hardware. En ABB, significa que los resultados de I+D y las mejores prácticas se pueden transferir de una manera eficiente entre los centros de investigación y las unidades de negocio.

Los informes de los estudios de mercado muestran invariablemente que las empresas industriales de mayor éxito son aquellas que utilizan herramientas modernas de simulación numérica en el desarrollo de sus productos. Los ingenieros de ABB emplean las herramientas más eficaces y los modelos más potentes para ofrecer a sus clientes los mejores productos posibles. Cuando se trata de herramientas de simulación avanzadas y personalizadas, la rueda no se reinventará si hay buenas herramientas ya disponibles, pero los científicos de ABB no dudarán en abrir nuevos caminos en áreas en las que ABB tiene liderazgo tecnológico.

Bartosz Dobrzelecki
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
bartosz.dobrzelecki@pl.abb.com

Oliver Fritz
Jörg Ostrowski
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Suiza
oliver.fritz@ch.abb.com
joerg.ostrowski@ch.abb.com

Peter Lofgren
Ola Widlund
ABB Corporate Research
Västerås, Suecia
peter.lofgren@se.abb.com
ola.widlund@se.abb.com



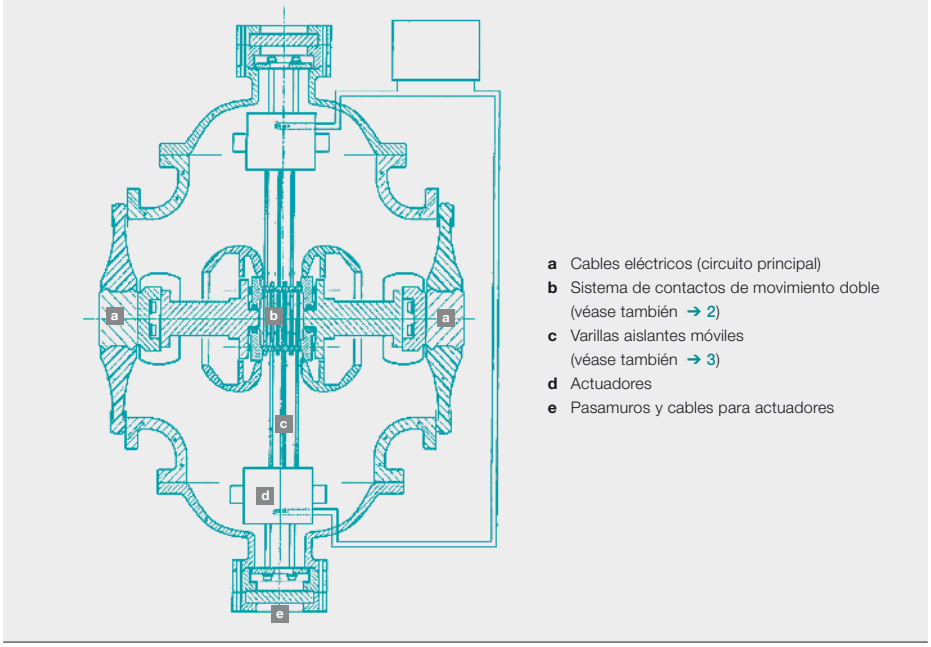
Movimiento de apertura

30 veces más rápido que un parpadeo: simulación de lo extremo en la aparamenta de HVDC

DANIEL OHLSSON, JAKUB KORBEL, PER LINDHOLM, UELI STEIGER, PER SKARBY, CHRISTIAN SIMONIDIS, SAMI KOTILAINEN – Uno de los más destacables logros innovadores de los últimos tiempos ha sido el desarrollo del interruptor híbrido de HVDC. Este interruptor salva el último obstáculo importante en el camino hacia las redes de HVDC y representa por tanto un importante paso adelante hacia una mayor integración de las fuentes de energía renovable. El propio interruptor y su importancia y tecnología ya han sido presentados en recientes números de la Revista ABB.[1] Este artículo examina más de cerca uno de sus principales componentes, el llamado seccionador ultrarrápido, así como el uso de técnicas avanzadas de simulación para el desarrollo de este componente muy crítico y exigente.

Las corrientes de fallo en HVDC pueden crecer rápidamente a causa de las pequeñas impedancias de red. Un interruptor de HVDC debe, por tanto, ser unas 10 veces más rápido que uno de CA comparable.

1 Carcasa metálica (croquis para patente)



a Cables eléctricos (circuito principal)
b Sistema de contactos de movimiento doble (véase también ➔ 2)
c Varillas aislantes móviles (véase también ➔ 3)
d Actuadores
e Pasamuros y cables para actuadores

Actualmente, la HVDC se utiliza principalmente para el transporte de electricidad a larga distancia o bajo el mar. Todos los enlaces construidos hasta ahora son conexiones punto a punto, pero la posibilidad de interconectar enlaces y, en definitiva, de formar redes de HVDC que cubran grandes zonas va a potenciar aún más la tecnología. Un obstáculo importante para tales interconexiones ha sido la ausencia de un interruptor HVDC adecuado.

Las exigencias para este interruptor son altas. Las corrientes de fallo en HVDC pueden crecer rápidamente a causa de las pequeñas impedancias de red. Un interruptor de HVDC debe, por tanto, ser unas 10 veces más rápido que uno de CA comparable. Una segunda dificultad es la ausencia del paso por una intensidad nula que aprovechan los interruptores de CA.

Para resolver esta necesidad, ABB ha desarrollado el interruptor híbrido de CC[2], que combina tecnología de semiconductores para la interrupción rápida de la CC con un interruptor mecánico rápido (UFD, seccionador ultrarrápido).

Imagen del título
Distribución de la densidad de flujo en la intersección de una bobina y un émbolo en una simulación de elementos finitos.

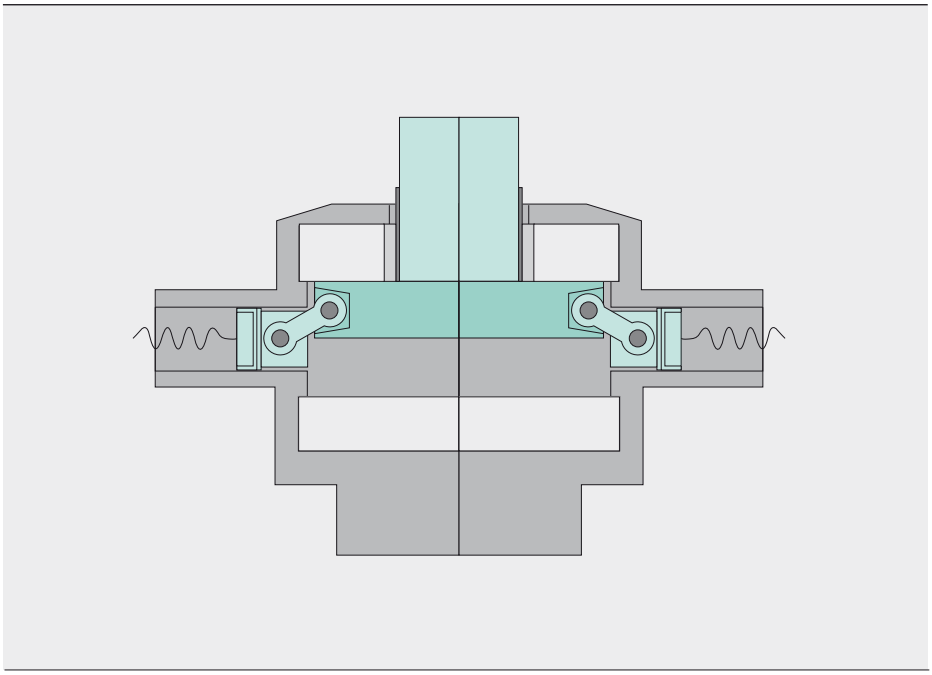
Seccionador ultrarrápido

El UFD tiene que pasar en pocas milésimas de segundo de transportar toda la carga de la corriente a proporcionar un aislamiento para alta tensión. Está diseñado como un interruptor de alta tensión contenido en una carcasa metálica ➔ 1 llena con un gas aislante comprimido. Los dos cables eléctricos ➔ 1a al interruptor están conectados a la carcasa por medio de casquillos que, a su vez, están conectados a un recorrido interno de la corriente soportado por aislantes. Los elementos de conmutación activa comprenden un sistema de contacto de doble movimiento y alta velocidad ➔ 1b y ➔ 2.

El sistema de contacto está multisegmentado e integrado en varillas aislantes móviles ➔ 1c. Estas varillas aislantes están conectadas a su vez a actuadores ➔ 1d del tipo de fuerza de repulsión (accionamientos de bobina de Thomson). Este principio de actuación permite una aceleración muy alta y casi instantánea de los

Notas a pie de página
1 Véase también “Innovación revolucionaria. El interruptor HVDC híbrido de ABB es una innovación revolucionaria que abre el camino a las redes HVDC fiables”, Revista ABB 2/2013 páginas 6–13; y “El dilema de Edison, resuelto”, Revista ABB 1/2013 página 6.
2 Véase también J. Hafner y B. Jacobson, “Proactive hybrid HVDC breaker – a key innovation for reliable HVDC grids”, CIGRE, Bologna Symposium, Sept. 2011, n.º 264, páginas 1–9.

2 Vista en sección del actuador del UFD que muestra la configuración de muelles biestables



El UFD tiene que pasar en pocas milésimas de segundo de transportar toda la carga de la corriente a proporcionar un aislamiento para alta tensión.

contactos conectados. Los actuadores trabajan en una dirección perpendicular al recorrido de la corriente y tienen sus bobinas de apertura y cierre conectadas en serie para asegurar un movimiento sincrónico. Los actuadores tiene una configuración de muelles biestable para que las posiciones de abierto y cerrado estén bien definidas. Están totalmente integrados dentro de la carcasa y conectados a una unidad de almacenamiento de energía independiente por medio de pasamuros y cables estancos al gas ➔ 1e.

Multifísica

La simulación de un interruptor automático requiere la modelización de varios dominios físicos. Algunos de ellos se pueden tratar como desacoplados, es decir, carentes de influencia mutua importante (por ejemplo, intensidad de campo eléctrico y esfuerzos mecánicos). Otros dominios interactúan fuertemente entre sí (multifísicos). Este artículo se centra principalmente en las interacciones entre mecánica, física de gases y electrodinámica.

Método de modelización

Las distintas metodologías de simulación pueden dividirse aproximadamente en dos campos principales: los modelos de elementos finitos (EF) y los modelos de parámetros agrupados. El método de EF (que capta la geometría con detalle) es el más preciso. A menudo los modelos agrupados (también llamados modelos integrales) son suficientemente buenos para describir el sistema. Requieren un tiempo de simulación considerablemente menor (segundos en vez de horas, o incluso días). Los modelos agrupados exigen más trabajo cuando se aborda el desarrollo del modelo, puesto que hay que simplificar todo y adaptarlo en consecuencia. Por otro lado, la física del método de elementos finitos (FEM) requiere la formulación de los elementos, y el esfuerzo principal reside en la construcción y el mallado del modelo. La elección del método adecuado suele ser un compromiso entre el tiempo de simulación, la precisión y el tiempo de modelización.

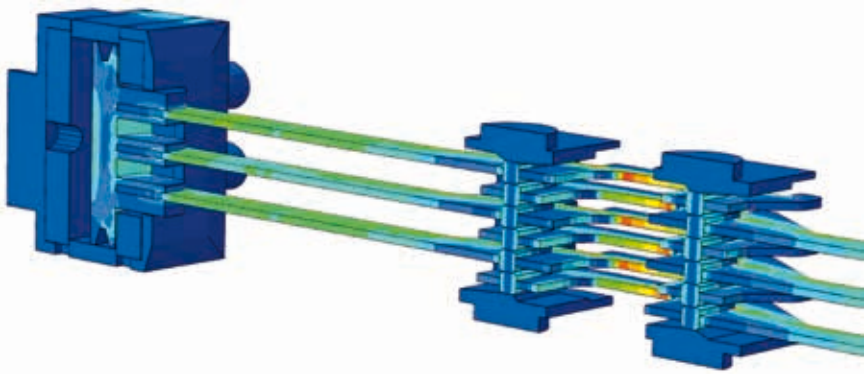
Mecánica

El modelo de simulación mecánica del seccionador ultrarrápido se compone de unas 50 piezas. Sobre la base de su geometría CAD, se creó un mallado óptimo y eficiente de cada pieza. El tamaño del modelo llegó hasta unos 150.000 elementos con 200.000 nodos. La malla se ha refinado en las superficies de contacto. Debido al funcionamiento a gran velocidad y a las complejas interacciones de contacto entre las piezas componentes, se ha elegido un método de integración de tiempos explícito. Esto ha resultado en unos tiempos totales de simulación del orden de varias horas.

Como primer paso de la simulación, se fijaron los muelles pretensados y los pernos en un estado inicial. En una segunda etapa, se aplicó la carga de la bobina de

Sobre la base de su geometría CAD, se creó un mallado óptimo y eficiente de cada pieza. El tamaño del modelo llegó hasta unos 150.000 elementos con 200.000 nodos.

3 Estado de esfuerzo durante la fase de aceleración del mecanismo



Thomson como una fuerza inducida en el área del inducido que se enfrenta a la bobina. En el lado opuesto del inducido que mira hacia la dirección de movimiento se aplicó una fuerza amortiguadora dependiente de la velocidad y la posición del inducido.

Las simulaciones permiten estudiar, evaluar y visualizar magnitudes como tensiones y presiones de contacto, así como desplazamientos, velocidades y aceleraciones ➔ 3.

Amortiguador de gas

Una vez que se ha acelerado el sistema de contactos hasta alcanzar una gran velocidad, debe decelerarse en una distancia muy pequeña.

Una buena forma de disipar la energía cinética es utilizar un amortiguador de gas. Tiene una elevada densidad de potencia, ausencia de partes móviles y poca necesidad de espacio. Puesto que el accionamiento del UFD está contenido en SF_6 a presión, se puede utilizar este gas. La fuerza de amortiguación se consigue creando una diferencia de presiones sobre el émbolo por medio de una fuga controlada de gas. La dificultad está en detener el movimiento sin impactos ni rebotes ➔ 4.

El dimensionado correcto del amortiguador de gas requiere un proceso iterativo. Puesto que los requisitos pueden variar a lo largo del desarrollo del producto, hay que rehacer el trabajo varias veces. Por lo tanto, se ha elegido el método de parámetros agrupados para modelizar el amortiguador de gas.

Un gran reto del diseño fue conseguir una buena amortiguación tanto en la apertura como en el cierre sin perder energía durante la aceleración.

Al dimensionar el amortiguador, se emplearon métodos de optimización multiobjetivo para identificar compromisos entre diseños que fueran óptimos de Pareto. Así se pudo elegir el compromiso más favorable de acuerdo con los requisitos.

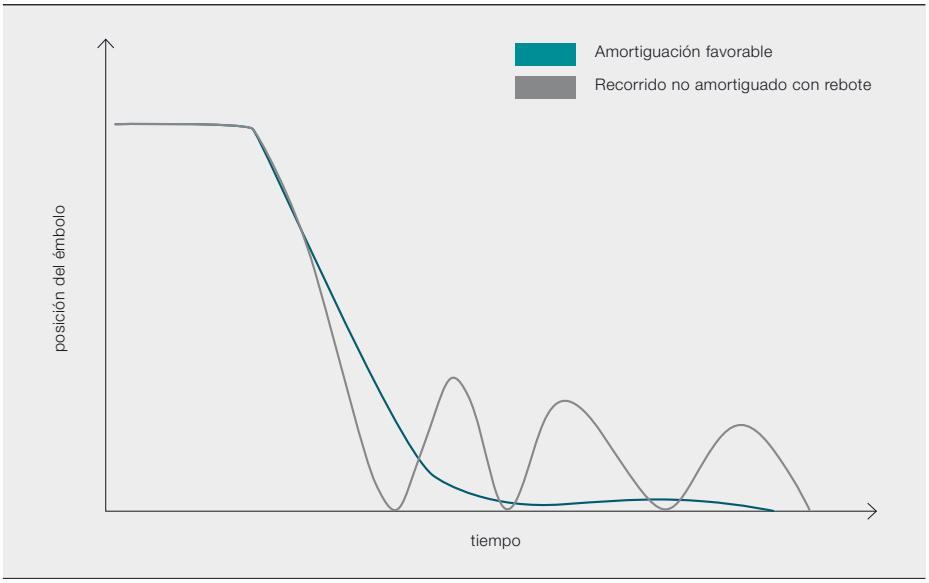
Accionamiento de Thomson

El efecto Thomson utiliza la inductancia mutua entre dos conductores eléctricos. Esto crea un fuerte campo magnético variable con el tiempo que produce una fuerza de repulsión (Lorentz) entre los conductores cuando se aplica un cortocirtcuito breve pero intenso ➔ 5.

La función principal de un actuador de bobina de Thomson es descargar un condensador en una bobina eléctrica que induce corrientes de Foucault en una placa de aluminio. Esto genera una fuerza de repulsión de Lorentz entre la bobina y la placa, que acelera el mecanismo conectado a la placa.

Para simular el problema físico acoplado electro-magnético-térmico-mecánico se han adoptado dos métodos con diferentes enfoques. Se aplicó un análisis tridimensional de elementos finitos con modelos electromagnéticos incorporados a software comercial para captar efectos

4 Propiedades de amortiguación deseables y no deseables



Un gran reto del diseño fue conseguir un buena amortiguación tanto en la apertura como en el cierre sin perder energía durante la aceleración.

detallados de campos eléctrico y magnético transitorios (incluyendo procesos térmicos) pero solamente un modelo agrupado simplificado de la placa móvil. La solución visualiza el proceso de difusión del campo magnético, las corrientes de Foucault variables con el tiempo y las pérdidas correspondientes.

Además del análisis de elementos finitos, costoso desde el punto de vista del cálculo, se ha creado un modelo agrupado simplificado del sistema electro-termodinámico para permitir una cosimulación con modelos mecánicos estructurales más complejos. De esa forma, se reducen las ecuaciones magnéticas complejas a ecuaciones diferenciales ordinarias que se acoplan por medio de la inductancia mutua. Esta es una simplificación del problema de ecuaciones diferenciales parciales a electromagnetismo estático.

La simulación de un interruptor automático requiere la modelización de varios dominios físicos.

Cosimulación

Los modelos descritos anteriormente se acoplaron en cosimulación para resolver simultáneamente el problema completo y captar las influencias mutuas. Una rutina de acoplamiento intercambia variables de estado entre los paquetes de software ➔ 6. Puesto que el análisis completo sólo requiere 10 ms, se eligió un paso de acoplamiento de 0,01 ms para conseguir estabilidad numérica y poca pérdida de información.

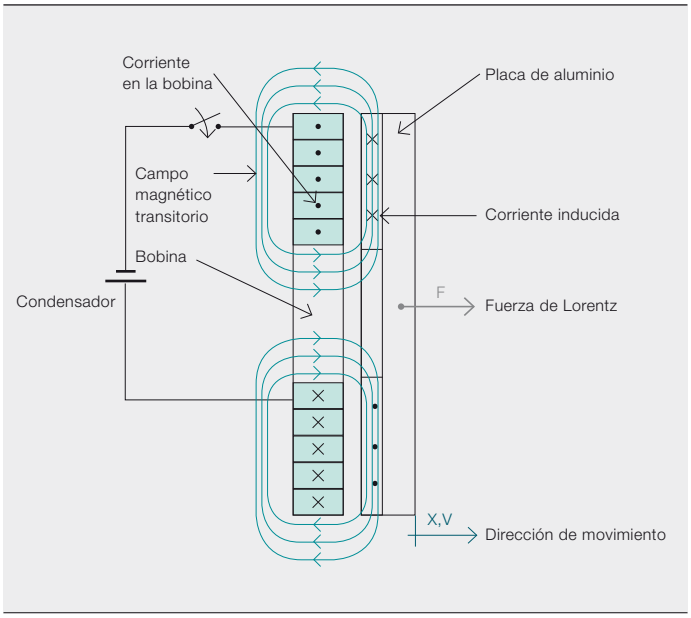
Actuación

Dentro del acoplamiento electromecánico, las variables que se interrelacionan son la fuerza de actuación electromagnética y la posición del émbolo. El modelo electromagnético agrupado calcula la fuerza que actúa sobre el émbolo y la pasa al modelo de EF en cada paso de comunicación. El modelo de EF calcula la aceleración del émbolo y la distancia entre el émbolo y la bobina. De forma similar, se devuelve en cada paso de comunicación el estado de la posición al modelo agrupado, lo que permite una predicción precisa del movimiento.

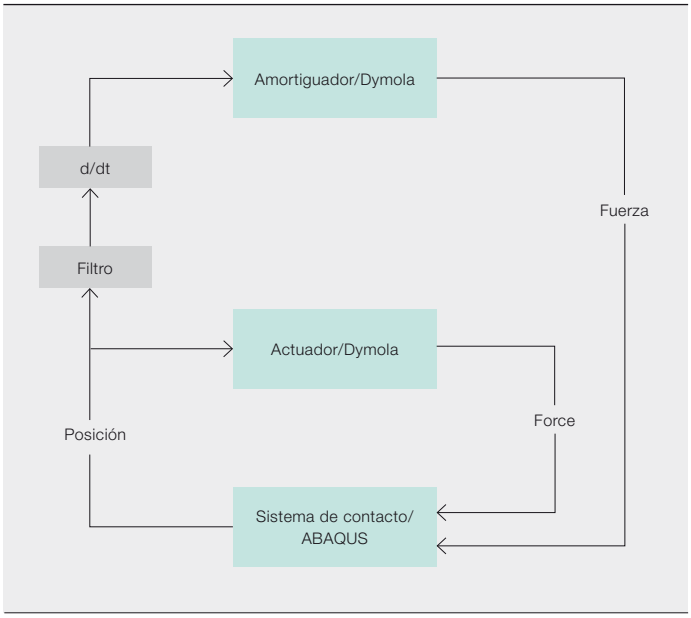
Amortiguación

Dentro del acoplamiento fluidomecánico, las variables en interrelación son la fuerza de amortiguación y la posición del amortiguador. El modelo de EF proporciona la posición del amortiguador en cada paso de comunicación. El modelo fluidodinámico agrupado calcula de forma transitoria las relaciones entre presión y volumen, y devuelve al modelo de EF la carga de amortiguación en la pieza correspondiente.

5 Esquema de una configuración de bobina de Thomson y campos electromagnéticos



6 Diagrama de flujo de co-simulación



El efecto Thomson utiliza la inductancia mutua entre dos conductores eléctricos y crea entre ambos una potente fuerza de repulsión (Lorentz) variable con el tiempo.

Mediciones

El vibrómetro láser-Doppler (LV) es un transductor óptico de precisión que se utiliza para determinar la velocidad y el desplazamiento de la vibración en un punto fijo. Las mediciones del LV se aplican en las pruebas al interruptor mecánico de CC. Se han realizado experimentos en un recipiente lleno de SF_6 donde se envía el láser a través de una mirilla, y de esta forma se pueden obtener la posición y la velocidad con mucha precisión, identificando incluso movimientos estructurales de piezas individuales de la cadena cinemática.

En ➔ 7 se muestra un ejemplo de registro experimental de la posición y la velocidad empleando un LV. Aunque no se haya aplicado ningún filtro, las curvas son suaves. La curva de velocidad ➔ 7b permite la identificación de oscilaciones en el margen de las altas frecuencias que visualizan vibraciones estructurales ➔ 8. El cambio de velocidad que se muestra en ➔ 7b pone de manifiesto las enormes fuerzas de aceleración que actúan sobre el sistema.

Resultados/validación

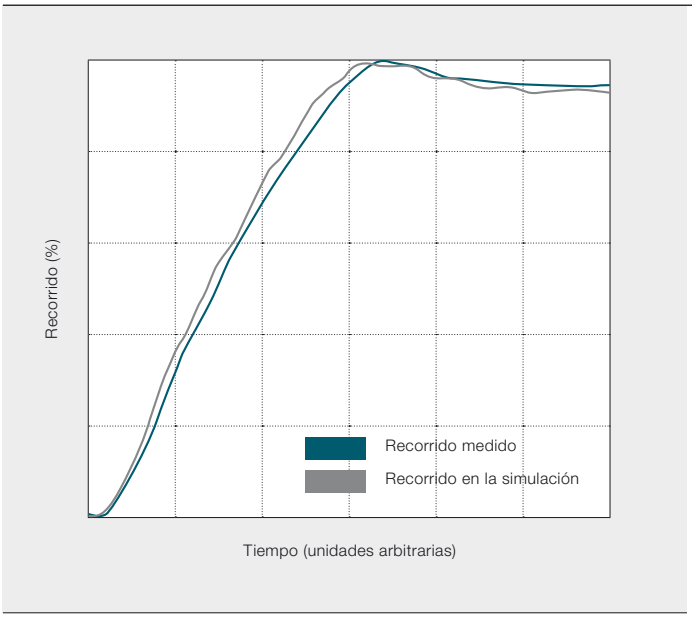
La mayor parte del trabajo realizado en las simulaciones se centró en reducir el impacto de los contactos: la herramienta de simulación fue de gran ayuda para visualizar el comportamiento de impacto.

La parte más crítica de todo el sistema desde un punto de vista mecánico es la conexión entre las placas aislantes y el émbolo (pieza accionada). Puesto que todas las cargas (de actuación y de amortiguación) estaban incluidas en la cosimulación, se identificaron las localizaciones de los posibles fallos y se mejoró el diseño para evitar esos problemas.

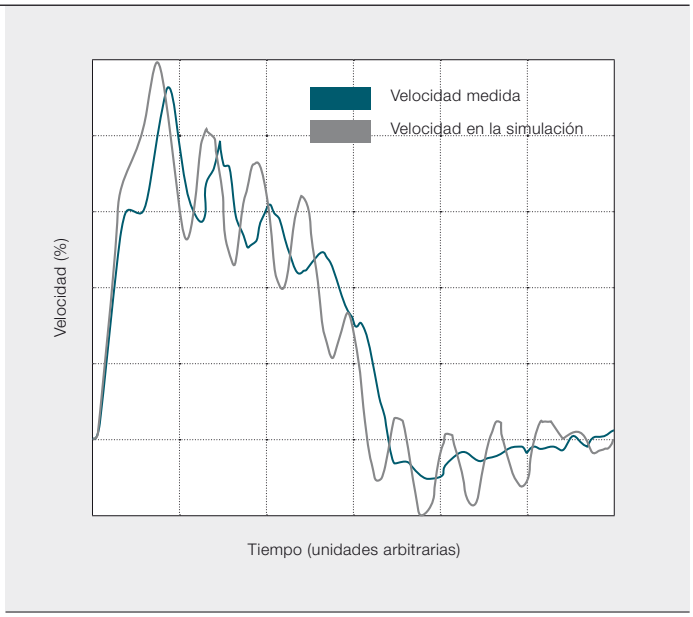
Una simulación lograda

Las herramientas avanzadas de simulación que combinan dominios de varias disciplinas de ingeniería se han hecho indispensables en el rápido desarrollo actual de productos. La ubicuidad de potentes herramientas de cálculo ha permitido simulaciones con un nivel mucho más alto de fidelidad de lo que era posible anteriormente. No solo pueden estas

7 Comparación de la curva de recorrido calculada con los resultados de la prueba:

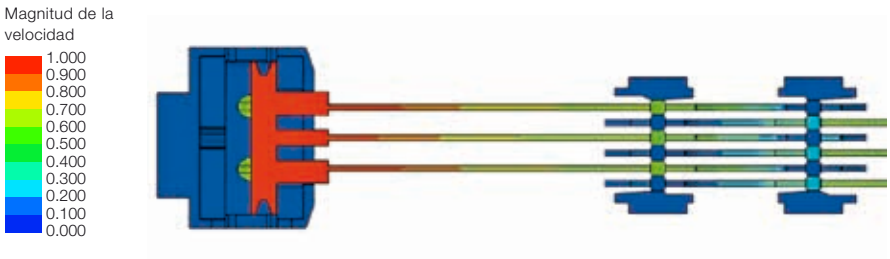


7a Recorrido



7b Velocidad

8 Magnitud de la velocidad – demostración de la propagación de ondas en el sistema



Se reducen las ecuaciones magnéticas complejas a ecuaciones diferenciales ordinarias que se acoplan por medio de la inductancia mutua.

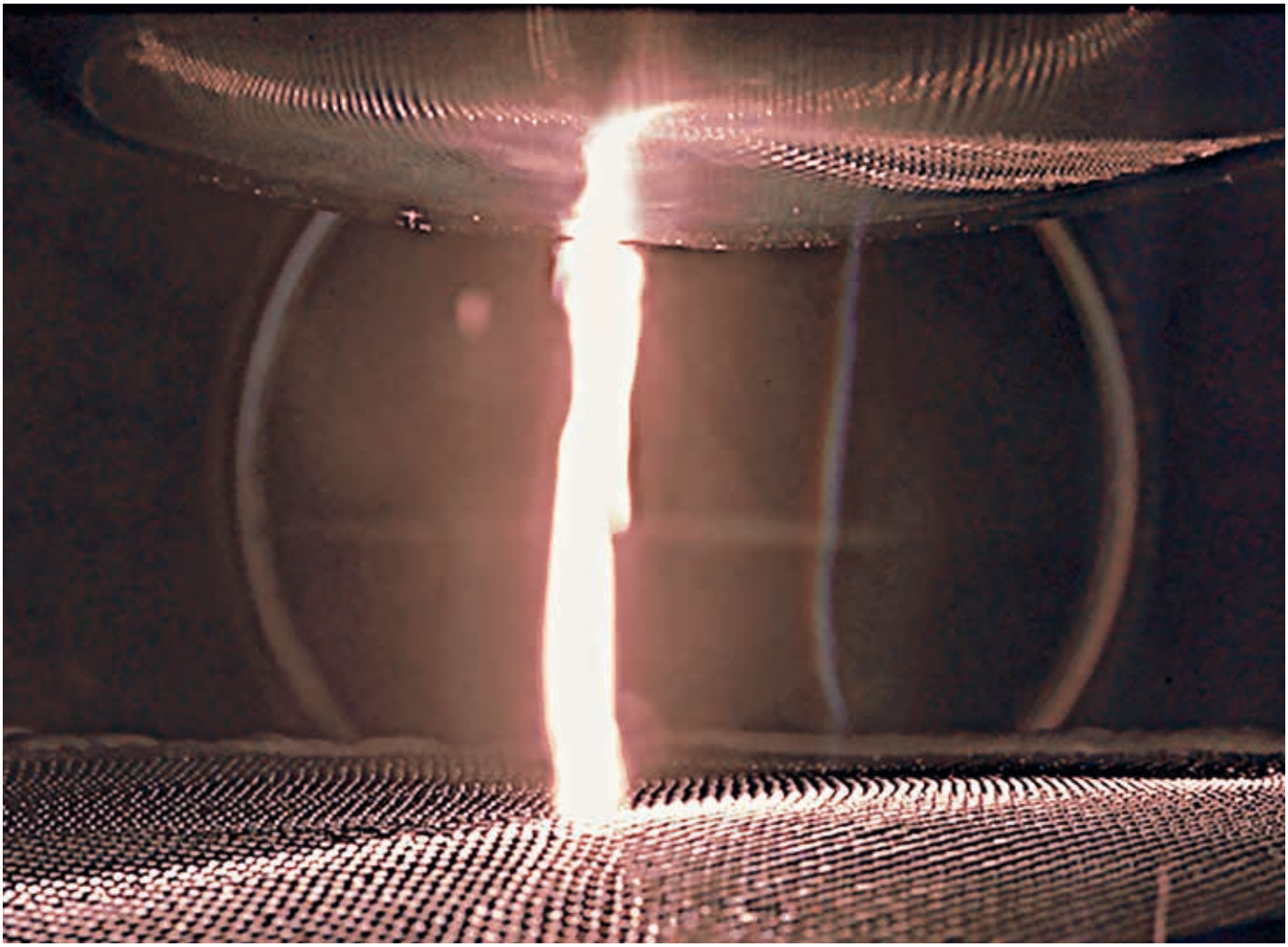
herramientas complementar el trabajo experimental basado en prototipos físicos, sino que permiten asimismo la exploración de espacios de diseño mucho más amplios. Una vez que se ha definido la fidelidad precisa del modelo y se ha conseguido una correlación suficientemente buena entre las mediciones experimentales y los resultados obtenidos en la simulación, un tercer paso puede incluir la optimización numérica de los modelos de simulación en la que las variables de diseño pueden dirigirse simultáneamente hacia múltiples objetivos. Como los productos de la industria eléctrica y de automatización son cada vez más multidisciplinarios y combinan aspectos eléctricos, mecánicos y de cálculo, las herramientas avanzadas de simulación desempeñarán con seguridad un papel aún mayor en su desarrollo.

Daniel Ohlsson
Jakub Korbel
Ueli Steiger
Sami Kotilainen
ABB High Voltage Products
Baden, Suiza
daniel.ohlsson@ch.abb.com
jakub.korbel@ch.abb.com
ueli.steiger@ch.abb.com
sami.kotilainen@ch.abb.com

Per Lindholm
ABB Corporate Research
Västerås, Suecia
per.o.lindholm@se.abb.com

Per Skarby
ABB High Voltage Products
Zurich, Suiza
per.skarby@ch.abb.com

Christian Simonidis
ABB Corporate Research
Ladenburg, Alemania
christian.simonidis@de.abb.com

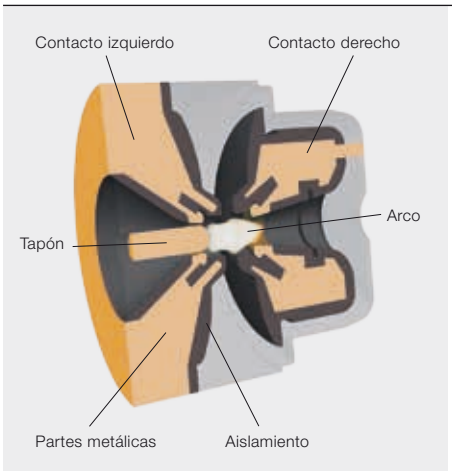


Análisis de conmutación

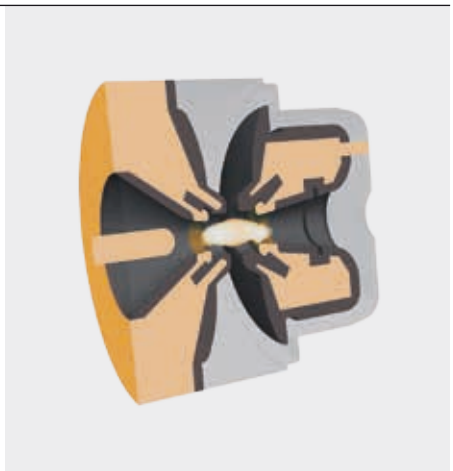
Simulación de arcos eléctricos en interruptores

JÖRG OSTROWSKI, MAHESH DHOTRE, BERNARDO GALLETTI, RUDOLF GATI, LUCA GHEZZI, MICHAEL SCHWINNE, XIANGYANG YE – La sociedad dispone de electricidad gracias a una red de equipos de generación, transporte y distribución eléctrica que llega prácticamente a todos los rincones del planeta. Algunos de los componentes más críticos de esta infraestructura son los dispositivos que conmutan y cortan las enormes corrientes y tensiones que se necesitan para desplazar la descomunal cantidad de electricidad que consume la sociedad. En el corazón de estos dispositivos se encuentra la cámara donde el circuito eléctrico se interrumpe o se completa y donde los arcos eléctricos ponen a prueba el temple del diseñador con algunas de las condiciones eléctricas más extremas que se encuentran en un equipo estándar. De hecho, una de las tareas de simulación más difíciles de ABB actualmente es predecir el comportamiento del plasma de estos arcos. Recientemente, se han realizado enormes progresos en este campo y, en la actualidad, es posible predecir muchos aspectos del comportamiento del arco y su impacto en los interruptores.

1 Arco tridimensional en un interruptor automático de generador HEC 9



1a El tapón se mueve hacia la izquierda y desconecta los contactos eléctricos izquierdo y derecho.



1b El tapón se ha desplazado, el interruptor está en la posición de completamente abierto y salta el arco entre los contactos.

El ejemplo más conocido de un arco eléctrico es el rayo que ilumina el cielo durante una tormenta. Los arcos creados entre los contactos de un interruptor que se abre o se cierra son de una escala mucho menor, pero los principios físicos son los mismos: se forma un canal de gas ionizado conductor y de alta temperatura a través del cual fluye una corriente eléctrica: el arco. El interruptor tiene la tarea de extinguir este arco.

Las condiciones del arco y su entorno son extremas. La temperatura del arco supera fácilmente los 20.000 °C. En algunos casos, la presión en la cámara de interrupción del interruptor alcanza los 70 bar. En estas circunstancias, las mediciones solo se pueden realizar con un alcance muy limitado, por lo que el diseño del producto presenta una gran dificultad y complicación. Por lo tanto, las simulaciones del arco y sus efectos físicos en la cámara de interrupción tienen una importancia fundamental en el desarrollo de los interruptores.

Imagen del título
Las condiciones físicas extremas que presenta el arco en los interruptores suponen un reto para los diseñadores. Recientemente se han producido importantes avances en la comprensión y la simulación de arcos eléctricos en los interruptores. En la imagen se muestra un arco captado por una cámara de vídeo de alta velocidad.

En este tipo de simulación se debe considerar una serie de procesos físicos en diferentes escalas. El arco caliente pierde energía por la radiación electromagnética que se transmite parcialmente a través del gas circundante a la caja de la cámara de interrupción. Allí calienta y evapora el material de la pared y provoca su expulsión a la cámara. Los iones generados en el arco también calientan las superficies y causan la vaporización de los contactos metálicos. A continuación, este vapor metálico se mezcla con los componentes del gas en la cámara.

La simulación de un proceso multifísico y a varias escalas tan complejo no es trivial, y se han dedicado años a la investigación física y numérica con el fin de desarrollar métodos de cálculo adecuados. El rápido avance en el hardware informático ha impulsado el progreso: actualmente, los cálculos se suelen realizar en estaciones de trabajo multinúcleo o en clústeres de cálculo de alto rendimiento. El resultado ha sido la simulación con éxito de arcos en varios tipos de interruptores.

Interruptores de generadores

El mayor interruptor aislado en SF_6 del mundo es el interruptor de generador HEC 9 de ABB. Es capaz de interrumpir una tensión de cortocircuito nominal de 250 kA, por lo que es adecuado para centrales eléctricas de hasta 1,8 GW. Cuando está en funcionamiento, el arco libera una enorme cantidad de energía a la cámara de interrupción en un tiempo muy breve, lo que genera enormes presiones que están determinadas por la corriente del arco, pero también por su tensión que, a su vez, depende de su forma y temperatura. Como la presión que se genera puede ser destructiva, es necesario simular de forma precisa las condiciones del flujo y las fuerzas electromagnéticas que influyen en la forma del arco. También tiene gran importancia la simulación de la radiación emitida, ya que se trata del principal mecanismo de refrigeración del arco.

En la cámara de interrupción de un HEC 9, un conector conecta los contactos eléctricos cuando el interruptor se encuentra en la posición de cerrado ➔ 1. El arco se enciende entre el conector y el contacto derecho en el momento en que el conector se desplaza y se separa de este contacto ➔ 1a. A continuación, el arco conmuta del conector al contacto izquierdo cuando el conector se desconecta del contacto izquierdo. El interruptor se encuentra en la posición completamente abierta después de que el conector está completamente desconectado. A continuación, el arco arde entre los dos contactos ➔ 1b. Se debe tener en cuenta que el arco no es axialmente simétrico, sino que fluctúa y forma bucles, especialmente en torno a la corriente cero. Por lo tanto, la tensión del arco y la presión en la cámara de interrupción fluctúan también.

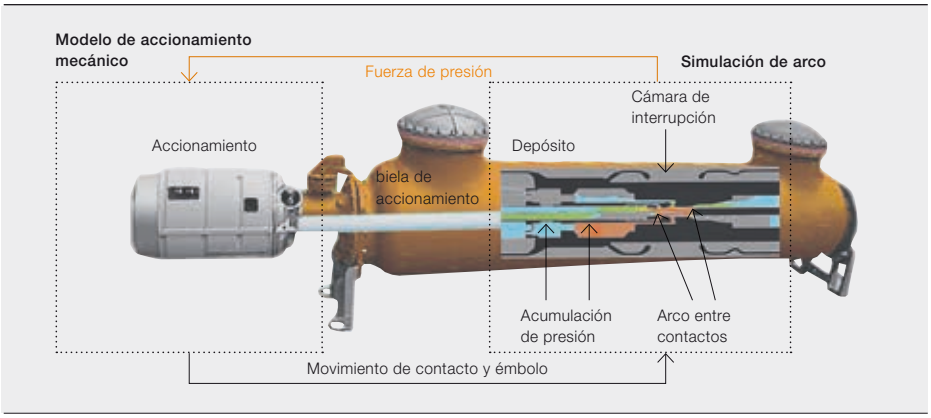
Las simulaciones de esta situación facilitan presiones que están dentro del 10 por ciento de los valores medidos.

Cosimulación mecánica de los interruptores de AT aislados en gas

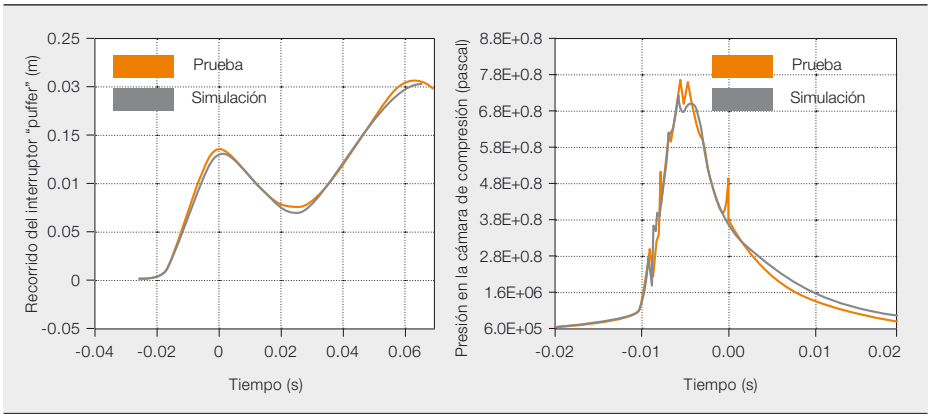
Los interruptores de alta tensión se utilizan para proteger y controlar las redes de transporte de AT. Los niveles de energía y

Las simulaciones del arco y sus efectos físicos en la cámara de interrupción tienen una importancia fundamental en el desarrollo de los interruptores.

2 Simulación de interruptor automático de alta tensión en gas



2a Simulación de arco combinada con simulación de accionamiento mecánico



2b Comparación de resultados de prueba y simulación en la formación de presión en la cámara de compresión y en el recorrido del émbolo del "puffer"

las intensidades de cortocircuito no son tan extremos como los que se observan en los interruptores de generador, pero el campo eléctrico alcanza rápidamente valores muy elevados después de la interrupción. Durante la recuperación dieléctrica, el gas caliente entre los contactos del arco se debe eliminar rápidamente mediante un fuerte caudal de gas para evitar que el campo eléctrico cause problemas.

ABB ofrece tecnología de interruptores de alta tensión de hasta 1.100 kV, con intensidades de cortocircuito de hasta 90 kA. En la predicción de una ruptura dieléctrica debida a los altos campos eléctricos descritos, es necesario simular la temperatura y la densidad del gas, así como el campo eléctrico, poco después de la interrupción de la corriente. Para ello, es importante ser capaz de predecir la posición precisa de los electrodos, teniendo en cuenta que la interacción de la presión generada por el arco y la unidad, que está mecánicamente acoplada a la cámara de presión, determina el movimiento de los electrodos.

Para las interrupciones de corriente de este tipo, ABB ha inventado el principio de autoexplosión → 2. La idea es utilizar la energía térmica del propio arco para generar un gas a alta presión, pero relativamente frío, capaz de apagarlo.

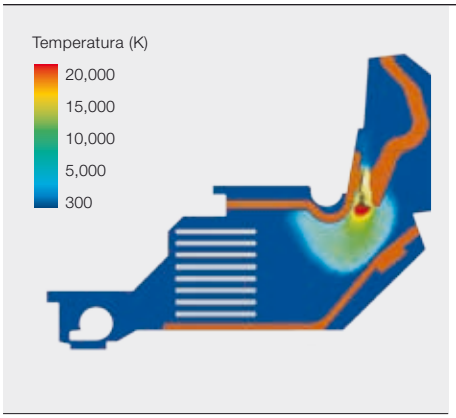
Durante la operación de conmutación, el gas caliente y presurizado se mezcla con el gas frío en la cámara de presión y esta mezcla fluye de vuelta a la zona de formación del arco para asegurar la interrupción de la corriente eléctrica y la recuperación dieléctrica entre los contactos del arco. Todo el proceso dura entre 10 y 40 milisegundos. Mediante la simulación totalmente acoplada de la física del arco y la unidad mecánica es posible predecir la acumulación de presión, la tensión del arco, la mezcla de gases en el volumen fijo y el patrón del caudal en todo el dispositivo de una manera precisa, información que es crucial en el diseño y el desarrollo de los interruptores.

Además, debido a que las presiones generadas en la cámara pueden físicamente ralentizar o invertir el movimiento del contacto, éste se aumenta mediante accionamientos hidráulicos o de resorte. La cosimulación mecánica descrita permite que una unidad se diseñe de una manera no demasiado específica pero siga cumpliendo con todos los requisitos de los clientes y de las pruebas de tipo en relación con la velocidad de separación.

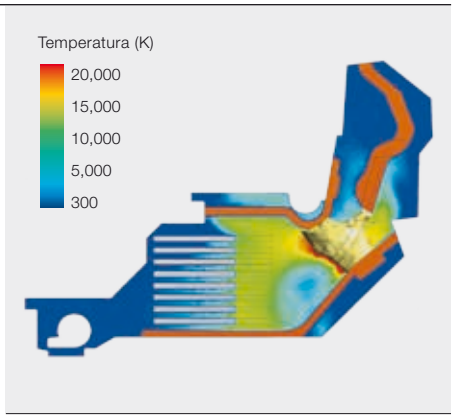
Arcos móviles en interruptores de baja tensión

Sorprendentemente, los interruptores de baja tensión son, en cierto modo, los más difíciles de simular, ya que se deben tener en cuenta otros fenómenos como el movimiento del arco a lo largo de los electrodos de carril, la interacción de los materiales ferromagnéticos con los campos magnéticos generados por el arco y la interacción entre el arco y el circuito externo. El último fenómeno es especialmente importante, ya que los interruptores de baja tensión son intrínsecamente limitadores de corriente. Acumulan una tensión que es comparable a la tensión del sistema, manteniendo la corriente eléctrica por debajo de los valores críticos y permiten la interrupción mucho antes del cruce por el cero natural de la corriente.

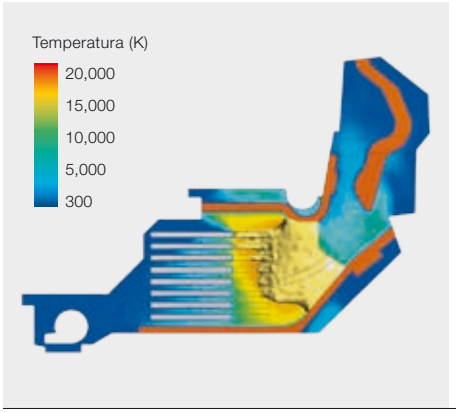
3 Simulación de transitorios de una prueba de cortocircuito de baja tensión. Temperatura del gas: azul a rojo. El arco es una isosuperficie blanco-amarilla para la densidad de corriente.



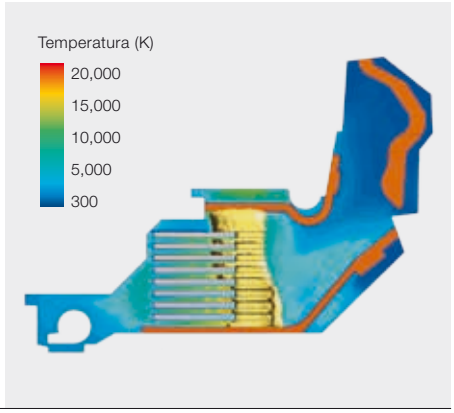
3a



3b



3c



3d

Es necesario para simular de forma precisa las condiciones de flujo y las fuerzas electromagnéticas que influyen en la forma del arco.

La limitación de corriente se consigue aumentando la tensión del arco. Se realiza eliminando materiales poliméricos de la carcasa y dividiendo el arco en segmentos. Con la eliminación del material de la pared, se añade gas frío al plasma y se reduce su temperatura. La refrigeración se mejora dividiendo el arco en segmentos y dejando que una mayor superficie metálica absorba la energía emitida por el arco. La división solo se puede lograr si el arco se puede transferir desde su punto de ignición a la cámara de arco, lo que se consigue utilizando el campo magnético generado por el propio arco para alejarlo de los contactos nominales. La fuerza motriz se incrementa con material ferromagnético (generalmente, placas de acero) que concentra y aumenta el campo magnético.

La simulación de un arco en un interruptor de baja tensión significa seguir una evolución rápida a partir de la ignición en la separación del contacto eléctrico → 3a, a través de la conmutación desde los contactos nominales a los corredores de arco → 3b, a lo largo de una fuerza electromagnética y un gradiente de presión en aumento → 3c, hasta la extinción en un rack de placas metálicas donde el plasma del arco se divide en fragmentos y se enfría → 3d. Por lo tanto, la interrupción de la corriente en un interruptor de baja tensión depende de la interacción compleja de muchos fenómenos físicos que tienen lugar en el espacio de una milésimas de segundo. La simulación aquí ilustrada procede del reciente desarrollo del interruptor electrónico de corriente residual con protección de sobrecarga ABB DSN200.

Perspectivas

Las simulaciones de arcos eléctricos se utilizan con frecuencia para respaldar el diseño de productos de interruptores y, en muchos casos, sustituir experimentos en los que es preciso invertir mucho dinero y tiempo, o que son imposibles de realizar. No obstante, los experimentos no se pueden sustituir completamente. Para lograr este objetivo se necesitan modelos físicos más elaborados, métodos de cálculo más rápidos y una mayor comprensión de los materiales.

Aparte de respaldar el diseño de productos, las simulaciones de arco incrementan considerablemente el conocimiento físico del proceso. En el futuro, este mayor conocimiento servirá para generar nuevos conceptos en la interrupción de la corriente.

Jörg Ostrowski
Michael Schwinne
Bernardo Galletti
Rudolf Gati
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Suiza
joerg.ostrowski@ch.abb.com
michael.schwinne@ch.abb.com
bernardo.galletti@ch.abb.com
rudolf.gati@ch.abb.com

Xiangyang Ye
Mahesh Dhotre
ABB Power Products, High Voltage Products
Baden, Suiza
xiangyang.ye@ch.abb.com
mahesh.dhotre@ch.abb.com

Luca Ghezzi
ABB LPED
Milán, Italia
luca.ghezzi@it.abb.com

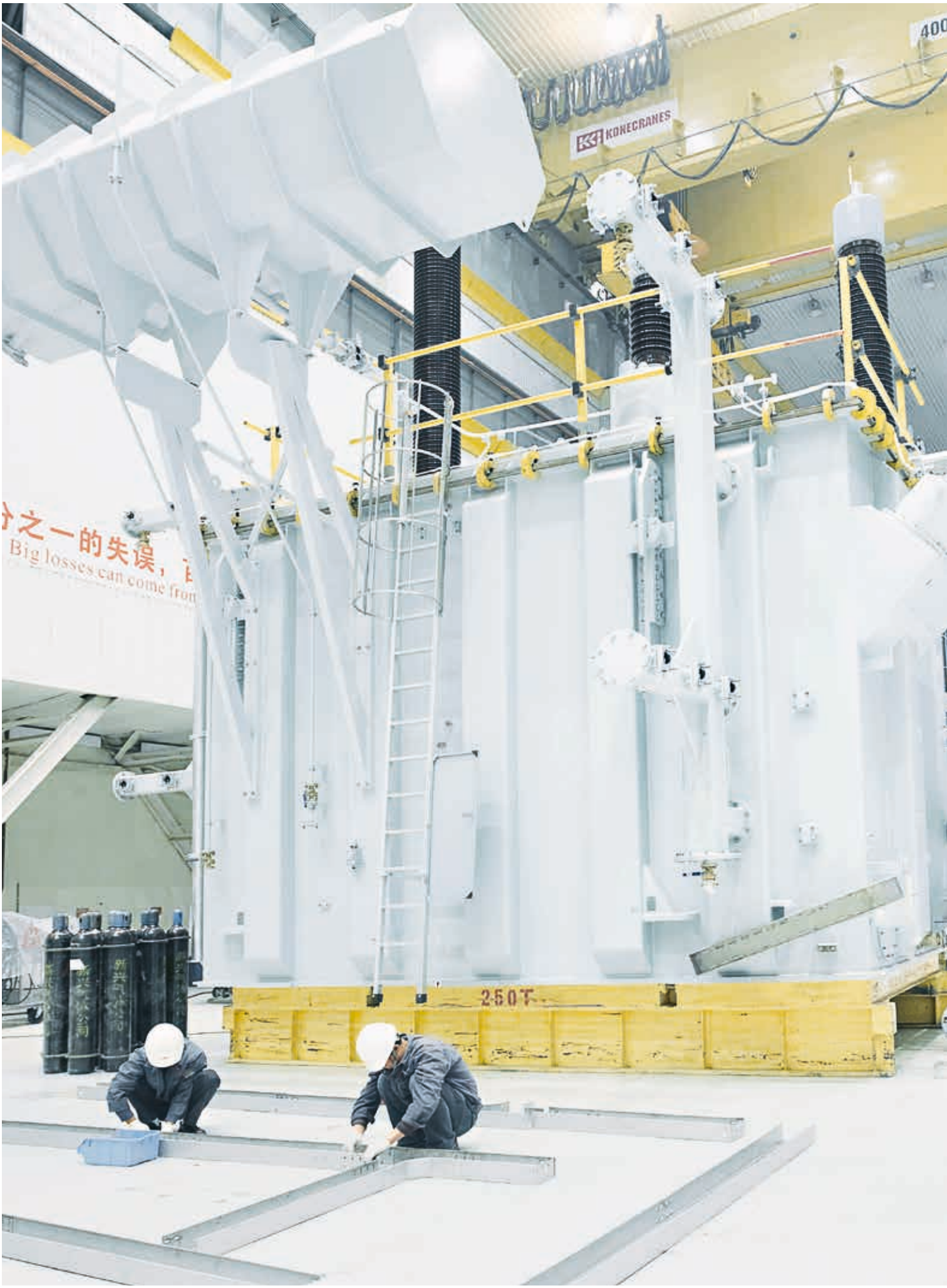

KONECRANES
250T

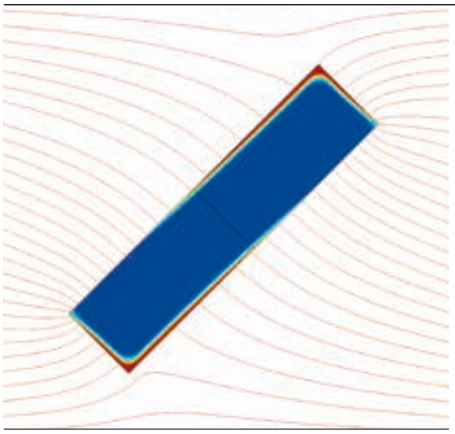
Imagen perfecta

Simulación electromagnética de transformadores

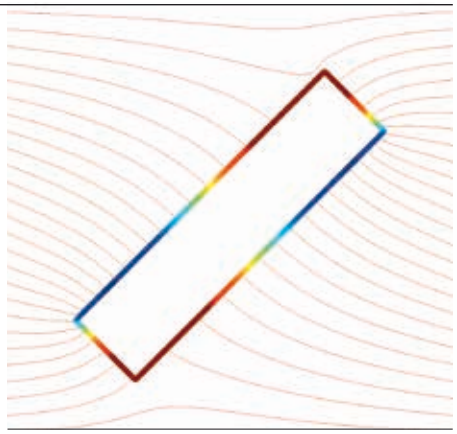
DANIEL SZARY, JANUSZ DUC, BERTRAND POULIN, DIETRICH BONMANN, GÖRAN ERIKSSON, THORSTEN STEINMETZ, ABDOLHAMID SHOORY – **Los transformadores de potencia se encuentran entre los equipos más caros de toda la red eléctrica de potencia. Por ello se dedica mucho esfuerzo para que su diseño sea tan perfecto como sea posible. Herramientas inestimables en este empeño son los paquetes de software de simulación que se basan en el método de elementos finitos. El software de simulación no sólo predice los efectos de la física básica, sino que también proporciona una vía para que la experiencia centenaria de ABB en el diseño de transformadores se utilice en ese diseño y se explote al máximo. Esto es importante, ya que distintos tipos de transformadores presentan distintos retos en aspectos como pérdida de flujo magnético, comportamiento no lineal complejo y peculiaridades del diseño físico. Se deben encajar todos estos factores manteniendo al tiempo los costes del cálculo dentro de lo razonable.**

Imagen del título
La simulación del comportamiento electromagnético detallado de los transformadores es esencial para un buen diseño del producto.

1 Distribución de pérdidas de la placa de acero para un ángulo de giro de 45 grados



1a Calculado resolviendo el interior de la placa



1b Calculado mediante técnica SIBC (Condiciones de contorno de impedancia superficial)

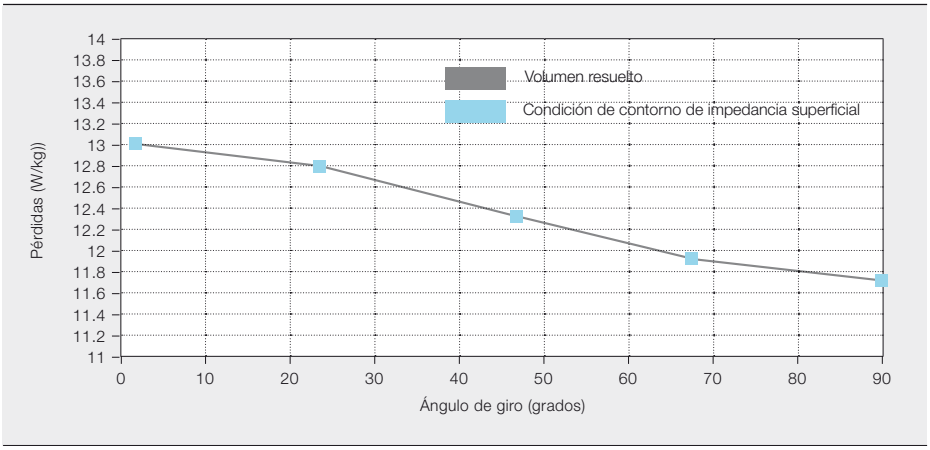
Las propiedades no lineales de los materiales y la complejidad de los aparatos son dos factores importantes que impulsan la potencia de cálculo necesaria para la simulación de los transformadores de potencia, tanto sumergidos en aceite como de tipo seco. Sin embargo, un conocimiento profundo del diseño de los transformadores de potencia permite llevar a cabo simulaciones muy precisas sin salirse de los límites de cálculo.

Un cálculo preciso de las pérdidas por dispersión y su distribución espacial requiere modelos numéricos adecuados de los mecanismos de las pérdidas en los propios materiales de construcción.

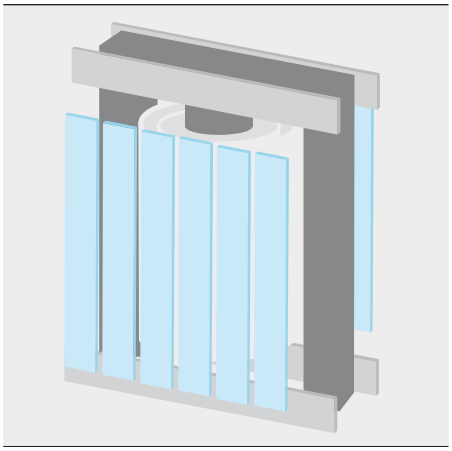
Los transformadores de potencia tienen una tarea crítica: deben subir y bajar la tensión en el tendido desde la central al consumidor final. En un mundo ideal, tendrían un rendimiento del 100 %, pero en la realidad todos los transformadores generan pérdidas. En general, las denominadas pérdidas de carga en los transformadores tienen tres componentes: pérdidas resistivas y por corrientes inducidas que aparecen en los devanados y en las barras de bus, y pérdidas por dispersión que se producen en las partes metálicas de los transformadores expuestas a campos magnéticos, por ejemplo, el depósito, las estructuras de sujeción del núcleo y el apantallamiento del depósito. Esta fuga inevitable de flujo magnético no sólo supone una pérdida de energía, sino que puede producir también puntos calientes localmente y acortar de este modo la vida del transformador.

Mientras que las pérdidas resistivas y por corrientes inducidas se pueden calcular con precisión mediante simulaciones en 2-D, el cálculo de las pérdidas por dispersión fuera de los devanados es un problema complejo de 3-D y es preciso un modelo adecuado del transformador para resolverlo. Este modelo se puede crear con paquetes de software de simulación que se basan en el método de elementos finitos. El análisis de elementos finitos (FEA) es una herramienta sofisticada utilizada ampliamente para resolver problemas de ingeniería derivados de campos electromagnéticos, efectos térmicos, etc. En el análisis FEA, la utilización de elementos de menor tamaño conduce a una mayor, y por tanto mejor, resolución del problema, pero también aumenta la potencia de cálculo necesaria, por lo que debe alcanzarse un compromiso entre el tamaño del elemento, el grado de detalle del modelo, la aproximación de las propiedades de los materiales, el tiempo de cálculo y la precisión de los resultados.

2 Pérdida total simulada en la placa en función del ángulo de giro. La técnica SIBC proporciona resultados muy próximos a los que se obtienen resolviendo el volumen total.



3 Geometría del modelo de transformador eléctrico (sin el depósito)



El software de simulación puede resolver la situación básica del campo electromagnético mediante la solución de las ecuaciones de Maxwell en una región finita del espacio con unas condiciones de contorno adecuadas (excitación de corriente y condiciones en los límites exteriores del modelo). Sin embargo, el resto de la simulación depende de los datos de entrada del usuario. Es donde la dilatada experiencia de ABB en el diseño de transformadores rinde sus frutos.

Simulación de las pérdidas por dispersión

Un cálculo preciso de las pérdidas por dispersión y su distribución espacial requiere modelos numéricos adecuados de los mecanismos de las pérdidas en los propios materiales de construcción.

Las pérdidas son importantes en los materiales macizos, pero también en los materiales laminados, tales como el acero laminado, ya que los campos de dispersión no están, en general, limitados al plano paralelo a los planos de laminación. Además de las pérdidas por corrientes inducidas, hay también pérdidas por histéresis en los materiales ferromagnéticos debidas a la disipación microscópica de la energía cuando se someten los materiales a campos magnéticos oscilantes.

Además, para calcular con precisión la distribución de las pérdidas totales, el modelo tiene que abordar la no linealidad de la curva de magnetización.

Esta no linealidad no sólo influye en la distribución del campo magnético sino también, indirectamente, en la distribución de las corrientes inducidas. El alto grado de anisotropía en el acero laminado introduce otras complicaciones que hay que tener en cuenta.

El llamado efecto pelicular también complica el asunto: las corrientes inducidas próximas a la superficie de un objeto metálico tienden a tener un efecto de apantallamiento, que resulta en un debilitamiento exponencial de los campos y las corrientes hacia el interior del objeto. Este efecto pelicular se hace más pronunciado a medida que aumentan la conductividad y la permeabilidad, lo que implica que, en los materiales que suelen interesar, la longitud característica del debilitamiento ("profundidad de la capa pelicular") es del orden de un milímetro o menos. En consecuencia, las pérdidas se concentran en esta fina capa. A primera vista, parece necesario dividir la profundidad de la capa pelicular en varios elementos finitos para calcular las pérdidas, un procedimiento que precisaría una potencia de cálculo excesiva para una simulación en 3-D completa. Afortunadamente, se pueden utilizar condiciones de contorno de la impedancia superficial (SIBC) para reducir considerablemente el volumen de la solución y por tanto las necesidades de potencia de cálculo. Así, se retira el interior del objeto metálico del dominio de cálculo y se tiene en cuenta el efecto de las corrientes inducidas que circulan cerca de la superficie especificando analíticamente la impedancia de la superficie, es decir, la relación entre los campos eléctrico y magnético en la superficie.

Se puede ilustrar la utilidad del método SIBC. Se puede simular una placa de acero infinitamente larga con una sección recta de 12 × 50 mm y una profundidad de la capa pelicular de 1 mm a 50 Hz en varios ángulos de rotación en un campo magnético. Las pérdidas totales por corrientes inducidas se calculan utilizando una resolución para todo el volumen del interior de la placa (lo que requiere 4.220 elementos finitos para todo el dominio de cálculo) → 1a y una formulación de las SIBC (que precisa 1.674 elementos finitos) → 1b. Las SIBC dan un valor de pérdida virtualmente idéntico comparando con el caso del volumen total → 2. La ganancia relativa obtenida con las SIBC es importante incluso para este pequeño objeto, y a medida que aumenta el tamaño se va haciendo mayor.

En ABB se están evaluando y mejorando diferentes técnicas numéricas para el cálculo de las distribuciones de pérdidas en los materiales de construcción de los transformadores. El objetivo es encontrar los modelos más precisos que puedan utilizarse en las simulaciones de 3-D mientras se mantiene razonable el coste del cálculo. Esto se consigue combinando mediciones experimentales de los objetos que se prueban, controladas con cuidado, con simulaciones detalladas.

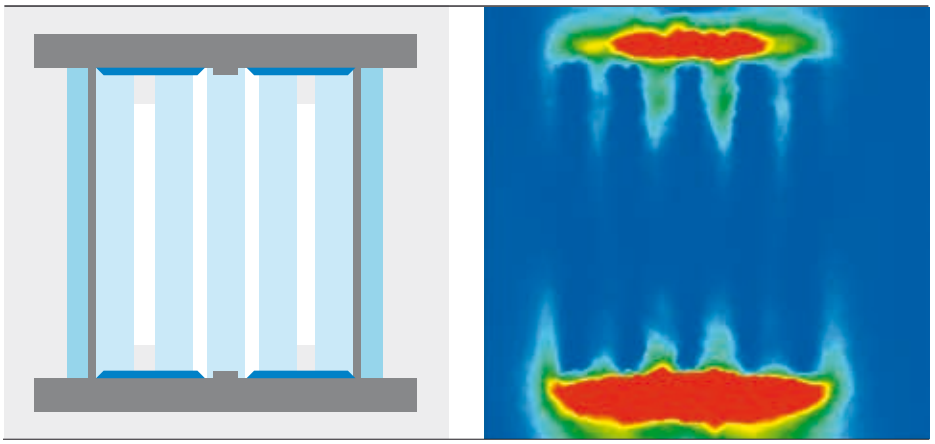
Basándose en esos resultados se evalúan entonces distintas técnicas propuestas de modelización de pérdidas para materiales no lineales y/o laminados.

Simulaciones electromagnéticas de transformadores de potencia sumergidos en aceite

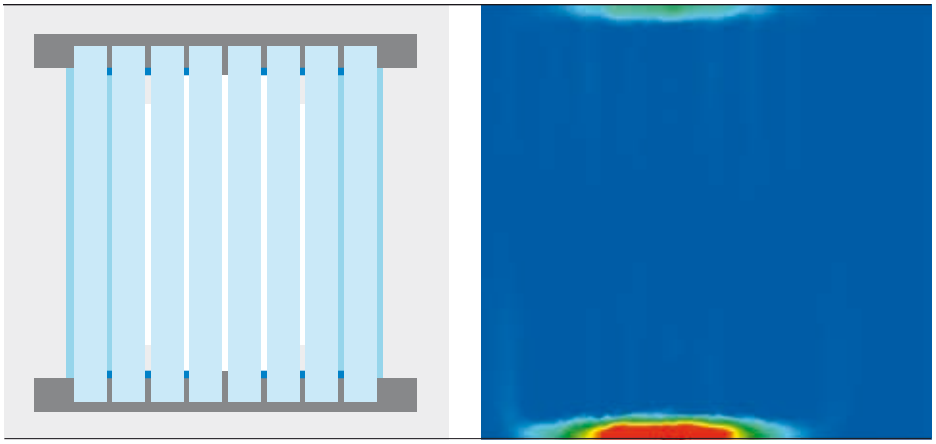
Los devanados de los autotransformadores (se utiliza aquí como ejemplo un ABB de 243 MVA monofásico de 13,8 kV) tien-

El objetivo es encontrar los modelos más precisos que puedan utilizarse en las simulaciones de 3-D mientras se mantiene razonable el coste del cálculo.

4 Geometría de derivaciones y distribución de pérdidas del depósito del transformador.



4a Derivaciones en el depósito cortas y separadas producen pérdidas altas (derecha)



4b Derivaciones más largas, más próximas unas a otras, se traducen en pérdidas menores (derecha)

den a producir grandes cantidades de flujo de dispersión en relación con su tamaño físico. Esto puede implicar pérdidas elevadas por dispersión y posibles puntos calientes en el depósito del transformador. No obstante, con una simulación y un diseño adecuados, se puede fabricar un apantallamiento del depósito que lo evite. En el caso que se presenta aquí, se emplearon como apantallamiento derivaciones magnéticas (shunts) montadas en las paredes del depósito. Las derivaciones son elementos de acero ferromagnético que conducen el flujo que emana de los extremos del devanado del transformador.

El modelo FEA en 3-D incluía todas las piezas de construcción importantes necesarias para llevar a cabo las simulaciones magnéticas y los cálculos de pérdidas → 3. Dada la complejidad del transformador real, se introdujeron algunas simplificaciones para hacer más manejable la carga de cálculo.

En el diseño inicial, en que las derivaciones del depósito estaban muy separadas y eran de altura insuficiente, las densidades de pérdida eran considerablemente mayores en el lado opuesto a la parte activa, en comparación con otras zonas del depósito → 4a. Las regiones críticas expuestas al impacto del campo magnético son claramente visibles en la figura, principalmente encima y debajo de las derivaciones magnéticas. Varias iteraciones de diseño hicieron aumentar la altura y el número de las derivaciones y redujeron su separación. Las pérdidas generadas en el depósito se redujeron de esa forma en casi el 40 por ciento. Las simulaciones permitieron alcanzar las prestaciones exigidas reduciendo al tiempo materiales extra, y por tanto, costes → 4b.

Simulación electromagnética de transformadores de tipo seco

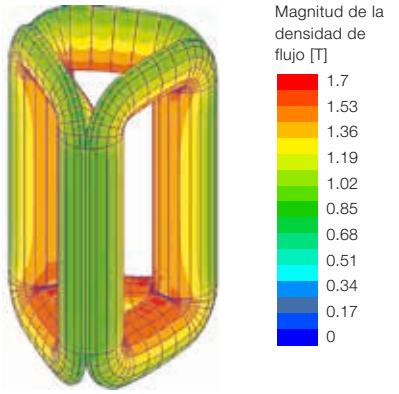
La parte activa (formada por las partes principales: núcleo, devanados, componentes estructurales y cables) de un transformador de tipo seco no está sumergida en un líquido aislante, en contraste de los transformadores de potencia y distribución sumergidos en aceite. Tanto el aislamiento eléctrico como la refrigeración de la parte activa se confían al aire ambiental. Para desarrollar y mejorar tecnologías y productos de transformadores de tipo seco se aplican diferentes tipos de simulaciones numéricas avanzadas, normalmente basadas en análisis FEA.

TriDry – transformadores de tipo seco con núcleos de devanados triangulares

En contraste con los transformadores convencionales de núcleos magnéticos de apilamiento plano, las tres patas del núcleo del TryDry experimentan idénticas condiciones magnéticas → 5. La simulación numérica de los campos magnéticos en el núcleo es especialmente difícil porque se requiere un modelo de material anisótropo, pues la permeabilidad es muy alta en sentido paralelo a la laminación pero mucho menor en el sentido perpendicular → 5. Estas simulaciones proporcionan un conocimiento fundamental del comportamiento magnético de los transformadores TryDry. Asimismo, se pueden realizar análisis detallados de las intensidades de campos dispersos emitidos de los transformadores TryDry mediante simulaciones numéricas. Éstas pueden ser obligatorias para asegurar el cumplimiento de las disposiciones legales, por ejemplo, del límite de un microtesla RMS en

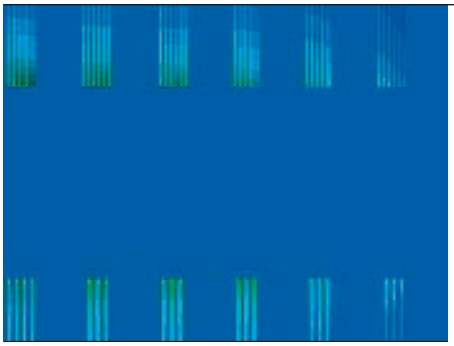
5 Transformador TriDry y distribución simulada de la densidad de flujo magnético en su núcleo magnético.

5a Transformador TriDry

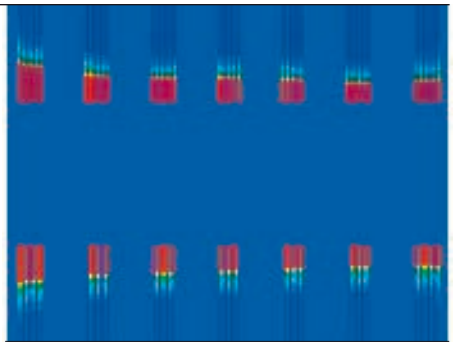


5b Distribución de la densidad de flujo magnético

6 Simulaciones electromagnéticas de un transformador de 12 impulsos; distribución de las pérdidas en el devanado sobre las secciones finales de las láminas conductoras



6a A la frecuencia fundamental



6b A la frecuencia del quinto armónico

Las condiciones de contorno de la impedancia superficial (SIBC) pueden reducir considerablemente el volumen de la solución y por tanto las necesidades de potencia de cálculo.

los transformadores instalados en Suiza en áreas sensibles.

Transformadores de tipo seco para accionamientos de velocidad variable

Se utilizan transformadores en accionamientos de velocidad variable para alimentar los motores de CA. La electrónica de potencia asociada a esos transformadores genera armónicos de corriente que aumentan las pérdidas en los devanados y producen ocasionalmente puntos calientes. Hay que tener esto en cuenta cuando se preparan modelos de simulación. Un ejemplo típico de simulación de pérdidas en devanados se presenta en ➔ 6. Aquí se presenta la distribución relativa de las pérdidas en el devanado en una sección extrema de láminas conductoras de dos bloques opuestos de devanado para un transformador de 12 impulsos con dos devanados en el secundario. Las pérdidas en el devanado a la frecuencia fundamental se distribuyen más uniformemente a lo largo de la superficie del conductor que las correspondientes a la frecuencia del quinto armónico. Esto se debe a que las corrientes de los dos devanados del secundario están en fase con la frecuencia fundamental, produciendo principalmente un flujo axial. Sin embargo, estas corrientes están en oposición de fase a la frecuencia del quinto armónico, produciendo un flujo radial que concentra las pérdidas en la región del devanado próxima al entrehierro axial entre ellos. Ello produce puntos calientes, que exigen corregir el diseño adecuadamente.

Éxito de la simulación

La simulación numérica de campos electromagnéticos ha demostrado ser una herramienta muy potente para el desarrollo y el diseño de los transformadores actuales. Unos modelos numéricos adecuados facilitan, por ejemplo, la simulación de las pérdidas por dispersión en componentes estructurales, de las pérdidas en los devanados o de la magnetización del núcleo, aplicables a distintos tipos de transformadores.

ABB utiliza las simulaciones numéricas descritas aquí en investigación, desarrollo e ingeniería y aportan una importante contribución a sus transformadores de alta calidad sumergidos en aceite y de tipo seco.

Daniel Szary
Janusz Duc
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
daniel.szary@pl.abb.com
janusz.duc@pl.abb.com

Bertrand Poulin
ABB Power Products, Transformers
Varennes, Quebec, Canadá
bertrand.f.poulin@ca.abb.com

Dietrich Bonmann
ABB Power Products, Transformers
Bad Honnef, Alemania
dietrich.bonmann@de.abb.com

Göran Eriksson
ABB Corporate Research
Västerås, Suecia
goran.z.eriksson@se.abb.com

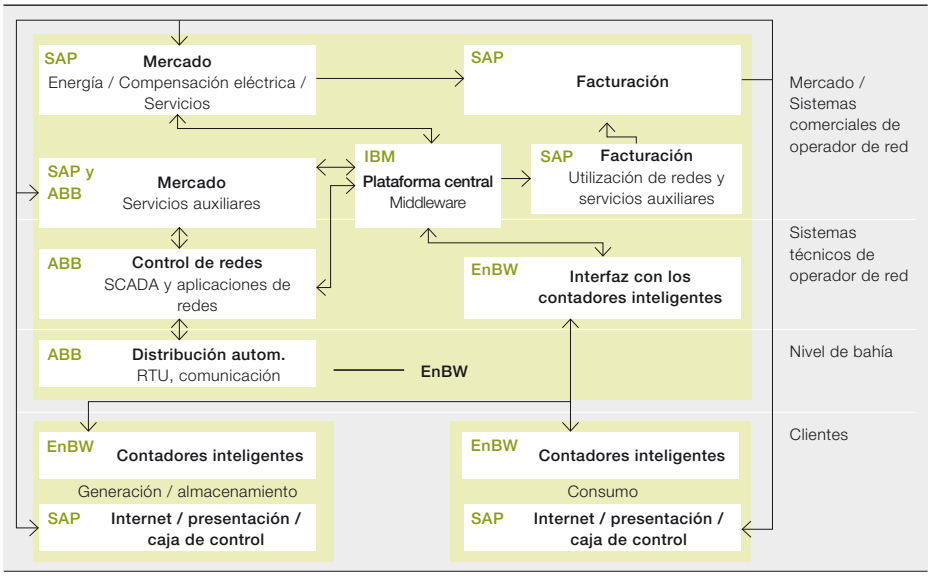
Thorsten Steinmetz
Abdolhamid Shoory
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Suiza
thorsten.steinmetz@ch.abb.com
abdolhamid.shoory@ch.abb.com

Una actuación inteligente

Fortalecimiento de las redes inteligentes mediante una colaboración piloto en condiciones reales

CARSTEN FRANKE, TATJANA KOSTIC, STEPHAN KAUTSCH, BRITTA BUCHHOLZ, ADAM SLUPINSKI – ABB ha desarrollado y sigue desarrollando todos los componentes necesarios para habilitar y optimizar redes inteligentes. Con el fin de evaluar y mejorar las soluciones existentes, ABB participa en proyectos de investigación e instalaciones piloto. Uno de estos proyectos piloto, que ha obtenido un gran éxito, ha sido MeRegio, uno de los seis proyectos de E-energía financiados por el gobierno alemán. En el desarrollo de ABB de nuevas tecnologías de información y comunicación para redes inteligentes ha sido necesaria una extensa labor de cooperación con numerosos socios del proyecto. El resultado es una solución que aporta aún más solidez y estabilidad a las redes inteligentes.

1 Interacciones de consorcio y competencia en MeRegio



En 2012 ABB finalizó con éxito su participación en el proyecto piloto MeRegio (región de emisiones mínimas). El piloto, que se inició en 2008, forma parte de un grupo de proyectos de E-energía que financia el Ministerio Federal de Economía y Tecnología en colaboración con el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear del gobierno alemán [1].

Como todos los proyectos de E-energía, MeRegio se centró en el desarrollo, la implementación y las pruebas de la tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para la gestión de los sistemas de energía del futuro. El consorcio del proyecto MeRegio estaba formado por:
- ABB
- EnBW Energie Baden-Wurttemberg
- IBM Deutschland
- SAP
- Systemplan GmbH
- Universidad de Karlsruhe (KIT)

Las partes responsables y sus componentes principales se muestran en → 1. ABB fue responsable principalmente del control de la red y la automatización de la distribución. IBM se ocupó del software intermedio de intercambio de información para conectar los distintos componentes de MeRegio. SAP desarrolló principalmente el mercado mientras que EnBW, como compañía eléctrica, desarrolló la plataforma para la integración de los contadores inteligentes y la caja de control en su red.

Además, EnBW lideró el consorcio global. KIT prestó ayuda al consorcio con tareas de investigación específicas. Systemplan colaboró en la configuración e instalación de subcontadores específicamente para los clientes industriales.

Nuevas TIC para redes inteligentes

En el marco de MeRegio, ABB desarrolló e implementó nuevos dispositivos y técnicas de medición inteligente. No obstante, el objetivo principal de la contribución de ABB era el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías de información y comunicación que permitieran la incorporación de aplicaciones y mecanismos adicionales de control en las redes inteligentes. ABB se centró específicamente en cuatro aspectos diferentes del desarrollo. Posteriormente, los aspectos primero, tercero y cuarto se evaluaron mediante simulaciones exhaustivas.

Primer aspecto: simulaciones fuera de línea

El primer aspecto que se investigó con detalle en el marco del proyecto MeRegio fueron las simulaciones fuera de línea en la red piloto de media y baja tensión, con el fin de identificar nuevas oportunidades de optimización. Para ello, ABB tuvo en cuenta nuevas y diferentes soluciones técnicas, como la regulación del cos(ϕ), las unidades de regulación de tensión y el almacenamiento de energía. Los resultados de este trabajo son, por ejemplo, que las regulaciones de tensión en las subestaciones secundarias permiten casi duplicar la cantidad de energía renovable generada que se puede integrar y evitan las infracciones de la banda de tensión en las redes de baja tensión sin modificar la topología de la red. Además, se ha constatado que todos estos resultados de simulaciones fuera de línea se pueden aplicar a otras redes. Por lo tanto, los conocimientos adquiridos se pueden volver a aplicar y servir de ayuda a clientes que tengan problemas similares. Además, estos resultados se han utilizado para identificar los escenarios en que sería de utilidad instalar TIC adicionales para realizar nuevas investigaciones, controles e incrementos en la fiabilidad del suministro de la red de distribución.

Segundo aspecto: desarrollo de tecnologías de medición

Basándose en este conocimiento, el segundo aspecto se centró en el desarrollo de tecnologías de medición en las subestaciones secundarias, que requería el uso de unidades terminales remotas (UTR) para automatizar la operación en estas subestaciones. Se utilizaron RTU560 de ABB y el multímetro 560CVD11 para determinar la tensión en el lado de media tensión de la subestación utilizando únicamente mediciones del lado de baja tensión. Esta técnica de medición específica se desarrolló en el piloto MeRegio y se sometió también a pruebas exhaustivas en la red de campo. Dado que se ha

Imagen del título
La región modelo de Freimat en Alemania. Fotografía © 2013 Luca Siermann.

demostrado el buen funcionamiento de este enfoque para determinar la tensión en el lado de media tensión, ya se ha aplicado en los proyectos piloto de ABB.

Tercer aspecto: integración de las mediciones

El tercer aspecto que se abordó en el marco del proyecto MeRegio fue la integración de todas las mediciones de media y baja tensión de las diferentes subestaciones, así como el uso de las mediciones disponibles del contador inteligente en el sistema de gestión de la red. De esta manera se pueden mejorar los cálculos de red y el operador dispone de más capacidades de control en línea. Si bien los datos de las subestaciones se pudieron integrar directamente utilizando los protocolos de comunicación existentes, se necesitó un mecanismo de nuevo desarrollo para la importación de los datos de los contadores inteligentes. El intercambio de datos necesario se realizó a través de una interfaz de servicios web con la plataforma IBM CORE, utilizando un modelo de datos en el que se tuvieron en cuenta las normas vigentes. En concreto, el Modelo de información común (DCIM, incluidas las extensiones relativas a la distribución, IEC 61968-11 e IEC 61970-301) influyó en el protocolo de intercambio del modelo de información que desarrolló ABB. Los datos integrados de los niveles de baja y media tensión posibilitan la ejecución de los caudales de energía y la visualización de los cuellos de botella en la red y las irregularidades en la tensión. Para ello, se utiliza un método de colores que muestra además las influencias que dependen de la carga, y la generación, con respecto a los problemas identificados. Todos estos conceptos y métodos se han validado mediante la ejecución de simulaciones exhaustivas del sistema.

Cuarto aspecto: enfoque relativo al mercado

El cuarto aspecto del piloto MeRegio se centró en el enfoque relativo al mercado de la gestión de la demanda, aplicado a las redes de media y baja tensión. ABB hizo previsiones en la generación fotovoltaica y eólica descentralizada. Además, se implementó una interfaz adicional para la plataforma IBM CORE con el fin de recibir las previsiones de "cajas de control" especiales instaladas en una determinada red de distribución que opera EnBW. Basándose en todos estos datos, se han implementado caudales eléctricos predictivos con el fin de anticipar los posibles cuellos de botella en la red con una antelación de hasta seis horas. Los resultados de estos cálculos predictivos están codificados en XML y se transmiten a una herramienta de análisis. Este nuevo módulo de análisis de cuellos de botella calcula, para la totalidad de las cargas y los generadores, las sensibilidades ante los problemas previstos. Basándose en estas sensibilidades, el módulo sugiere activamente volver a enviar los programas relativos a la generación y las cargas locales. Estas soluciones se codifican en las denominadas señales de prioridad que se transmiten al mercado del operador del sistema de distribución con el fin de que se resuelvan. El modelo de intercambio de datos de las señales de prioridad se ha desarrollado como una extensión de la norma DCIM. De esta forma se facilita que los problemas similares en las redes de distribución se puedan solucionar de una manera similar utilizando los mismos tipos de mensajes de carga útil. Un equipo de expertos de ABB abordó la totalidad del problema, a partir del caudal de carga predictivo, incluyendo el análisis de los cuellos de botella y la generación y la comunicación de la señal de sensibilidad.

> Los cuellos de botella de la red se simularon debido a la dificultad de observar estos sucesos con la frecuencia suficiente en condiciones reales.

La evaluación de la eficacia del proceso de "señales de prioridad" para resolver de una manera proactiva los cuellos de botella de la red se basó principalmente en simulaciones en línea de la red de distribución, lo que refleja la dificultad de observar estos cuellos de botella con la frecuencia suficiente en la vida real. Por lo tanto, algunos datos de previsión de cargas y generación se modificaron para obtener cuellos de botella con diferentes tiempos de antelación. A continuación, se evaluaron los algoritmos y los mecanismos de intercambio de información teniendo en cuenta su eficiencia en la identificación y la solución de los problemas previstos de la red.

Resultados demostrables

La propia evaluación del piloto no solo se basó en las mediciones de campo, sino también en extensas simulaciones. Con el fin de demostrar y comunicar los resultados del proyecto piloto MeRegio a un público más amplio, se ha desarrollado un sofisticado demostrador, el Sistema de distribución inteligente ABB, que se puede utilizar para introducir y mostrar redes inteligentes en general y para explicar con más detalle las cuestiones relativas a MeRegio y las estrategias de solución desarrolladas. Además, el demostrador aborda también la evaluación del impacto económico de las soluciones de red inteligente ante determinados problemas de explotación de la red. La simulación representó una parte fundamental del desarrollo de la solución que muestra el demostrador, si bien el proyecto solo podría haber sido posible gracias a la colaboración de numerosas partes que compartieron sus conocimientos e ideas. Esta satisfactoria colaboración es un ejemplo de que es posible que diferentes grupos de interés trabajen conjuntamente para aportar al mundo una solución que beneficia a todos. Dos (o más) cerebros funcionan mejor que uno solo.

Carsten Franke
Tatjana Kostic
ABB Corporate Research
Baden, Suiza
carsten.franke@ch.abb.com
tatjana.kostic@ch.abb.com

Stephan Kautsch
Britta Buchholz
ABB Power Systems, smart grids
Mannheim, Alemania
stephan.kautsch@de.abb.com
britta.buchholz@de.abb.com

Adam Slupinski
ABB Power Systems Consulting
Mannheim, Alemania
adam.slupinski@de.abb.com

Un agradecimiento especial a
Klaus von Sengbusch,
antiguo miembro de ABB Power Systems

Referencia

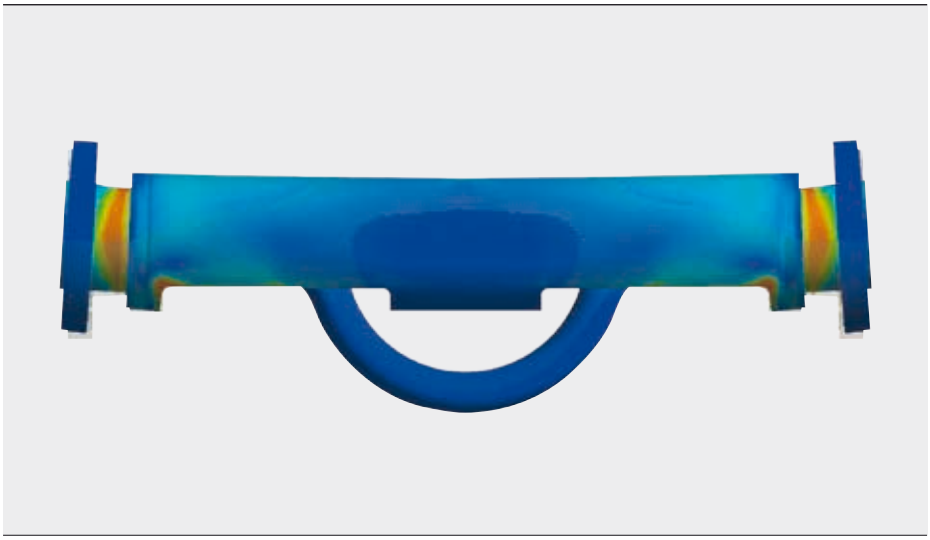
[1] Proyecto de E-energía del Ministerio Federal de Economía y Tecnología alemán. Consultado en http://www.e-energy.de/en/ (5 de junio de 2013).

Tiene sentido

Diseño de sensores más precisos y resistentes mediante la simulación de sistemas y multifísica

ROLF DISSELNKOETTER, JÖRG GEBHARDT, ROSTYSLAV TYKHONYUK, HOLGER NEUBERT – La instrumentación es un elemento crítico de muchas de las actividades de ABB. Para mantener el ritmo de unos requisitos que evolucionan rápidamente, la empresa está tomando un papel destacado en la investigación de la tecnología de sensores, buscando el desarrollo de nuevas tecnologías de detección, la reducción del espacio ocupado por el sensor, el cumplimiento de nuevas normas y el desarrollo de aplicaciones innovadoras. Teniendo presentes estos objetivos, ABB está empleando la simulación de sistemas y multifísica para desarrollar con éxito sensores más precisos y robustos.

1 Distribución de esfuerzos de von Mises producida por un par estático externo



Deformación ampliada 1.000 veces

El desarrollo de sensores suele caracterizarse por unas elevadas exigencias de precisión. De hecho, algunas aplicaciones requieren precisiones del 0,1 al 0,05 por ciento del valor medido.

Las tecnologías de sensores suelen presentar efectos no triviales a nivel de sistema, por ejemplo, a causa de detalles del diseño o del número de componentes cuyo comportamiento influye en la cadena de medición. Las influencias interiores y exteriores (por ejemplo, termomecánicas, químicas, de interferencia electromagnética) pueden ocasionar desviaciones no deseadas de ganancia, fase y desplazamiento, y puede perjudicar la precisión y la estabilidad de las señales de medida.

Se pueden emplear simulaciones del sistema completo o de multidominios físicos para evitar ensayos fastidiosos de diversos prototipos físicos y para obtener una predicción fiable de alta precisión del comportamiento del aparato. Por lo tanto, el diseño de sensores es un excelente ejemplo de desarrollo de mecatrónica basada en modelos, descrito por ejemplo en [1]. A continuación se presentan ejemplos de estos dos tipos de simulación.

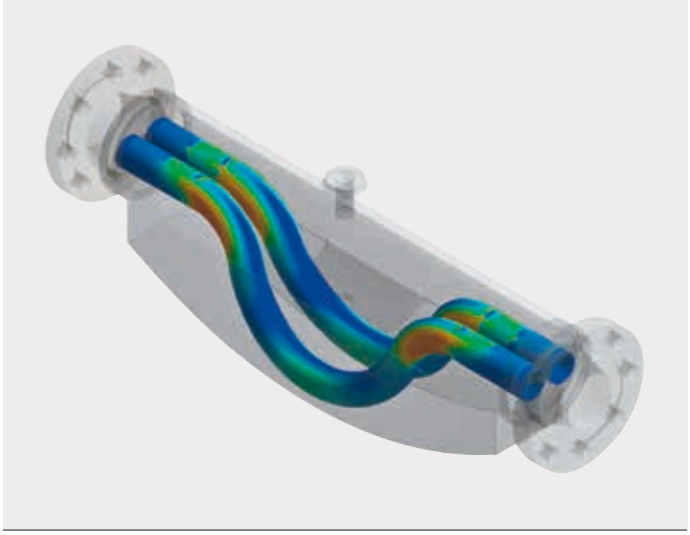
Caudalímetros de Coriolis

Un sensor de Coriolis es un sistema con componentes entre los que hay fuertes interacciones. Cuando el accionamiento suministra una corriente de CA a un actuador en los tubos de flujo, estos vibran. Debido al efecto de Coriolis, el flujo de fluido a través de los tubos producirá pequeñas desviaciones de fase entre las vibraciones en distintos puntos del sistema mecánico. Esto se detecta con dos sensores de vibraciones colocados en distintos sitios. La electrónica evalúa el desfase entre las señales de los dos sensores y utiliza su amplitud para controlar la corriente de accionamiento.

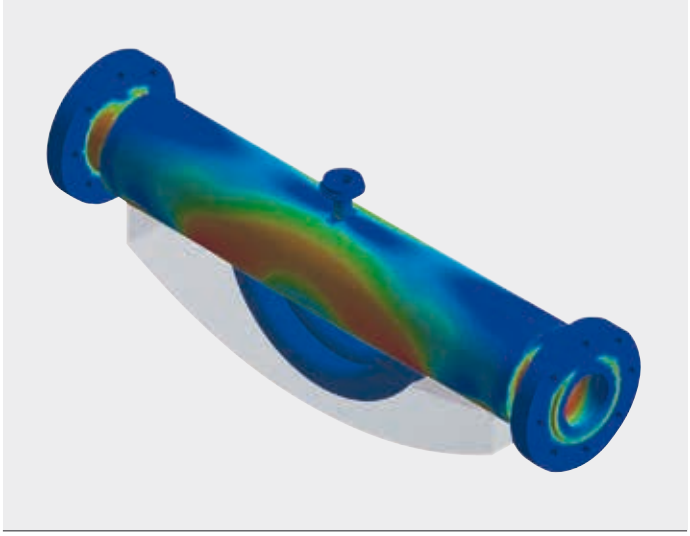
No sólo se requiere un profundo “know-how” teórico para el diseño de caudalímetros de Coriolis, sino que la metodología de I+D debe ser muy eficiente.

Imagen del título
El caudalímetro de Coriolis FCB 350 (DN25)

2 Frecuencias propias de los caudalímetros de Coriolis



2a Modo operativo propio: distribución de esfuerzos y deformaciones



2b Distribución de esfuerzos para el modo propio inferior de la carcasa del aparato

No sólo se requiere un profundo “know-how” teórico para el diseño de caudalímetros de Coriolis, sino que la metodología de I+D debe ser muy eficiente. Tiene que permitir el diseño de líneas de producto completas, y de las variaciones del producto específicas para el cliente. Los criterios de diseño cuantitativos, que se pueden hacer operativos mediante ensayos virtuales y experimentales, forman la base para unos excelentes resultados en el desarrollo.

Sensibilidad y sensibilidad cruzada

Una predicción numérica exacta de la sensibilidad del flujo tiene dos objetivos importantes: en primer lugar, permite el análisis de influencias exteriores de acuerdo con su efecto real en el proceso de la medición, y de esta forma minimiza las sensibilidades cruzadas no deseadas y optimiza el diseño. En segundo lugar, el mismo margen de las señales de salida es común para toda la gama de tamaños de medidor y de esta forma se optimizan los algoritmos de procesamiento de la señal.

Resistencia mecánica y estabilidad dinámica

Todas las señales de medida generadas por el aparato deben ser estables ante las diversas influencias ambientales inevitables y potencialmente erráticas.

Un criterio importante sobre las prestaciones y la estabilidad del aparato, que puede ser probado eficientemente mediante simulaciones, viene dado por la medida de la densidad bajo diversas cargas exteriores. Como primer paso del cálculo, se aplica al aparato una carga típica del caso más desfavorable. → 1 muestra la respuesta no lineal de la estructura para una determinada carga exterior. El resultado de este paso se utiliza también para determinar la resistencia mecánica del aparato.

En un segundo paso se calculan las frecuencias propias del sistema, como se muestra en → 2a. Para que un diseño supere esta prueba, es importante que los cambios de frecuencia inducidos por la carga no infrinjan los requisitos de precisión del aparato.

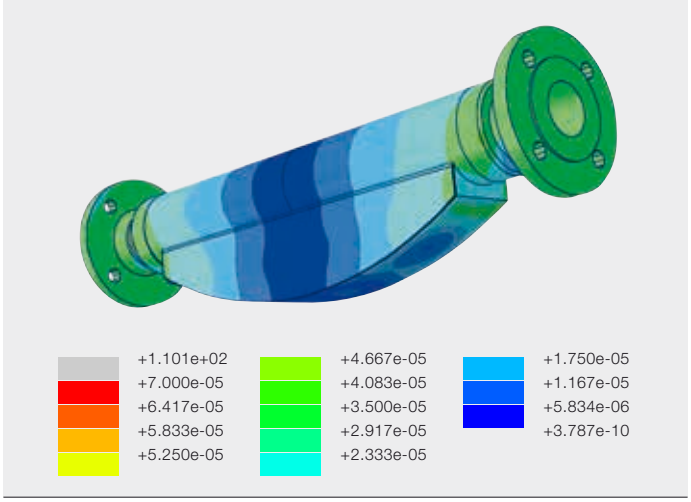
Además, es importante un desacoplamiento de las vibraciones de la protección exterior del aparato durante el funcionamiento. Mediante la selección de parámetros especiales de diseño, el modo de funcionamiento quedará bien separado de los modos de la superficie exterior. Un ejemplo de esto último se presenta en → 2b.

Diseño resistente para fiabilidad de las prestaciones

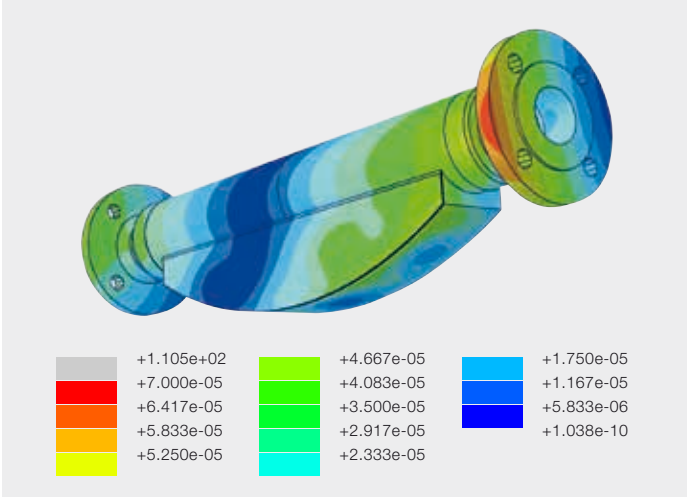
Para las mediciones de flujo de alta calidad, la principal variable a controlar es la “fase cero”, la medida integral de la influencia de las tolerancias de fabricación y asimetrías superpuestas, que causan una señal no nula sin la presencia de flujo. Es especialmente difícil reducir las influencias físicas que dependen del tiempo en la fase cero, ya que esto puede ocasionar errores en los resultados de las mediciones que no se pueden compensar. Los elementos externos de amorti-

Una predicción numérica exacta de la sensibilidad del flujo permite el análisis de las influencias exteriores de acuerdo con su efecto real en el proceso de la medición y optimiza los algoritmos de procesamiento de la señal.

3 Gráfico de curvas de nivel de fases cero (en grados), inducidas por un amortiguador de fuerza constante, en función de su ubicación



3a En ausencia de precargas (no hay fuerzas estáticas externas aplicadas)



3b Sometido a una fuerte carga estática externa (par axial)

Para mediciones de flujo de alta calidad, la principal variable a controlar es la “fase cero”, la medida integral de la influencia de las tolerancias de fabricación y asimetrías superpuestas.

guación pueden tocar en el aparato en cualquier posición de su carcasa exterior, que está vibrando a causa del principio de funcionamiento del medidor. En ese caso, se está sacando energía en esa posición, lo que ocasiona un cambio de baja amplitud en la estructura de ondas progresivas del aparato. Debe elegirse con cuidado la configuración mecánica interna y externa de un medidor de Coriolis para mantener reducida esta influencia, en particular por lo que se refiere a las consecuencias sobre el movimiento de los tubos del sensor y los captadores de señal.

Se han preparado algoritmos que permiten un cálculo muy eficiente de las fases cero como una función de la amortiguación local, es decir, de la fuerza de amortiguación y de la ubicación del amortiguador. Esto supone también un problema numérico especial, puesto que las fases que deben calcularse son excepcionalmente pequeñas, en el margen de 10^{-5} grados.

→ 3a presenta un gráfico de curvas de nivel de fases cero inducidas en función de la ubicación del amortiguador para una fuerza de amortiguación determinada constante. El resultado del cálculo se puede comparar con el límite permitido de fases cero para el caudalímetro considerado. → 3b muestra la misma situación cuando se coloca el sistema bajo una fuerte carga de par axial. El resultado demuestra que, para este diseño, la fase cero permanece estable en un valor muy bajo, incluso con fuertes influencias exteriores.

Finalmente, se han seleccionado criterios representativos que son de uso eficiente y que representan fiablemente un comportamiento estable de la fase cero para el diseño del producto Coriolis Master de ABB. Se han llevado a cabo ensayos virtuales de impacto de caída (golpes) [2] para varios medidores Coriolis por medio de cálculos de elementos finitos con integración de tiempo explícita.

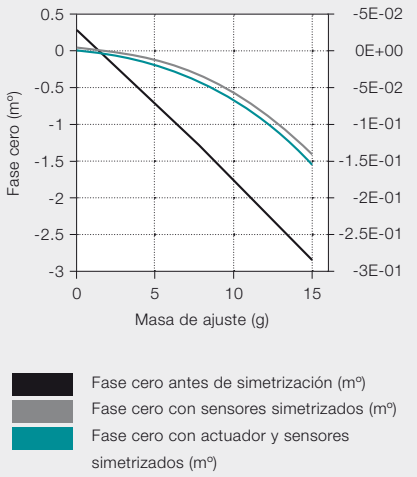
Para llegar a un diseño sólido, de bajo coste, se llevan a cabo análisis de sensibilidad relativos a las inevitables tolerancias de fabricación. De esa forma se puede adaptar la producción de caudalímetros para conseguir el máximo valor para el cliente. En un diseño que sea sólido, las tolerancias tienen menos influencia sobre las prestaciones [3] → 4.

Diseño magnético en un contexto de sistema

Los acoplamientos en un sensor de Coriolis, que como se ha indicado tiene unos componentes que interaccionan fuertemente, están indicados con flechas negras en → 5. El actuador y los sensores de vibración incluidos se basan en el principio de la bobina móvil. Ésta se compone de un imán permanente, un concentrador flexible de flujo magnético y una bobina móvil en el entrehierro. La fuerza producida entre el imán y la bobina del actuador genera las vibraciones que se miden por medio de la tensión inducida en las bobinas del sensor.

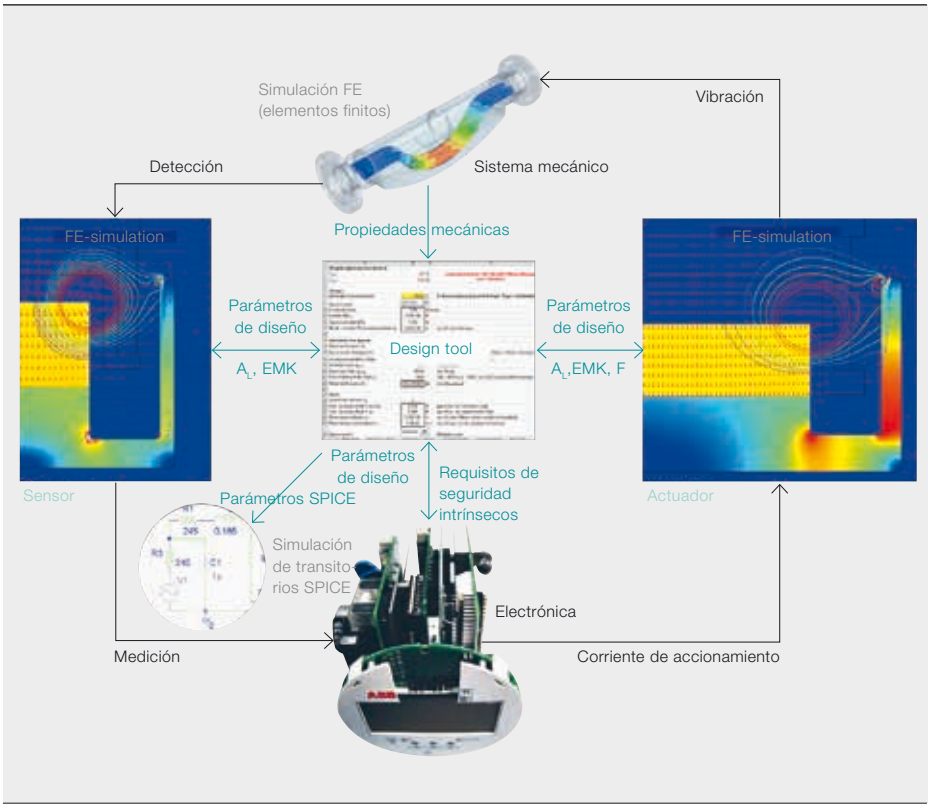
Cuando se diseñan y optimizan los componentes magnéticos, debe tenerse en cuenta toda la cadena de piezas que interactúan entre sí. Por ejemplo, las sensibi-

4 Fase cero en función de la masa de ajuste



Para las curvas gris y verde, se aplica el eje y de la derecha, que está ampliado con un factor de 10. El diseño simetrizado tiene un punto cero que es mucho más estable bajo diferencias de masas entre los tubos gemelos.

5 Proceso de diseño magnético y electrónico para el sistema de sensor / actuador



lidades requeridas del actuador y los sensores tienen una dependencia mutua y de las propiedades de los subsistemas mecánicos y electrónicos. Además, deben tenerse en cuenta condiciones restrictivas tales como el peso y el tamaño máximo de las piezas magnéticas, y las limitaciones de las impedancias eléctricas y las amplitudes de señales debidas a requisitos de seguridad intrínsecos.

Para llegar a un diseño sólido, de bajo coste, se llevan a cabo análisis de sensibilidad relativos a las inevitables tolerancias de fabricación.

Esto se asegura mediante una herramienta basada en una hoja de cálculo, que permite la recogida y la comprobación de los datos magnéticos, electrónicos y mecánicos necesarios. La herramienta proporciona una interfaz con los modelos de elementos finitos (EF) de los componentes magnéticos intercambiando parámetros de diseño y las características electromagnéticas resultantes. Además, reúne los resultados de la simulación mecánica e incluye un modelo simplificado de los circuitos de accionamiento. Durante la optimización de los parámetros, supervisa el cumplimiento de los objetivos del diseño y las condiciones restrictivas señalando cualquier desviación. De esa forma, se puede realizar el diseño de componentes magnéticos y de circuitos de accionamiento siguiendo un proceso iterativo. La herramienta puede también dar los parámetros de un modelo SPICE (programa de simulación con hincapié en circuitos integrados) de circuito equivalente básico para la simulación de transitorios del accionamiento, el actuador y el sistema mecánico. ABB ya ha diseñado varios sensores de Coriolis nuevos empleando esta herramienta y el proceso de diseño incorporado.

Sensores electromagnéticos

Los sensores electromagnéticos comunes incluyen transformadores de intensidad (TC), sensores de posición y de proximidad. Aunque varias herramientas de simulación son adecuadas para investigar esos sistemas, para obtener cálculos estables y eficientes y resultados precisos, se suelen necesitar técnicas de modelización y configuraciones de solucionadores especiales. Además, hay que llegar a un compromiso razonable entre la complejidad del modelo y la necesidad de precisión.

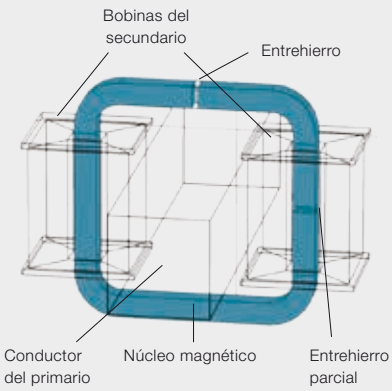
Entre las dificultades clásicas de la simulación de sensores encontramos:

- Geometría en 3-D compleja que incluye detalles dentro de un espectro de tamaños muy amplio
- Efectos no lineales
- Histéresis
- Comportamiento de los transitorios
- Interacción entre canales
- Acoplamiento de efectos físicos que reaccionan en distintas escalas de tiempo (por ejemplo, eléctricos y térmicos)

En 2009, ABB empezó a colaborar con la Universidad de Tecnología de Dresde para crear técnicas de modelización de EF para sensores electromagnéticos que fueran aplicables en distintos proyectos de desarrollo. La atención se centra en modelos 3-D con parámetros acoplados (modelos multifísicos).

Cuando se diseñan y optimizan los componentes magnéticos, debe tenerse en cuenta toda la cadena de piezas que interactúan entre sí.

6 Geometría de un modelo de transformador



7 Características del modelo de sensor electromagnético

- Característica magnética antihistéresis no lineal H(B) del material del núcleo.
  Se ha elegido una formulación analítica para una mejor estabilidad numérica.
- Distribución de corriente en el secundario „unida al hilo" en las bobinas modelizadas con ocho bloques prismáticos. La resistencia del cobre depende de la temperatura.
- Los modelos son adecuados para la simulación de transitorios.
- Acoplamiento con modelos de circuitos SPICE integrados (por ejemplo, fuente de corriente, carga en el secundario, operación en bucle cerrado con sensor de flujo adicional).
- Las corrientes parásitas inducidas en la barra de bus del primario ocasionan pérdidas adicionales y una distribución no homogénea de la densidad de corriente del efecto pelicular. Los entrehierros producirán sensibilidad respecto a campos magnéticos dispersos y a la distribución de la corriente.
- Cálculo de las densidades de pérdidas de conducción en los devanados primario y secundario.
- Modelización explícita y analítica de los núcleos laminados (apilados o de arrollamiento de bandas).
- Histéresis dinámica y distribución de pérdidas eléctricas a partir de las corrientes inducidas en el núcleo magnético.
- Modelo térmico integrado que calcula la distribución de temperatura a partir de las pérdidas eléctricas en los devanados y en el núcleo magnético. La desviación térmica de las conductividades eléctricas se tiene en cuenta en un proceso de iteración en bucle cerrado, controlado con un programa exterior.

Ejemplo de sistema

En ➔ 6 se presenta un modelo geométrico que se ha empleado en las investigaciones. Aunque no es un diseño real, presenta las propiedades típicas de algunos tipos de sensores actuales.

Es un modelo 3-D no simétrico de un TI con una barra de bus del primario y un devanado en el secundario, que se divide en dos bobinas. El núcleo magnético tiene dos tipos distintos de entrehierro. Las dimensiones del modelo paramétrico se pueden modificar, y puede ampliarse con un sensor de flujo en uno de los entrehierros y con circuitos eléctricos que forman un sensor de corriente de bucle cerrado.

Basándose en este diseño, se han realizado varias versiones del modelo para investigar distintos aspectos físicos. Permiten la modelización del fenómeno y sus propiedades, bien por separado o combinados.

Características del modelo

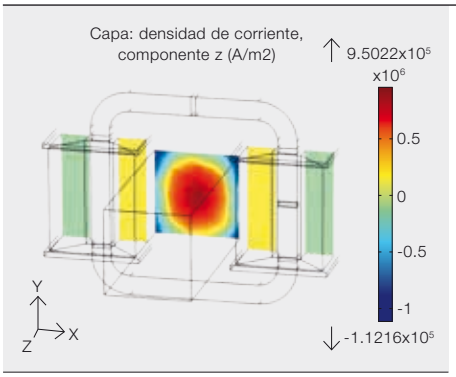
El modelo de ➔ 6 presenta varias dificultades: es tridimensional, no simétrico (es decir, no se puede reducir a una subgeometría con las condiciones restrictivas adecuadas) y contiene detalles pequeños (entrehierros) en una estructura de gran tamaño. Estos entrehierros influyen de forma importante en la distribución del campo disperso y en las propiedades del sensor. Sin embargo, sin un mallado de geometría optimizada, dan lugar a un número grande de elementos finitos y largos tiempos de cálculo.

Otras características incorporadas hasta ahora en los modelos se destacan en ➔ 7. Esta lista muestra que, en un sensor real, puede haber muchos acoplamientos y efectos físicos. Cuáles de ellos son los que hay que tener en cuenta en el análisis depende de cada problema.

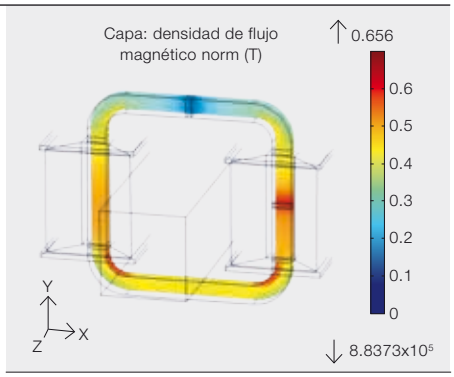
Resultados

Se ha realizado ya un buen progreso en los modelos [4, 5]. En ➔ 8 se presentan los resultados obtenidos en una versión del modelo con una barra de bus maciza de cobre y un material del núcleo de FeSi de característica magnética no lineal. Se admite que no es conductor eléctrico. Por lo tanto, no hay pérdidas eléctricas en el núcleo y se puede hacer un modelo del núcleo no laminado. El modelo de EF se acopla con modelos de circuitos SPICE de una fuente de corriente sinusoidal en el primario y una carga resistente en el secundario, que tiene N_{sec} espiras. Se calcula la distribución de las pérdidas que se utiliza como entrada para la simulación térmica, lo que a su vez proporciona la distribución de temperaturas. La conducción eléctrica depende de la temperatura. Dada la característica no lineal del núcleo y el acoplamiento con un modelo de circuito, se requiere una simulación de transitorios.

8 Distribución de la densidad de corriente y de flujo magnético

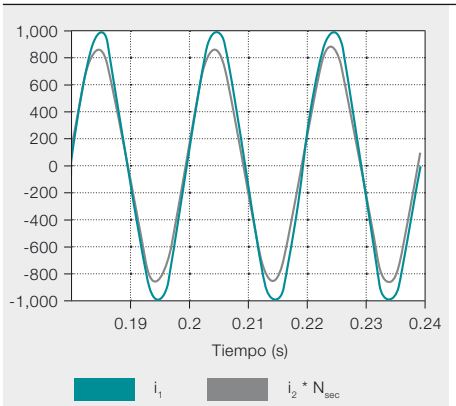


8a Distribución instantánea de la densidad de corriente (componente z) con efecto pelicular en el conductor del primario

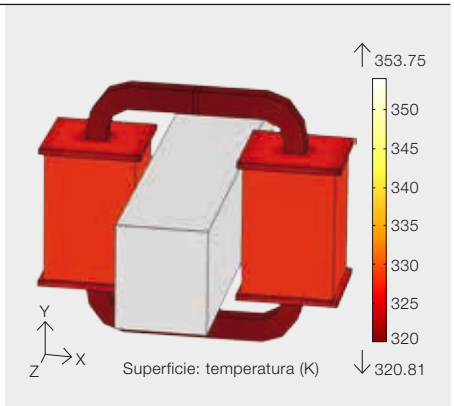


8b Distribución instantánea de la densidad del flujo magnético correspondiente (valor absoluto) en el plano central del núcleo del transformador

9 Distribución de temperaturas y señales de corriente



9a Corriente en el primario y normalizada en el secundario mostrando un acoplamiento imperfecto del transformador



9b Distribución de temperatura estacionaria resultante en la superficie de los sólidos

En ➔ 8 se presenta la distribución de densidades de corriente resultante en los conductores en un punto determinado del tiempo. El efecto pelicular es visible y puede observarse que una corriente inversa está circulando en el centro de la barra de bus. La correspondiente distribución asimétrica de densidad de flujo en el núcleo está influida tanto por la distribución de corriente como por los entrehierros.

En ➔ 9 se muestran las señales de corriente, que no concuerdan bien y que por tanto indican un acoplamiento imperfecto del transformador a causa de los entrehierros. Además, la distribución estacionaria de temperaturas muestra el efecto de las pérdidas por conducción eléctrica.

A medida que progrese la investigación, ABB y sus asociados académicos se centrarán en modelos mejorados de núcleo laminado para frecuencias más altas, calibración automática de las características magnéticas no lineales, incorporación de diferentes formas de devanados de las bobinas, modelizaciones SPICE mejoradas y validación de modelos experimentales.

Tecnología de transformación para clientes

Son esenciales las simulaciones de sistemas y multifísica para lograr un mayor conocimiento del comportamiento de los sensores. Dispositivos como los caudalímetros de Coriolis, que además de las pruebas de calidad física normales hayan pasado un conjunto de pruebas virtuales, cuidadosamente seleccionadas, ofrecen a los clientes un mayor valor gracias a su mayor precisión y solidez, así como a la utilización de materiales optimizados.

En 2009, ABB empezó a colaborar con la Universidad de Tecnología de Dresde para preparar técnicas de modelización de EF para sensores electromagnéticos.

Rolf Disselnkötter
Jörg Gebhardt
ABB Corporate Research, Sensors and Signal Processing
Ladenburg, Alemania
rolf.disselnkoetter@de.abb.com
joerg.gebhardt@de.abb.com

Rostyslav Tykhonyuk
ABB Automation Products GmbH
Göttingen, Alemania
rostyslav.tykhonyuk@de.abb.com

Holger Neubert
TU Dresden, IFTE
Dresde, Alemania
holger.neubert@tu-dresden.de

Referencias

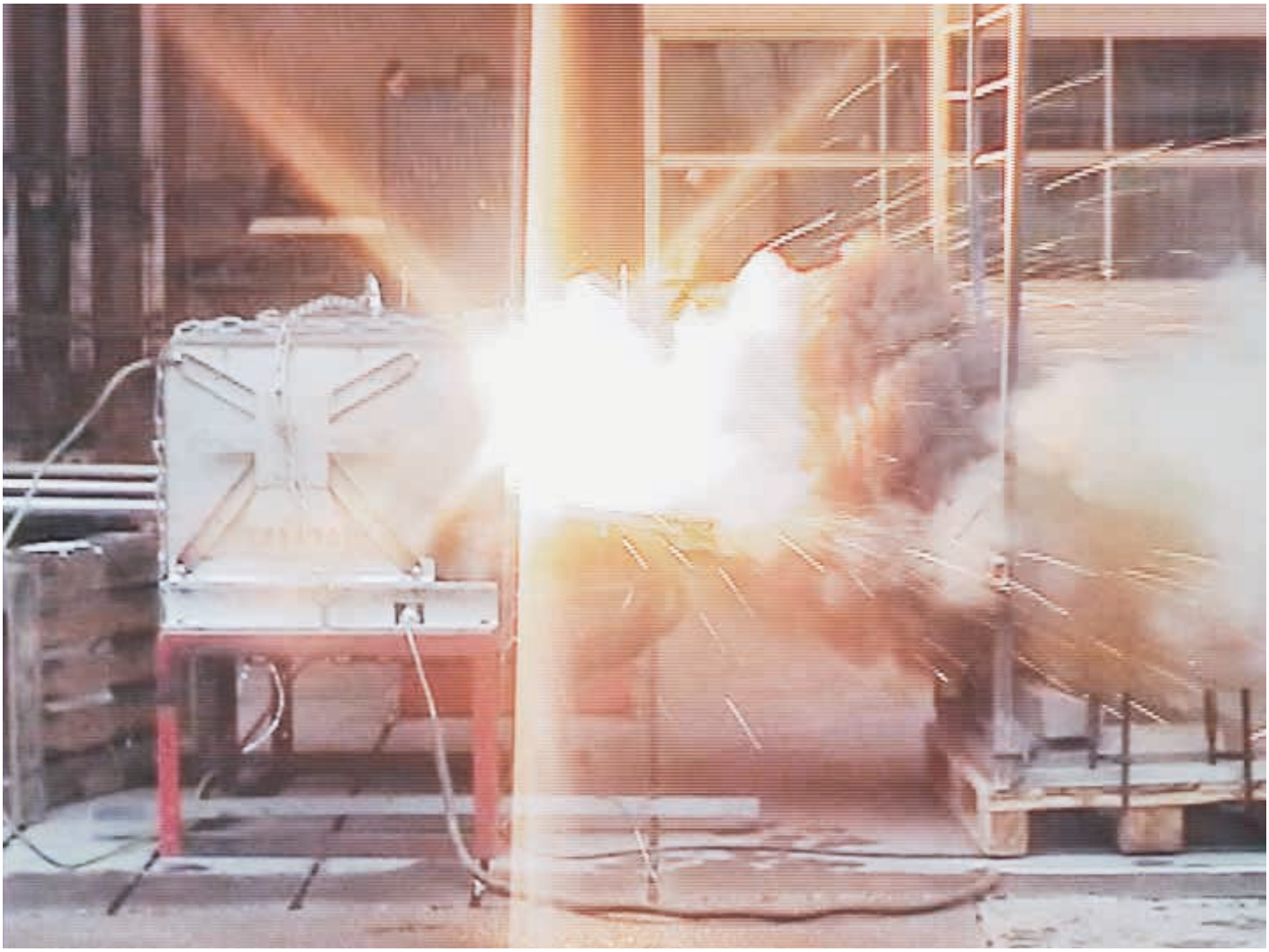
[1] J. Gebhardt and K. Konig, “Model-based development for an energy-autonomous temperature sensor,” en VDI/VDE Mechatronik 2013, Aquisgrán, Alemania, 2013, pp. 177–181.

[2] G. Juszkiewicz y J. Gebhardt, “Virtual drop impact investigation for a mechanical sensor element,” presentado en la Deutsche Simulia Konferenz, Bamberg, Alemania, 2011.

[3] J. Gebhardt, “Absolute and relative phases in twin-tube structures and performance criteria for Coriolis meters,” en Proceedings of the SIMU.IA Community Conference, Viena, 2013, pp. 421–432.

[4] H. Neubert, *et al.*, “Transient Electromagnetic-Thermal FE- Model of a SPICE-Coupled Transformer Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics 4.2,” en Proceedings of the 2011 COMSOL Conference, Stuttgart, Alemania, 2011.

[5] R. Disselnkötter, “Modeling of Inductive Components,” en “ABB Research Center Germany, Annual Report 2011,” Ladenburg, Alemania, pp. 31–35.

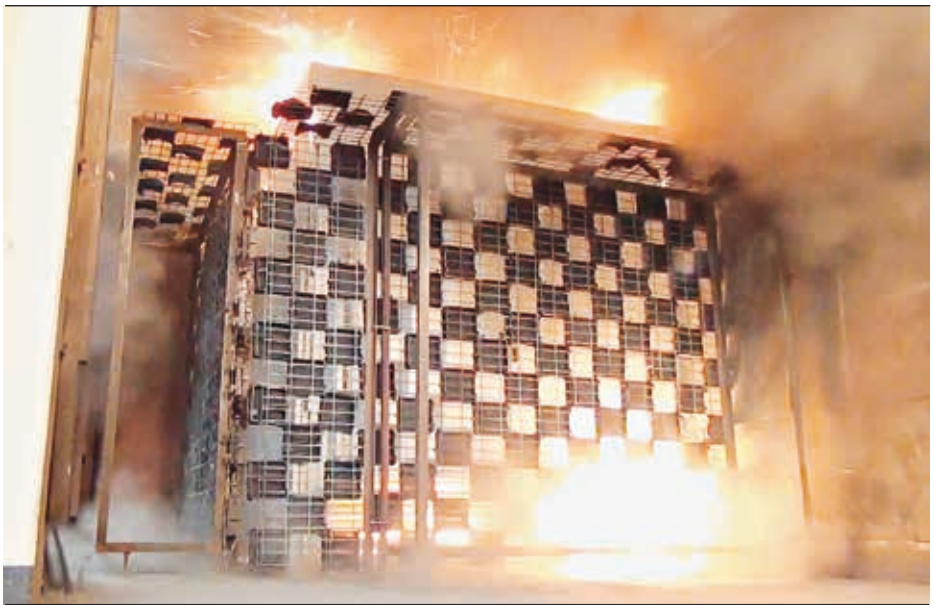


Sentir la presión

Simulación del aumento de la presión en salas de aparamenta

EDGAR DULLNI, PAWEL WOJCIK, TOMASZ BLESZYNSKI – Un fallo por arco interno es una descarga involuntaria de energía eléctrica en aparamenta. Durante el fallo, circulan corrientes de cortocircuito entre las fases y tierra. El arco calienta el gas que llena la caja de la aparamenta, sea SF_6 o aire, con el consiguiente aumento de la presión. Un fallo es un suceso muy raro, pero cuando se produce puede dañar muy gravemente los equipos eléctricos y el edificio e incluso puede causar lesiones a las personas. El aumento de la presión en un edificio solamente se puede evaluar mediante el cálculo. Sin embargo, los cálculos deben confirmarse mediante pruebas especiales que permitan medir el aumento de la presión exterior. ABB ha desarrollado un programa de cálculo de fácil utilización para los constructores de aparamenta y los ingenieros de construcción civil.

1 Arco interno en aparamenta durante un ensayo de arco de laboratorio



La presión aumenta los esfuerzos mecánicos en la caja de la aparamenta. Para evitar la rotura, se abre un dispositivo de alivio a una presión determinada. El arco causante del fallo produce gas caliente, que tiene que encaminarse al medio ambiente de forma controlada. Lo más usual es que los canales de escape estén situados en la parte superior de la aparamenta. Estos canales suelen disponer de una trampilla o un absorbedor en su extremo, donde el gas caliente se enfría antes de abandonar el canal.

Las normas, como la IEC 62271-200 [1], exigen que la aparamenta sea segura para el personal que la maneja, incluso si se produce un arco interno → 1. Las pruebas de tipo no sólo verifican que la caja de la aparamenta soporte la presión, sino también que se demuestre que los gases calientes no se dirigen hacia las personas. La IEC 61936-1 [2] exige que el diseño del edificio tenga en cuenta el aumento de presión debido a estos gases de escape. Las pruebas de fallo por arco en la aparamenta no cubren este aspecto, puesto que la sala de la instalación se simula mediante dos paredes perpendiculares y un techo, lo que no corresponde a una sala cerrada para el gas que permita medir la presión. Por lo tanto, el aumento de presión en un edificio solamente puede evaluarse mediante cálculo. Otra aplicación del programa de cálculo es simular el aumento de presión para distintos gases de llenado, por ejemplo, SF6 y aire. Para la validación, las pruebas fueron realizadas junto con RWTH Aachen y TÜV Nord Systems GmbH.

Imagen del título
Imagen extraída de un video de alta velocidad que muestra la salida controlada de gases calientes de una aparamenta de media tensión durante una prueba de arco interno. El software de ABB calcula la acumulación de presión observada dentro de la aparamenta y en la sala de instalación.

Ecuaciones del programa de cálculo

La presión del gas en un recinto cerrado depende de la temperatura del gas, de acuerdo con la ley de los gases perfectos. Las ecuaciones de conservación de la masa tienen en cuenta la salida de masa del recinto. Los compartimientos están representados por su volumen efectivo (descontando el de los componentes) y las áreas de alivio de presión entre ellos. Propiedades del gas tales como la capacidad calorífica específica son independientes de su temperatura y uniformes para todo el volumen [3].

Una parte (denominada coeficiente de transferencia térmica kp) de la energía del arco de fallo calienta el gas en el compartimiento donde se produce el arco.

$$Q_1 = k_p \cdot W_{el}$$

La energía del arco eléctrico se evalúa a partir de las intensidades medidas y de las tensiones entre fase y tierra:

$$W_{el} = (u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T)\, t$$

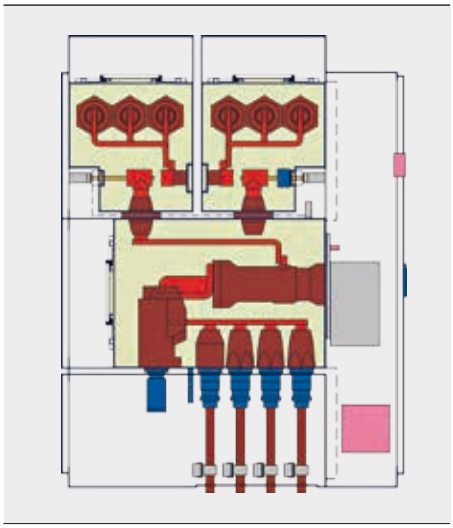
Las tensiones medidas no son necesariamente idénticas a la tensión del arco, porque un arco trifásico puede saltar entre dos conductores de fases, pero también a la caja puesta a tierra. La herramienta de cálculo de la presión importa de un fichero de datos formateado los valores medidos de las tensiones entre fase y tierra, o bien aplica una tensión empírica media entre fase y tierra.

Todas las cantidades que dependen de la variable tiempo en la herramienta Internal Arc Tool (IAT) se determinan antes y después de un cierto intervalo de tiempo Δt. La ecuación siguiente muestra la masa que sale del compartimiento del arco al de escape:

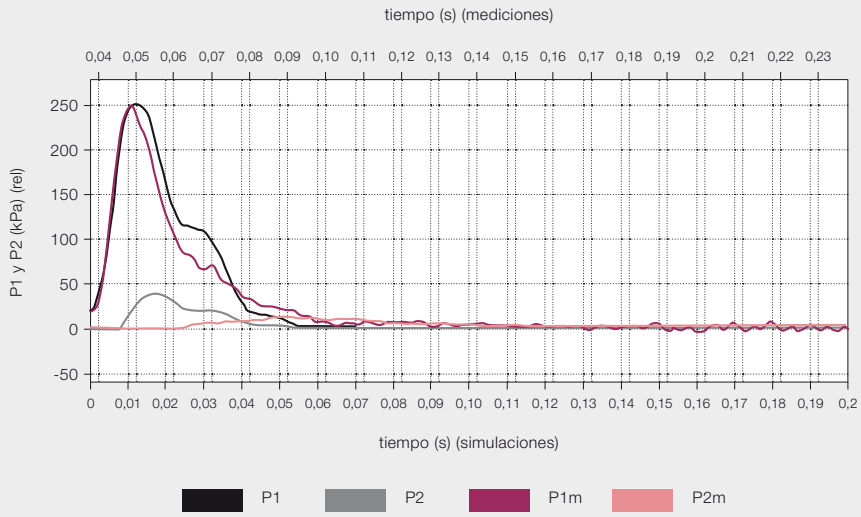
$$\Delta m_{12} = \alpha_{12} \cdot \rho_{12} \cdot w_{12} \cdot A_{12} \cdot \Delta t$$

α_{12} es la eficiencia del dispositivo de alivio de superficie A_{12} y considera la contracción del flujo de gas a través de una abertura de bordes agudos (0,7 a 1,0), pero también la reducción del flujo debida, por ejemplo, a una rejilla o un absorbedor. Cuando se abre el dispo-

2 Sección recta de la aparamenta ABB tipo ZX2 con arco iniciado en el compartimiento de la barra de bus y alivio de presión en el canal de la parte superior

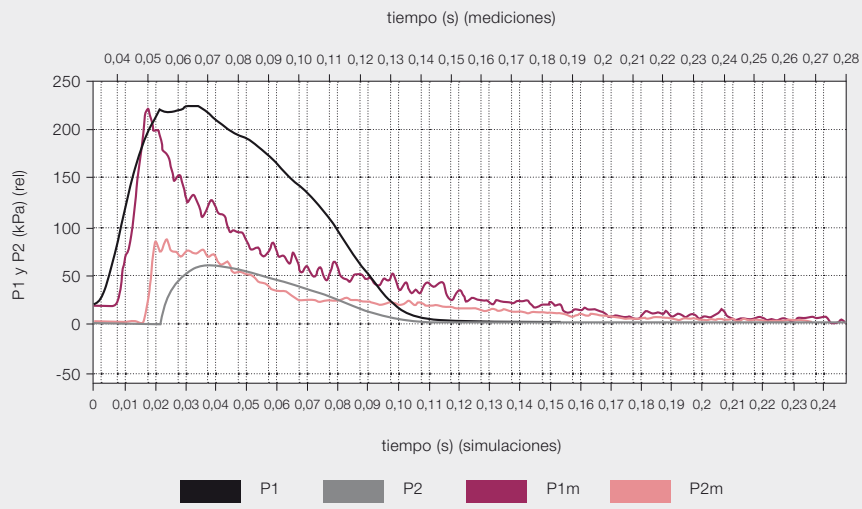


3 Comparación del desarrollo de presión medida y calculada para un arco interno en una ZX2 utilizando aire como gas de relleno (38 kA)



Las pruebas de tipo no sólo verifican que la caja de la aparamenta soporta la presión, sino que también demuestran que los gases calientes no se dirigen hacia las personas.

4 Comparación de la evolución de la presión medida y calculada para un arco interno en una ZX2 utilizando SF_6 como gas de relleno (35 kA)



sitivo de alivio, se escapa del volumen una masa Δm_{12} por cada paso de tiempo contemplado. $\rho 12$ y $w12$ representan la densidad y la velocidad del gas en la abertura de acuerdo con la ley de Bernoulli [3]. Este procedimiento matemático permite el cálculo del aumento de la presión en todos los volúmenes considerados.

La precisión del cálculo se ve limitada por las simplificaciones aplicadas. Debido a que se supone que la capacidad calorífica específica es constante, no se considera la disociación en fragmentos de las moléculas de gas. Esta disociación se inicia a 6.000 K en el aire y a 2.000 K en el SF_6. Sin embargo, se consigue un acuerdo con los resultados de las pruebas para temperaturas del gas más altas.

Si una cantidad de gas considerable sale de la caja de la aparamenta, cada vez quedan dentro menos moléculas de gas. Si la fracción calorífica k_p de la energía del arco permanece constante a lo largo del tiempo, se produciría una temperatura del gas cada vez mayor que superaría con mucho las temperaturas conocidas del arco de 20.000 K. Esto no es realista y genera asimismo inestabilidades numéricas. Para evitarlo, se considera kp como dependiente de la densidad [4]. Esta modificación permite la extensión del cálculo a mayores duraciones del fallo y el cálculo del aumento de presión en la sala de instalación.

Descripción de la herramienta

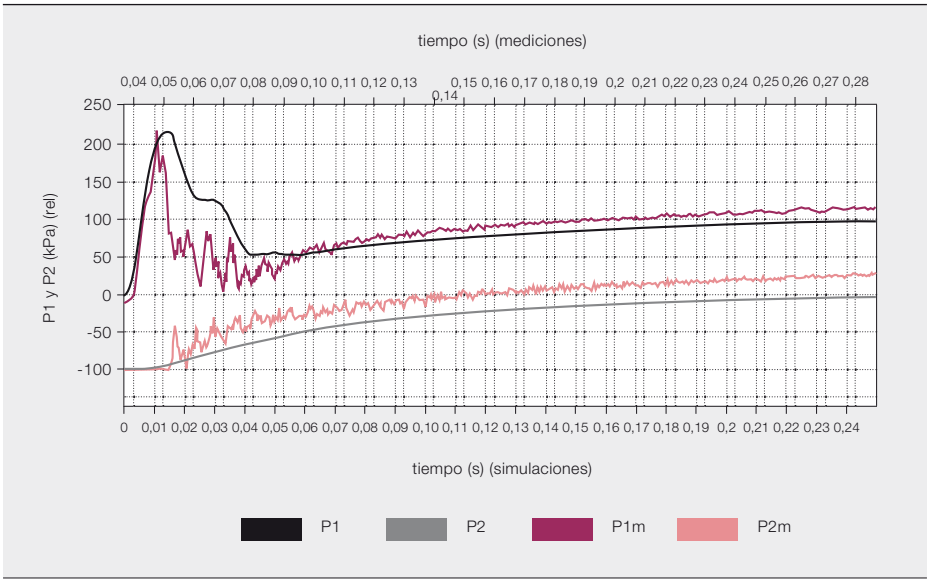
La metodología propuesta se incorporó con éxito en el software de simulación IAT en el Centro de Herramientas de Simulación de ABB (STC).[1] La herramienta consta de dos partes: la interfaz gráfica de usuario (GUI) y el solucionador. El solucionador se ha desarrollado en Python y la interfaz de usuario en Java. Las características principales que proporciona la GUI de la IAT son:

1) Fijar los parámetros del modelo
2) Ejecutar el solucionador
3) Presentar los resultados
4) Crear un informe

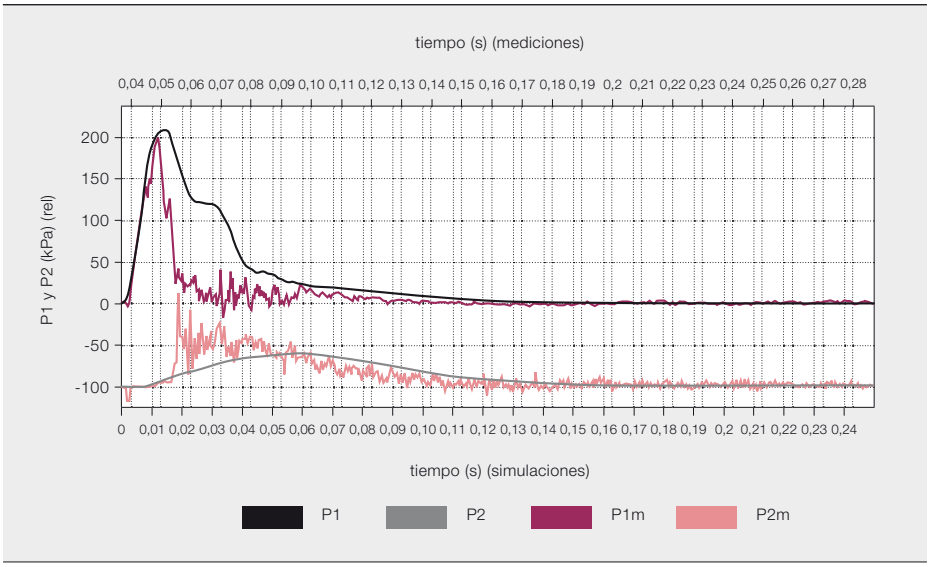
Nota a pie de página

1. Véase también ➔ 7 de la página 71.

5 Comparación de la evolución de la presión medida y calculada para un arco en una configuración de prueba que emplea un recipiente cerrado de 8 m³ (20 kA)



6 Evolución de la presión como en ➔ 5 con una abertura para alivio de 0,3 m² (20 kA)



Se pueden fijar directamente los parámetros del modelo o seleccionarlos en una lista desplegable y validar cada uno de ellos. Cuando el modelo está preparado, el usuario puede comenzar la simulación. Se le guía a lo largo de la configuración de la simulación mediante un sencillo asistente. El tiempo de simulación es de menos de 10 s para una duración máxima del arco de 1 s en un ordenador portátil. Los cálculos se realizan con un intervalo constante de tiempo para la simulación de 0,05 ms. Para comparar con pruebas realizadas se pueden importar datos de mediciones en un formato adecuado.

Se trazan gráficos de las siguientes características:

1) Presiones en función del tiempo
2) Intensidades de fase en función del tiempo
3) Tensiones entre fase y tierra en función del tiempo
4) Energía integrada del arco en función del tiempo

Las curvas se pueden modificar dinámicamente y no se precisa un editor adicional para su visualización. Se presentan ejemplos en ➔ 3–9.

Además se preparan ficheros de texto con los parámetros de la simulación (valores seleccionados de entrada y salida) y los datos del resultado.

El tiempo de simulación es de menos de 10 s para una duración máxima del arco de 1 s en un ordenador portátil.

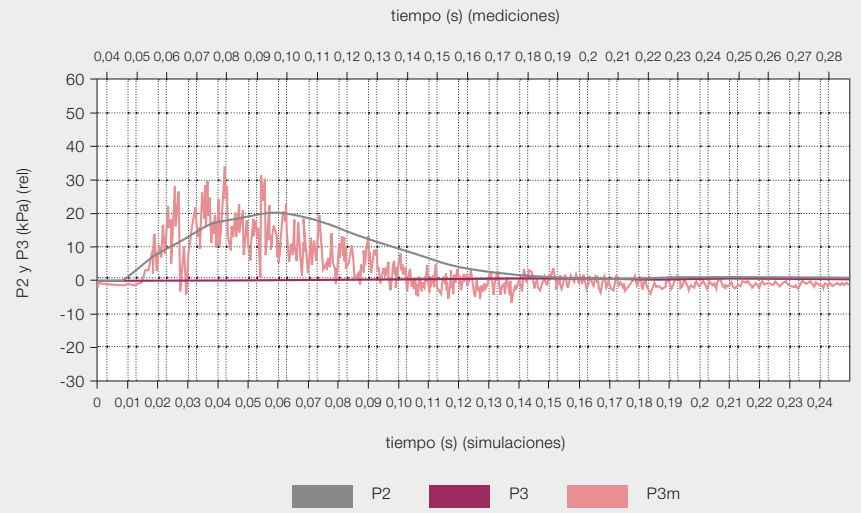
Comparación de los resultados

Se compararon los resultados de la IAT con los de pruebas obtenidas con aparamenta de ABB y experimentos especialmente diseñados.

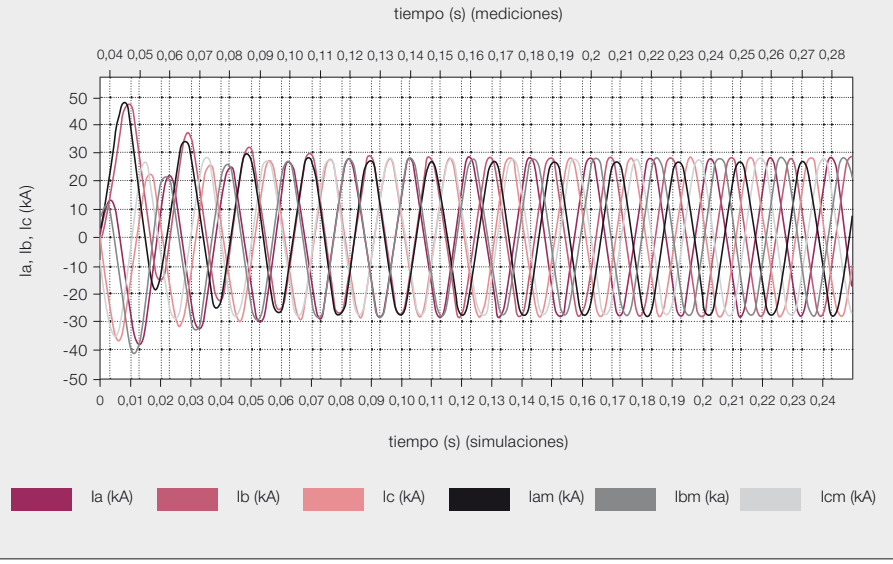
La primera comparación se refiere a aparamenta aislada en gas (GIS) en donde se pudo sustituir el gas aislante SF_6 por aire. En ➔ 2 se muestra la sección de la aparamenta ZX2 de ABB, donde se activó el arco en el compartimiento de la barra de bus. El dispositivo para alivio de la presión era un delgado disco de rotura con un área de 0,049 m² que se abría al canal en la parte superior a una sobrepresión de 220 kPa. La intensidad de la corriente de fallo tenía un valor de 39 kA y se aplicó

La salida de gas caliente y el consiguiente aumento de la presión en una instalación cerrada fueron investigados en un experimento especial.

7 Presión en el recipiente medida en otro punto distinto del de ➔ 6



8 Corrientes de fase medidas y aplicadas que demuestran la asimetría inicial



durante 1 s. Los oscilogramas muestran el desarrollo a lo largo del tiempo de la presión calculada en el compartimiento del arco (rojo en ➔ 2, morado en los oscilogramas) y en el canal de salida (azul en ➔ 2, rosa en los oscilogramas), y los datos medidos (negro para el primero, gris para el último) hasta 250 ms después de la ignición del arco.

En ➔ 3 concuerdan las medidas y el cálculo de la subida de presión, de su valor máximo y de su caída en el compartimiento del arco lleno con aire. Se toma k_p como 0,5 de acuerdo con los datos publicados, y la tensión del arco (entre fase y tierra) de 300 V se toma de la prueba. El cálculo de la presión en el canal de salida presenta una correlación menos satisfactoria con los resultados de las pruebas, debido a los efectos del tiempo de recorrido de los gases de salida, que no se puede incorporar en la IAT.

Para el gas de llenado SF_6 ➔ 4, la reproducción de la presión máxima vuelve a ser buena, pero la caída de presión tras la apertura del disco de alivio es menos satisfactoria. El cálculo proporciona un tiempo de permanencia del gas mayor de lo observado en la prueba.

Se toma 0,75 para k_p de acuerdo con las publicaciones, y la tensión del arco de 400 V conforme con las pruebas.

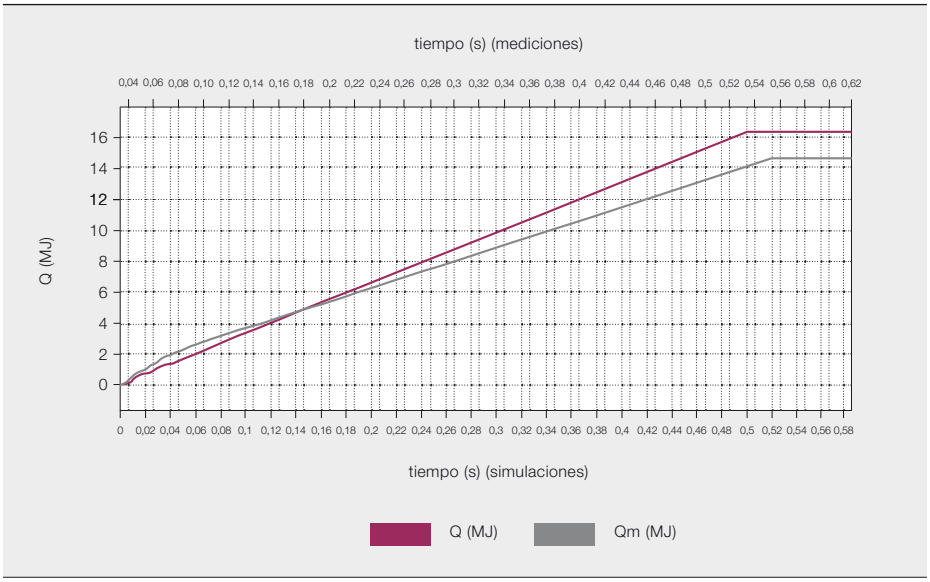
Muchas de las pruebas se han vuelto a calcular. La imprecisión en la presión máxima en el compartimiento del arco está en el margen del ±20 por ciento, determinada principalmente por la incertidumbre de la presión de respuesta del dispositivo de alivio. La caída de presión tras producirse el alivio se simula con un error de un factor de dos. Esto no importa para la evaluación de la presión que resiste la aparamenta, puesto que es la presión máxima la que es decisiva.

La presión máxima en los canales de salida se puede calcular también. Sin embargo, la imprecisión puede ser hasta de ±40 por ciento, lo que procede de los efectos de las ondas de presión en canales alargados.

La salida de gas caliente y el consiguiente aumento de la presión en una instalación cerrada fueron investigados en un experimento especial [4]. La sala de la instalación se simuló con un contenedor hermético de 8 m^3.

➔ 5 muestra las presiones determinadas en las pruebas y en los cálculos. La caída de presión en el compartimiento del arco, tras la respuesta del dispositivo de alivio, se desvía del valor medido, pero la saturación de la subida de presión en el contenedor se simuló satisfactoriamente. Esto se debe a la disminución del valor k_p incorporado en la IAT, dependiente de la densidad decreciente del gas en el compartimiento cerrado de la aparamenta. Si

9 Energía del arco determinada por la multiplicación de las tensiones entre fase y masa y las intensidades (amarillo para IAT; gris para las mediciones)



la energía del arco calentara uniformemente a lo largo del tiempo todo el volumen del contenedor, como para un arco que salta libremente, la presión ascendería linealmente hasta 345 kPa en vez de los valores medidos, 154, y los calculados, 114 kPa.

La herramienta de cálculo incorpora la dependencia de la densidad de k_p de acuerdo con la fórmula siguiente aplicada para $\rho(t) < \rho c$:

$$k_p(t) = k_p \cdot c_0 \cdot (\rho(t)/\rho_0)^{0.5}$$

c_0 se ha adaptado para que proporcione una transición continua desde el k_p·inicial. ρ_c es del 1 por ciento de la densidad normal del gas a 100 kPa para el aire y del 20 por ciento para SF_6. Los resultados correspondientes se obtuvieron a partir de las pruebas empleando SF_6 y aire en una configuración similar [4].

La herramienta puede también calcular el aumento de presión en salas de instalación con las aberturas de alivio que aportan por ejemplo ventanas o trampillas. ➔ 6 presenta un resultado de pruebas realizadas empleando el mismo contenedor de 8 m^3 con un área de alivio de 0,3 m^2. La geometría real de la sala de instalación y la posición de la abertura de alivio y los sensores no puede recogerse en la IAT y causarán desviaciones con respecto a la situación real. Un ejemplo es la mayor presión inicial en ➔ 6 a causa de la corriente directa de gas sobre el sensor. Otro sensor colocado aparte muestra un mejor concordancia con el cálculo ➔ 7. Solamente la dinámica de fluidos computacional (CFD) puede proporcionar mejores resultados.

Presión estimada

Dentro de límites razonables, ambas presiones máximas en los compartimientos de la aparamenta y los volúmenes de escape concuerdan en los resultados de las pruebas y las simulaciones. Las imprecisiones son causadas por las simplificaciones incorporadas a la herramienta (por ejemplo, suposición de gases perfectos y función genérica de salida). Se puede utilizar la IAT para la simulación de los efectos en la presión de los arcos de fallo en las aparamentas. La incertidumbre en la predicción de la presión máxima se encuentra en el margen del ± 20 por ciento por lo que se refiere al compartimiento del arco. Es preciso determinar una tensión fiable para el arco a partir de pruebas sobre aparamenta similar. La herramienta se puede utilizar también para estimar el aumento de presión en un volumen de escape o en una sala de instalación, con o sin aberturas de alivio, teniendo en cuenta los márgenes de seguridad adecuados. La herramienta de simulación de arcos internos es un elemento útil para mejorar las eficiencias de diseño y aumentar la seguridad, especialmente cuando es imposible o no es práctico llevar a cabo ensayos reales.

La herramienta de simulación de arcos internos es un elemento útil para mejorar las eficiencias de diseño y aumentar la seguridad, especialmente cuando es imposible o no es práctico llevar a cabo ensayos reales.

Edgar Dullni
ABB Power Products
Ratingen, Alemania
edgar.dullni@de.abb.com

Pawel Wojcik
Tomasz Bleszynski
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
pawel.wojcik@pl.abb.com
tomasz.bleszynski@pl.abb.com

Referencias

[1] High-voltage switchgear and control gear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and control gear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV, IEC 62271-200, 2011.
[2] Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules, IEC 61936-1, 2010.
[3] WG A3.24, "Tools for the Simulation of Effects Due to Internal Arc in MV and HV Switchgear,", CIGRE Technical Brochure, a publicar en 2013
[4] E. Dullni *et al.*, "Pressure rise in a switchroom due to internal arc in a switchboard," Proceedings del 6th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, pp. 4.5.1 – 4.5.7, 1994.
[5] SOLVAY GmbH, "Schwefelhexafluorid," folleto de la empresa.

ABB
30 74 55 51 021
OP20 0215

Diseño de robots

La realización de prototipos y la puesta en servicio virtuales potencian el desarrollo de robots manipuladores y sistemas de automatización

RAMON CASANELLES, XIAOLONG FENG, THOMAS REISINGER, DIEGO VILACOBA, DANIEL WÄPPLING, PETER WEBER –
El diseño de productos y aplicaciones industriales sigue siendo un arte en el que los equipos de ingenieros aportan sus conocimientos, experiencia y creatividad para crear algo nuevo. Lo que ha cambiado es la forma en que se evalúan y valoran las soluciones o los enfoques con el fin de tener la certeza de que darán lugar a un producto mejor. En lugar del método sencillo de ensayo y error utilizado en el pasado, ABB emplea sofisticados métodos de construcción de prototipos y puesta en marcha virtuales para desarrollar robots manipuladores y sistemas de automatización que hacen frente a los crecientes requisitos de rendimiento. La realización virtual de prototipos facilita la fase de diseño del producto y mejora también la ingeniería de detalle y las pruebas de funciones de un sistema. En cuanto a las pruebas de las aplicaciones, la puesta en servicio virtual se utiliza para verificar la funcionalidad de un sistema de automatización antes de la puesta en servicio real. RobotStudio de ABB reduce el período de puesta en servicio con una herramienta de puesta en servicio virtual que permite realizar simulaciones realistas del sistema.

Imagen del título
En los robots, como este ABB IRB 7600FX del taller de prensas de VOLVO en Olofström, Suecia, se emplea la simulación para satisfacer requisitos cada vez más exigentes y complejos.

Los robots manipuladores se enfrentan a requisitos cada vez más exigentes y complejos, al igual que los sistemas de automatización que los emplean. Actualmente, se espera que los fabricantes de equipos y los integradores de sistemas entreguen y pongan en marcha sistemas que sean productivos en un período más corto, con mejoras en la calidad, el rendimiento y el coste.

ABB es capaz de hacer frente a este reto por dos motivos. Los ingenieros de ABB adoptan un enfoque mecatrónico que aborda la ingeniería mecánica, eléctrica e informática de forma simultánea. Por otra parte, utilizan la última tecnología de simulación disponible, que incluye simulaciones dinámicas, CAD en 3-D, análisis de elementos finitos, diseño probabilístico y optimización.

Diseño virtual – desarrollo de productos

Un robot industrial es un sistema mecatrónico con una estructura mecánica, que normalmente se conoce como robot manipulador, y un controlador. Un robot manipulador consta de enlaces estructurales, cajas reductoras, servomotores y frenos. En función del programa de la aplicación específica, el robot industrial realiza su trayectoria de movimientos y cumple la tarea en un sistema de automatización. El controlador del robot consta de un controlador principal de planificación de la trayectoria y de accionamientos servo que controlan los motores eléctricos.

El diseño de un robot manipulador industrial es un proceso de ingeniería complejo. Las etapas principales de este proceso iterativo son:

- Diseño de la cinemática: determinación del número de articulaciones, longitudes de brazos y configuración.
- Diseño de la dinámica del cuerpo rígido: diseño de la estructura, así como de los motores, frenos y engranajes asociados (incluidos los parámetros de configuración del control de movimientos) que deberán satisfacer los requisitos de tiempo de ciclo y vida útil.
- Diseño térmico: evaluación de la temperatura del bobinado y el eje del motor basada en criterios de diseño térmico.
- Diseño de rigidez: evaluación del rendimiento del control del robot basada en un análisis de la propia frecuencia o un análisis de precisión de la trayectoria.

La construcción virtual de prototipos se utiliza para evaluar con precisión el diseño del robot manipulador teniendo en cuenta múltiples parámetros al mismo tiempo. Estas simulaciones se utilizan para determinar todas las especificaciones exactas en el diseño del robot, como el peso, la velocidad, la aceleración y la precisión del robot.

Por ejemplo, para optimizar el tiempo de ciclo de un robot de alimentación de prensas que cargue y descargue troqueles en un taller de prensas, el reto reside en determinar las especificaciones correctas de las cajas reductoras y en seleccionar los parámetros de control del tren de accionamiento que reduzcan al mínimo el tiempo del ciclo y el par de la caja reductora. Con la construcción virtual de prototipos, los ingenieros adoptan un enfoque de optimización multiobjetivo para analizar la mejor solución de compromiso entre el rendimiento del tiempo de ciclo del robot y el par de la caja reductora. La construcción virtual de prototipos permite que los ingenieros ejecuten miles de pruebas para determinar la

1 Twin Robot Xbar de alto rendimiento: TRX para automatización de prensas

mejor solución de compromiso entre el rendimiento máximo y el par mínimo.

Mediante estas técnicas, ABB ha desarrollado una solución de robot doble que se utiliza en aplicaciones innovadoras de automatización de prensas conocida como Twin Robot Xbar – TRX[1] → 1. El compromiso entre el rendimiento de la alimentación de prensas y el par nominal total de las cajas reductoras se obtuvo gracias a la optimización multiobjetivo → 2. Esta solución proporciona datos cuantitativos sobre el impacto del rendimiento del robot en el diseño y el coste del tren de accionamiento. Por ejemplo, el examen de dos puntos de diseño extremos en el frente de Pareto revela que se conseguirá un aumento del 5% en el rendimiento de alimentación de las prensas incrementando el coste del tren de accionamiento un 7%.

Ingeniería de sistemas

Una vez que se consigue un buen diseño de robot industrial, el siguiente paso es encajarlo satisfactoriamente en un sistema de automatización. Junto con otros dispositivos, como controladores lógicos programables (PLC), servomotores y unidades, además del equipo mecánico y el software necesarios, el robot pasa a formar parte de un sistema de automatización discreto.

La construcción virtual de prototipos [1], [2] mejora también de forma significativa la ingeniería de detalle y las pruebas de funciones de un sistema. Antes de que se pueda iniciar el trabajo detallado en el sistema de automatización, hay que crear un diseño conceptual. A continuación, los grupos de ingeniería mecánica, eléctrica y de software se suman al proceso. Una disposición tridimensional creada por los ingenieros mecánicos se convierte en un prototipo virtual para los ingenieros del robot. Utilizando RobotStudio, la herramienta de programación y simulación offline de ABB para aplicaciones robóticas, los ingenieros pueden ubicar robots virtuales en el modelo, enseñar al robot los objetivos y trayectorias y comprobar el alcance del robot. La programación y la depuración de las aplicaciones robóticas se pueden realizar en el mismo entorno y aplicar de inmediato en el prototipo virtual utilizando controladores robóticos virtuales, lo que permite unos ciclos de desarrollo y verificación más cortos. En el caso de que sea necesaria una remodelación, identificada, por ejemplo, en el análisis del alcance, las modificaciones necesarias se pueden comunicar fácilmente a los ingenieros mecánicos.

La utilización de prototipos virtuales en la fase de ingeniería detallada no tiene por qué limitarse a las aplicaciones robóticas. Las simulaciones se pueden expandir a una gama de aplicaciones mucho más amplia, como por ejemplo al desarrollo de aplicaciones complejas de PLC o movimientos, con importantes ventajas en el desarrollo y las pruebas.

Puesta en servicio virtual

La puesta en servicio virtual es un método de simulación destinado a verificar la funcionalidad de un sistema de automatización antes de que se inicie su puesta en servicio real. El proceso consiste en reproducir el comportamiento del hardware en un entorno de software, lo que permite una transición perfecta del entorno virtual al físico.

Durante las pruebas y la implementación se utilizan métodos de puesta en servicio virtual, como hardware-in-the-loop (H-I-L) y software-in-the-loop (S-I-L), para la integración y las pruebas del sistema hasta la prueba de aceptación final.

Dependiendo de la fase que se esté sometiendo a prueba, la arquitectura de puesta en servicio virtual aplicada se adapta a la etapa de ingeniería apropiada del proceso. En las etapas de prueba iniciales se utiliza un enfoque S-I-L, mientras que en las últimas fases un enfoque H-I-L es más adecuado. S-I-L implica la utilización de controladores virtuales. H-I-L significa que los controles reales que ejecutan la aplicación de automatización que se pretende verificar se incluyen en el entorno de prueba. Un controlador virtual emula exactamente el comportamiento de un controlador real, pero se ejecuta en un ordenador corriente.

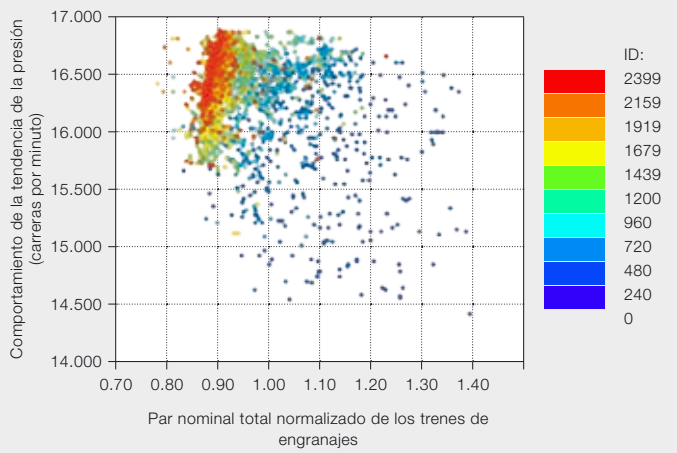
> Un controlador virtual emula exactamente el comportamiento de un controlador real, pero se ejecuta en un ordenador corriente.

Actualmente, H-I-L es el escenario de pruebas predominante, que conecta un PLC específico mediante un bus de campo a un ordenador que ejecuta un modelo de simulación del sistema. Esta arquitectura permite una ejecución en tiempo real de las aplicaciones de control. La complejidad de los sistemas actuales requiere por lo general que varios controladores interconectados de diferentes tipos realicen las tareas de automatización. Por lo tanto, la simulación de las partes mayores o un sistema completo requiere una

Nota a pie de página

1. El robot TRX consta de dos (4 ejes) manipuladores interconectados con un travesaño

2 Diseño interno de Twin Robot Xbar – Robots TRX creados con una optimización multiobjetivo del tren de accionamiento



3 Taller de prensas virtual creado con RobotStudio de ABB

4 Vista del modelo de taller de prensas virtual

infraestructura de hardware que solo está disponible en las últimas fases de un proyecto.

Con el fin de facilitar unas pruebas eficientes en las fases iniciales del proyecto, idealmente, al mismo tiempo que se desarrollan las aplicaciones, es importante disponer de una manera fácil de cargar y enviar los programas al entorno de pruebas virtual que se ejecuta en el mismo ordenador donde se desarrollan las aplicaciones. La capacidad de detectar los problemas tan pronto como sea posible y solucionarlos con un esfuerzo moderado está adquiriendo cada vez más importancia, especialmente debido a que el componente de software de un sistema de automatización ha aumentado drásticamente con el paso del tiempo y sigue aumentando.

> El proceso permite una transición perfecta del entorno virtual al físico.

Para simular el sistema o equipo físico/objetivo, se necesita un modelo virtual del sistema; los sensores y actuadores se deben modelar. RobotStudio de ABB dispone de componentes inteligentes que imitan el comportamiento de los sensores y actuadores reales, y facilitan una interfaz de señales del proceso para conectarlos con los controladores reales o virtuales, permitiendo de esta manera la simulación completa de un sistema. Se pueden utilizar componentes inteligentes para integrar de forma flexible la funcionalidad de distintos componentes de automatización en el entorno de puesta en servicio virtual.

Líneas de prensas en tándem

La automatización del taller de prensas de automoción ilustra el valor de la tecnología de puesta en marcha virtual. El tamaño y la potencia de las prensas que forman la línea de prensas imposibilitan la realización de pruebas reales del sistema en la planta de pruebas. Pero con la puesta en servicio virtual se pueden realizar pruebas del sistema de una manera perfecta y eficaz.

Una línea de prensas en tándem fabrica planchas conformadas que, posteriormente, se soldarán para formar la carrocería de un coche. Está formada por varias prensas alineadas que recorren las planchas para convertirse en planchas conformadas. La primera prensa (prensa de salida) realiza el conformado y las otras cortan los contornos interiores y exteriores.

Debido al elevado coste de una línea de prensas en tándem en el sistema de automatización completo, es fundamental conseguir la máxima productividad para optimizar el retorno de la inversión de este tipo de equipos. Para lograr la mejor tasa de productividad, la automatización de la transferencia de las planchas entre las diferentes prensas requiere una coordinación óptima entre los robots y las prensas.

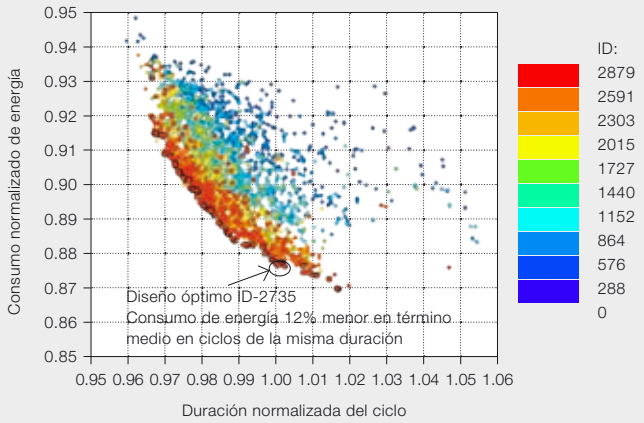
Para desarrollar el modelo de simulación, todos los elementos/dispositivos que constituyen el sistema se introducen en el RobotStudio de ABB → 3. Mediante componentes inteligentes se simulan los dispositivos, incluidas todas las propiedades lógicas, cinemáticas y dinámicas que permitirán que el modelo se comporte exactamente como se comportaría en un taller real. Los siguientes dispositivos son los que suelen simularse habitualmente:

- Las prensas con dimensiones, control, señales de E/S, curvas de movimientos
- Los robots y otros dispositivos de automatización
- Otros elementos mecánicos como mesas de desapilamiento, lavador de chapas, cintas transportadoras y elementos de seguridad

Estos componentes se pueden adquirir en bibliotecas, si existen, o añadir de otras fuentes o incluso crear de acuerdo con las especificaciones del cliente.

Una vez configurado virtualmente, el entorno está preparado para realizar simulaciones del sistema realistas. Es posible simular diferentes escenarios

5 Eficiencia energética



Un diseño que tenga eficiencia energética es un requisito que gana importancia rápidamente y que se puede evaluar utilizando prototipos virtuales. El objetivo es seleccionar los parámetros de control del tren de accionamiento, por ejemplo, los pares y la velocidad admisibles, que van a minimizar el consumo de energía al tiempo que minimizan la duración del ciclo [3]. El problema se formula como un problema de optimización multiobjetivo con los parámetros de control del tren de accionamiento como variables de diseño y los dos siguientes objetivos contradictorios:

– Minimizar el consumo de energía
– Minimizar la duración del ciclo

En este análisis se utiliza el método frontal de Pareto para la optimización multiobjetivo. Durante la optimización frontal de Pareto se minimizan dos funciones objetivo distintas (duración del ciclo y consumo de energía). Se obtiene un conjunto de soluciones, óptimos de Pareto, que exploran la relación de compromisos entre los dos objetivos en conflicto. El algoritmo de optimización MOGA-II [4] incorpora métodos sin gradiente especialmente adecuados para este tipo de problema y se utiliza para diseños eficientes energéticamente.

La propia optimización es un proceso iterativo. Se modifican las variables del diseño, en este caso los parámetros de control del tren de accionamiento, y se ejecuta el software de simulación del movimiento del robot de ABB utilizando el nuevo conjunto de variables para calcular el consumo de energía. Se utilizan los resultados de la simulación para calcular ambas funciones objetivo y los valores de las restricciones. Este bucle de optimización finaliza cuando se alcanza el límite del número máximo de evaluaciones de funciones definido para la optimización MOGA.

Por otro lado, el optimizador analiza la función objetivo y los valores de las restricciones y propone un nuevo juego de prueba de valores de las variables de diseño. El bucle de optimización continúa hasta que se cumple el criterio de convergencia.

La ilustración anterior presenta el espacio de soluciones y la frontera de Pareto de una optimización multiobjetivo de ese tipo mostrando la relación de compromisos entre los resultados para la duración del ciclo y el consumo de energía. El diseño seleccionado a partir de la frontera de Pareto óptima muestra cerca de un 10 por ciento de mejora del consumo de energía sin escarificación del comportamiento del robot industrial sometido a optimización.

que correspondan a casos de producción reales. En ➔ 4 se muestra una vista detallada del modelo de taller de prensa virtual con la trayectoria de movimientos programados del robot resaltada. La optimización del rendimiento de la línea puede requerir una reprogramación de los robots, el movimiento y la lógica de la prensa, o adaptaciones de parámetros previamente generados. El conocimiento del rendimiento antes de la instalación real es extremadamente valioso teniendo en cuenta el elevado riesgo en términos de costes que supondría no obtener el rendimiento esperado en el sistema real.

El uso de las simulaciones virtuales no se limita al diseño y la puesta en marcha ➔ 5: La introducción de nuevos procesos de producción se puede preparar con mayor facilidad y se puede analizar el diagnóstico de posibles fallos o mejoras productivas antes de su implementación en el sistema real.

Los prototipos virtuales desarrollados durante el proceso de diseño del producto y la ingeniería del sistema de automatización se pueden también utilizar para respaldar el mantenimiento predictivo, identificar los componentes que se deben intercambiar y, en algunos casos, optimizar los programas del robot con respecto al desgaste, el ciclo de tiempo o el consumo de energía.

Además, los prototipos virtuales se pueden ejecutar en paralelo con el sistema de automatización real con el fin de probar los equipos o programas optimizados virtualmente antes de que se implementen en el sistema real.

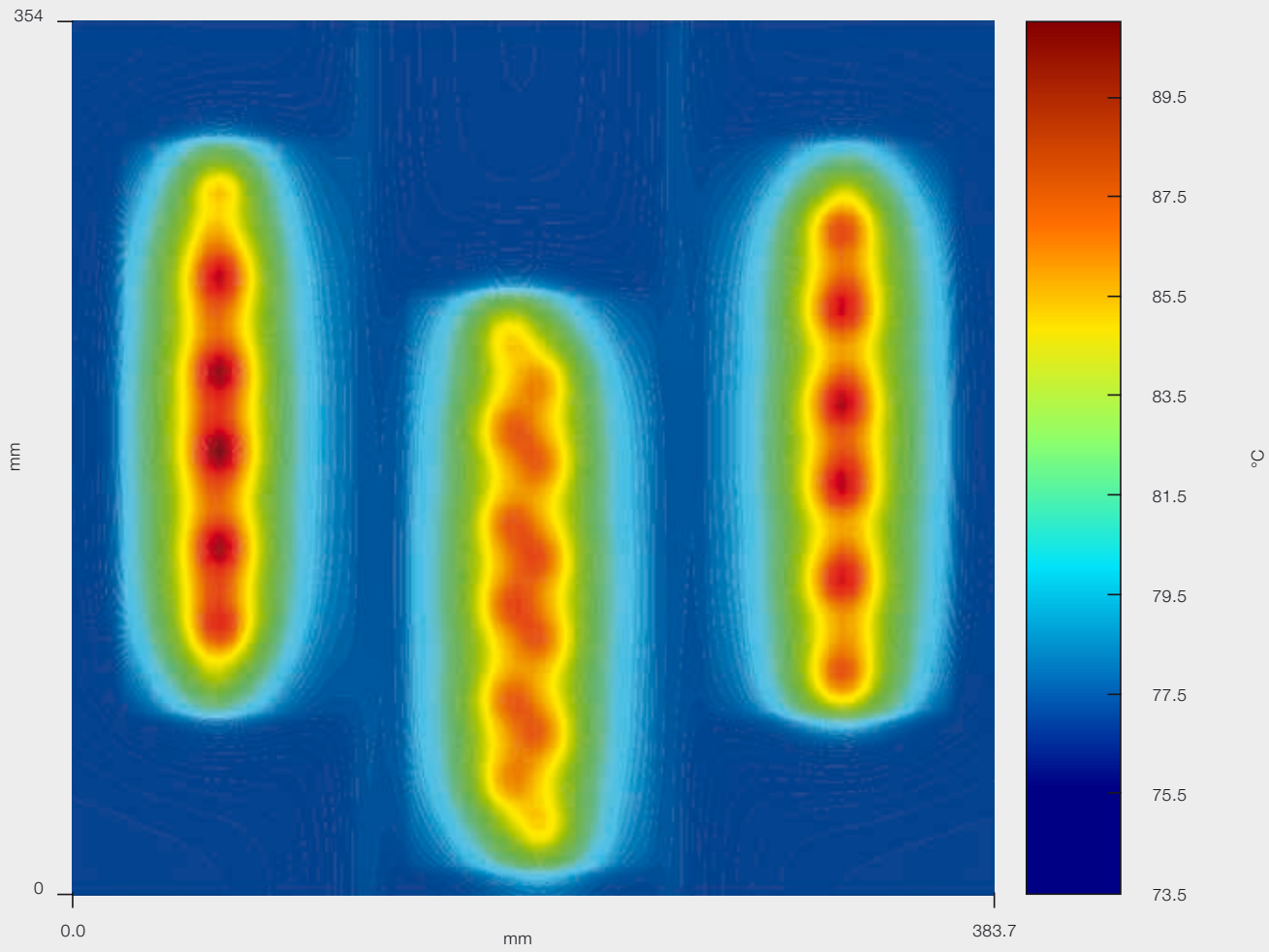
Diego Vilacoba
Ramon Casanelles
ABB Discrete Automation and Motion, Robotics
Barcelona, España
diego.vilacoba@es.abb.com
ramon.casanelles@es.abb.com

Xiaolong Feng
Daniel Wäppling
ABB Corporate Research, Mechatronics
Västerås, Suecia
xiaolong.feng@se.abb.com
daniel.x.wappling@se.abb.com

Peter Weber
Thomas Reisinger
ABB Corporate Research, Mechatronics
Ladenburg, Alemaniay
peter.weber@ch.abb.com
thomas.reisinger@de.abb.com

Referencias

[1] V. Miegel, C. Winterhalter, “Comprehensive Use of Simulation Techniques to Support New Innovative Robot Applications.” Simposio internacional de robótica, Múnich, Alemania, 2006.
[2] P.R. Moorea, *et al.*, “Virtual Engineering: An Integrated Approach to Agile Manufacturing Machinery Design and Control.” Mechatronics, vol. 13, nº 10, págs. 1105–1121(17), diciembre de 2003.
[3] X. Feng, *et al.*, “Energy Efficient Design of Industrial Robots Using Multi-Objective Optimization.” 43º Simposio internacional de robótica (ISR2012), Taipéi, Taiwán, 2012.
[4] A. Konak, *et al.*, “Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithms: A Tutorial.” Reliability Engineering and System Safety, vol. 91, págs. 992–1007, 2006.



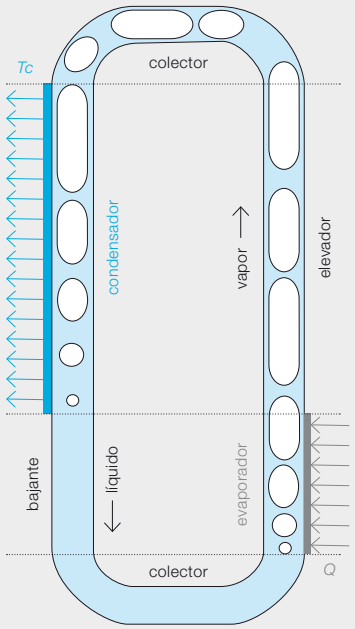
Ingenio integrado

Nuevos algoritmos de simulación para el diseño rentable de convertidores de frecuencia para electrónica de potencia altamente integrados y fiables

DIDIER COTTET, BRUNO AGOSTINI, STANISLAV SKIBIN, GERNOT RIEDEL, PAWEL WOJCIK – Muchos lectores pueden pensar que la ingeniería de la electrónica de potencia trata principalmente sobre topologías de circuitos y algoritmos. Si bien esos aspectos continúan siendo vitales, los proyectistas están enfrentándose cada vez más con dificultades en otras áreas. La importancia creciente de la integración ha elevado el perfil de dominios tales como refrigeración, interconexión y aislamiento de tensiones y está provocando mejoras en la densidad de potencia, la compatibilidad electromagnética (EMC) y la fiabilidad. Con la creciente complejidad de estas tecnologías, ya no es posible obtener diseños óptimos sin acudir a las simulaciones más avanzadas.

Los dispositivos semiconductores recientes permiten una conmutación más rápida con menores pérdidas y trabajan a mayores temperaturas, pero plantean nuevas dificultades de integración.

1 Principio del termosifón de dos fases



$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(\Delta V)}$$

La electrónica de potencia es una de las tecnologías que permiten cosas como la generación de energías renovables, la utilización eficiente de la electricidad en la automatización industrial, el control de la circulación de la electricidad por redes inteligentes y el transporte y la distribución de la electricidad con pocas pérdidas empleando tecnologías de CC. Las mediciones relevantes del comportamiento de los convertidores en estas aplicaciones son la eficiencia de la conversión, la dinámica del control, la fiabilidad (o disponibilidad), la densidad de potencia y el coste.

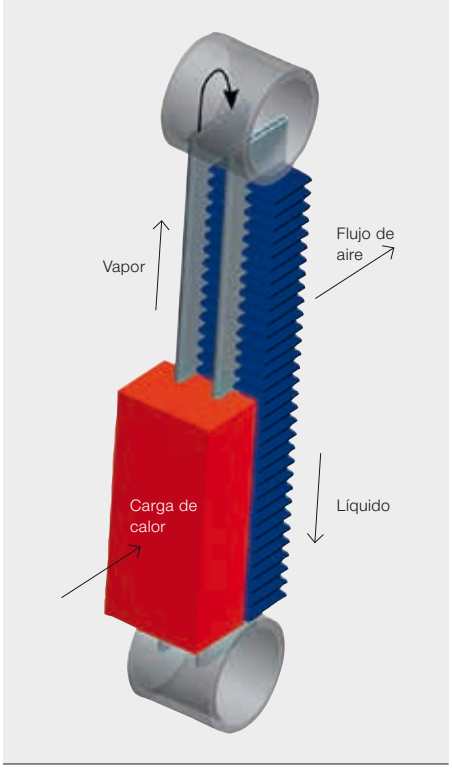
Aspectos diferenciadores para el diseño de convertidores se encuentran en la elección de tecnologías de integración, por ejemplo, los materiales para las carcasas, los métodos de refrigeración, las interconexiones y el aislamiento eléctrico. Las dificultades de diseño en la integración son:
- Pérdidas térmicas
- Conducción de altas intensidades
- Aislamiento de altas tensiones
- Ruido electromagnético
- Esfuerzos electro-termo-mecánicos

Las simulaciones son ahora un componente avanzado de los procesos de desarrollo en estos dominios. El análisis de elementos finitos (FEA) tridimensional (3-D) de los semiconductores de potencia ayuda a optimizar los procesos de fabricación y las características de conmutación. A nivel de sistema, se simulan los esquemas de control de intensidades y los algoritmos de control de procesos utilizando simuladores de circuitos, combinados frecuentemente con métodos de optimización multiobjetivo.

Los últimos años han visto avances importantes en el dominio de la banda prohibida ancha (WBG), los semiconductores de potencia, que han incorporado al mercado dispositivos de carburo de silicio (SiC) inicialmente y de nitruro de galio (GaN) después. Estos nuevos dispositivos permiten una conmutación más rápida con menores pérdidas y un funcionamiento a mayores temperaturas. Esto tiene muchas ventajas en términos de eficiencia energética, densidad de potencia y nuevas aplicaciones, pero también plantea nuevas dificultades de integración. Este artículo examina tres áreas de integración donde se tienen que desarrollar nuevas metodologías de simulación:
- Refrigeración en dos fases para una alta densidad de potencia y una gran fiabilidad
- Diseño con compatibilidad electromagnética (EMC)
- Simulaciones electrotérmicas para fiabilidad y predicción a lo largo de la vida útil

Imagen del título
Resultado de la simulación de la distribución de temperaturas en una placa base COTHEX

2 Principio de la tecnología COTHEX



3 Familia COTHEX (base-aire y aire-aire)

Los diseños compactos adoptados para conseguir altas densidades de potencia aumentan asimismo el acoplamiento electromagnético entre las distintas piezas del equipo.

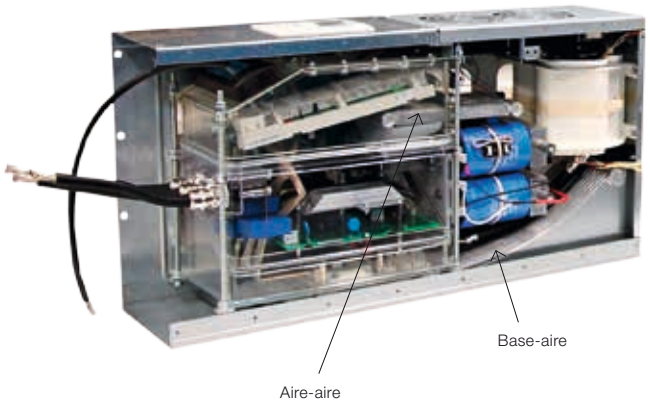
Refrigeración

En la electrónica se suelen utilizar para la refrigeración el aire y el agua, y se dispone de precisas herramientas de simulación para ambos elementos (por ejemplo, ICEPAK, QFIN).

Los termosifones de refrigeración de dos fases son una alternativa especialmente interesante a los métodos de refrigeración activos [1]. En un termosifón, el fluido circula por gravedad debido a la diferencia de densidad entre el líquido y el vapor → 1. De esa forma, el empleo de fluidos dieléctricos y el funcionamiento sin bombas con altos coeficientes de transferencia de calor en ebullición es una combinación atractiva para la refrigeración de aparatos con densidades de potencia mayores. El método presenta mayor fiabilidad que el agua bombeada (no hay componentes móviles ni problemas de aislamiento). ABB ha desarrollado un intercambiador de calor compacto por termosifón basado en la tecnología de automoción. Utiliza numerosos tubos multipuerto obtenidos por extrusión con canales capilares dispuestos en paralelo y soldados a una placa base caliente para conseguir la compacidad deseada → 2 – 3. La tecnología requiere nuevos métodos de modelización que pueden no estar cubiertos adecuadamente por las actuales herramientas comerciales. Las simulaciones de termosifones de dos fases deben predecir la resistencia térmica desde la fuente de calor al sumidero (por ejemplo, el aire ambiente), pero también parámetros críticos tales como el secado (para asegurar la uniformidad de temperatura), el flujo de calor crítico (para evitar que se dispare la temperatura), las pérdidas de presión o el llenado óptimo de fluido. El modelo de termosifón de dos fases de ABB se basa en la resolución de las ecuaciones de conservación de la masa, el impulso y la energía para dos fases. Para calcular la caída de presión, la fracción de vacío y el coeficiente de transferencia de calor en las sucesivas secciones del termosifón se utilizan las correla-

Los termosifones de refrigeración de dos fases son una alternativa especialmente interesante a los métodos de refrigeración activos.

4 Accionamiento de baja tensión con un COTHEX base-aire y uno aire-aire instalados



Para muchos componentes hay que desarrollar métodos precisos específicos de modelización de alta frecuencia.

ciones y modelos adecuados existentes en la literatura o en colaboraciones con la universidad. Se evalúan posteriormente los valores residuales de estas ecuaciones de conservación y se minimizan con un algoritmo de minimización adecuado (SIMPLEX). Este modelo de flujo de dos fases se acopla con un solucionador de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE) para determinar la difusión del calor por la placa base → **imagen del titulo.** Puesto que no hay ninguna bomba que impulse el fluido dentro del termosifón, el caudal de fluido y por lo tanto las prestaciones de refrigeración son muy sensibles a muchos parámetros, como la longitud y el diámetro de los tubos, la distribución del flujo de calor, la presión del fluido y la naturaleza y la cantidad de fluido. Estas simulaciones permiten entonces establecer el diseño del producto óptimo mientras que se evita una considerable cantidad de trabajo en la creación de prototipos → **4.**

EMC

Los modernos convertidores de electrónica de potencia son dispositivos complejos en los que coexisten intensidades y tensiones elevadas con el control de la sensibilidad a las perturbaciones y las señales de comunicación. Los diseños compactos adoptados para conseguir altas densidades de potencia aumentan asimismo el acoplamiento electromagnético (EM) entre las distintas piezas del equipo. Para lograr un funcionamiento fiable y seguro de los convertidores, hay que asegurar la compatibilidad electromagnética (EMC) del dispositivo. Hay que tener en cuenta tres aspectos de la EMC:

- La capacidad del dispositivo para trabajar en un determinado ambiente EM (inmunidad)
- El ruido EM emitido hacia el entorno (emisión) debe mantenerse por debajo de ciertos límites
- La interferencia EM entre distintas partes del mismo dispositivo (EMI)

Los dos primeros puntos son objeto de reglamentos en forma de normas concretas de emisión e inmunidad. El tercer punto define la solidez interna y la fiabilidad de un dispositivo.

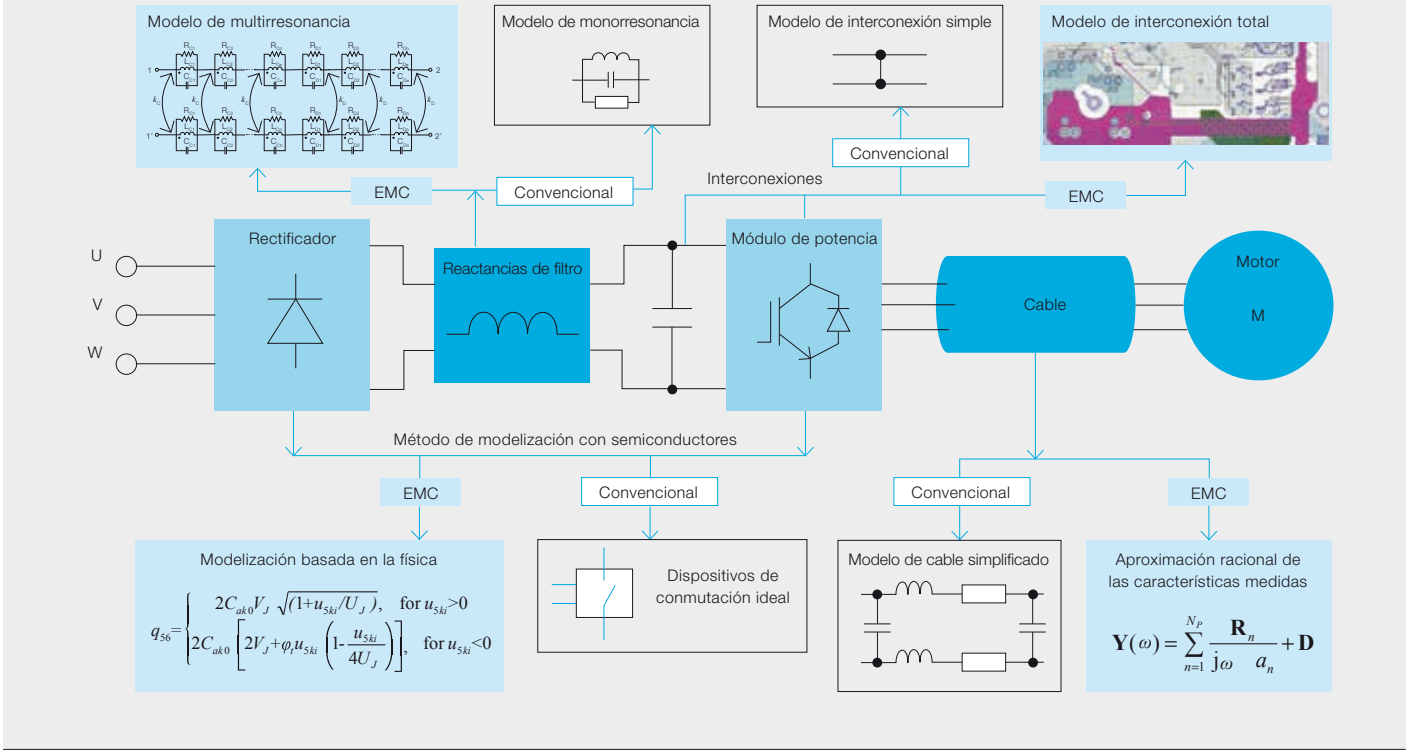
La tendencia hacia diseños compactos, alta densidad de potencia y semiconductores de potencia de conmutación rápida está haciendo que el diseño para EMC de los equipos de electrónica de potencia sea cada vez más exigente. Muy a menudo, el método de prueba y error es el principal cuando hay que tratar con la EMC en aparatos de electrónica de potencia. En tales escenarios, las mediciones se realizan sobre prototipos terminados en los que la configuración y los componentes están ya fijados. Es difícil hacer modificaciones en este momento y es normal que se produzcan retrasos.

Por el contrario, un método inteligente de diseño de EMC se inicia con simulaciones EM a nivel del sistema. Las ventajas de este método son:

- Se pueden tener en cuenta los efectos EM en el convertidor y sus componentes en una fase temprana del diseño.
- Las simulaciones de HF del convertidor completo pueden ayudar a comprender y prevenir posibles perturbaciones EM.
- Basándose en las simulaciones EM, se pueden conseguir diseños óptimos de filtros y configuración empleando algoritmos de optimización numérica.

Las ventajas del método de simulación pueden parecer obvias, pero la preparación de modelos adecuados de convertidor es un procedimiento complejo. Para conseguir resultados útiles de la simulación, se deben modelizar precisamente tanto componentes discretos (por ejemplo, condensadores y semiconductores) como estructuras mecánicas y de interconexión (por ejemplo, sumideros de calor, PCB, cables). El número total de componentes del modelo de circuito a nivel de sistema puede superar fácilmente los 100.000.

5 Metodología de modelización y simulación EMC



Los convertidores de potencia que trabajan en zonas distantes o de difícil acceso tienen que funcionar durante décadas.

Los distintos tipos de componentes e interconexiones existentes en un convertidor requieren métodos y herramientas de modelización diferentes ➔ 5. Para algunos de los componentes (PCB, sumideros de calor, condensadores) existen herramientas comerciales. Sin embargo, para muchos otros componentes (por ejemplo, cables de alimentación trifásicos largos, reactancias de modo común) hay que elaborar específicamente métodos de modelización de alta frecuencia [2, 3]. Por ello, las simulaciones de EMC para aplicaciones de electrónica de potencia están transformándose en una estructura de simulación EMC más compleja. Esto incluye el desarrollo y la incorporación de nuevas técnicas y herramientas de modelización de componentes (en colaboración con STC ➔ 7), y del "know-how" alrededor de la selección y la combinación de modelos de componentes en un modelo a nivel de sistema, así como el postproceso y el análisis de las cantidades simuladas.

Fiabilidad

Los convertidores de potencia que trabajan en zonas distantes o de difícil acceso (tales como las instalaciones eólicas mar adentro) tienen que funcionar sin interrupción durante décadas. Las dificultades de mantenimiento y las intervenciones de servicio características del emplazamiento aumentan la importancia de la fiabilidad.

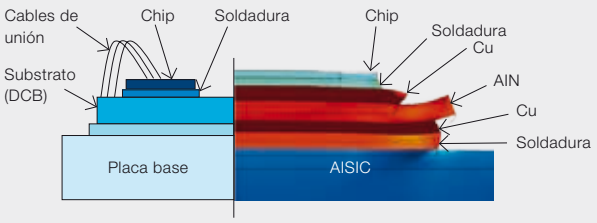
En general, se puede decir que la fiabilidad de un sistema es el producto de la fiabilidad de sus componentes. Cada componente puede fallar a causa del desgaste o por esfuerzos excesivos, y al hacerlo pueden dar lugar a que el sistema funcione mal. Cuanto mayor es el esfuerzo al que están sometidos los componentes individuales, mayor será la probabilidad de un fallo. Los esfuerzos pueden incluir (aunque no estén limitados a ello) campos eléctricos, humedad y temperatura.

El corazón de todo sistema electrónico de potencia es su matriz de interruptores semiconductores. Usualmente se agrupan en módulos de potencia que proporcionan aislamiento, distribución interna de corrientes y protección. Estos módulos están compuestos de materiales distintos, cada uno de ellos con su propio coeficiente de dilatación térmica (CTE) ➔ 6. Cuando se someten a cambios de temperatura (por ejemplo, debido a cambios en las cargas) estas diferencias de los valores de CTE producen esfuerzos mecánicos (y en definitiva desgaste) en las superficies de separación, lo que puede causar a la larga su rotura. Por ejemplo, una causa de fallo en los módulos IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) es la rotura de la conexión entre el chip de silicio y los hilos de unión de aluminio adjuntos.

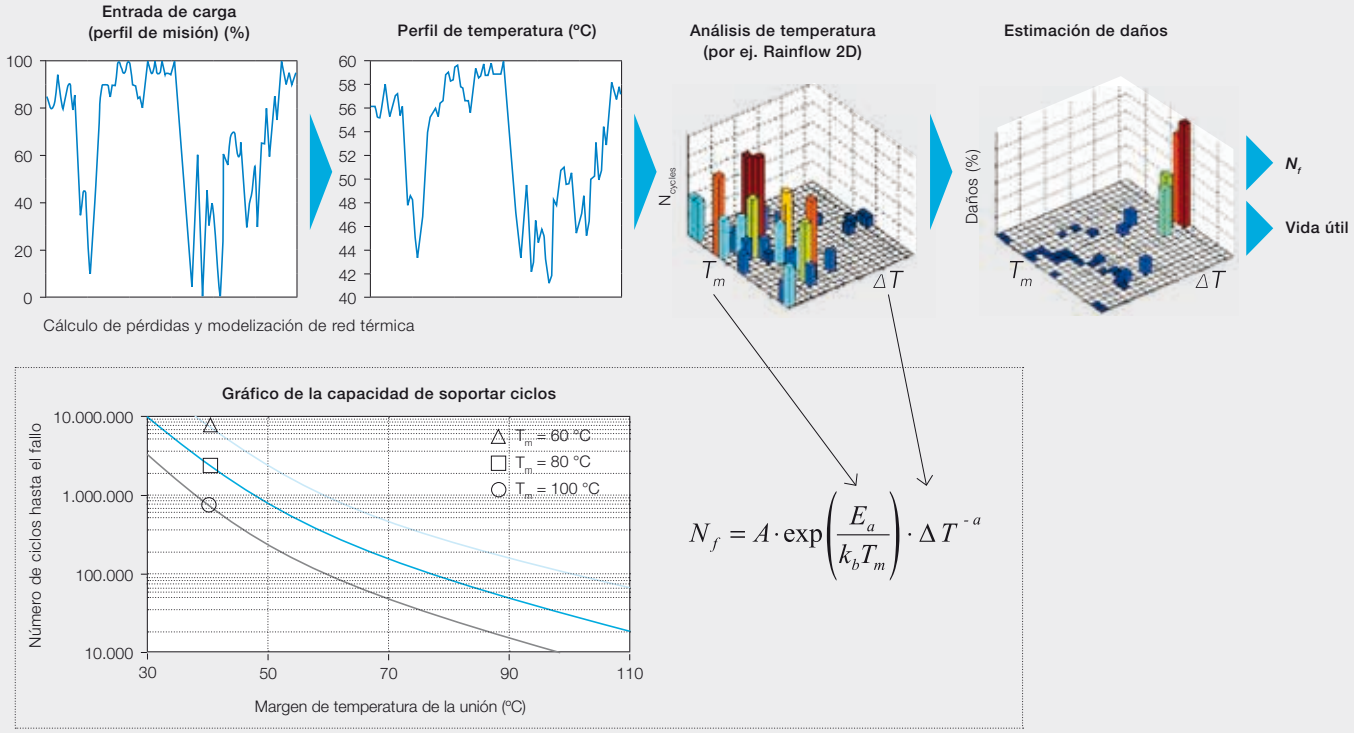
Como el modo de fallo se conoce bien, los fabricantes proporcionan gráficos de la capacidad de ciclado de sus módulos IGBT. Se pueden utilizar como base para las simulaciones de la vida útil siguiendo las etapas siguientes.

– Definición de un posible perfil de carga (misión): ¿En qué tipo de esfuerzos y de entornos se encontrarán los componentes a lo largo de sus vidas?
– Cálculo de pérdidas: las pérdidas en los interruptores de semiconductores se calculan a partir del perfil de carga.

Material	CTE ppm/K	Cambio de longitud Δl
Cable de unión (Al)	23	
Chip (IGBT) Si	3.5	
Soldadura chip (SnPb)	29	
AlN –DCB	10	
Soldadura substrato (SAC)	17	
Placa base (Cu)	17	



Sección transversal del módulo IGBT. Derecha: simulación de EF mostrando la deformación producida por el ciclo térmico (100 x saturado). Fuente: Samuel Hartmann



– Cálculo del perfil de temperaturas: junto con los modelos de redes térmicas, se calculan los perfiles de temperaturas transitorias para cada interruptor semiconductor.
– Análisis de perfiles de temperaturas: el perfil de temperaturas se analiza de acuerdo con los parámetros principales de esfuerzos, es decir, las oscilaciones de la temperatura, ΔT y la mediana de las temperaturas T_m.
– Estimación de daños: para cada ΔT y la T_m correspondiente, se calcula el daño esperado a partir de las curvas de capacidad de ciclado.
– Estimación de la vida útil: la vida útil del semiconductor viene dada por el tiempo necesario para acumular un daño crítico.

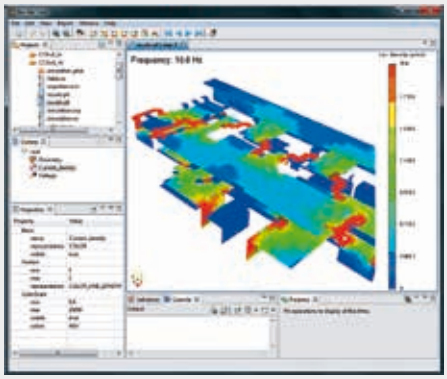
Se aplica un procedimiento similar para todos los otros modos de fallo que puedan producirse. Por ejemplo, en los módulos de potencia, las juntas de soldadura sufren por los ciclos termomecánicos. En contraste con los hilos de unión de aluminio, los materiales de la soldadura sufren una importante deformación por fatiga. Por lo tanto, se aplica modelización de elementos finitos u otra simulación numérica para calcular el daño inducido por el perfil de carga aplicado, lo que finalmente determina la vida útil esperada [4]. De todos los modos de fallo calculados, se toma la vida útil más corta como vida del componente (en este caso, el módulo IGBT) y, en consecuencia, del sistema en que se utiliza.

Cuanto mayor es el esfuerzo al que están sometidos los componentes individuales, mayor será la probabilidad de un fallo. Los esfuerzos pueden incluir (aunque no estén limitados a ello) campos eléctricos, humedad y temperatura.

Perspectivas futuras

Las continuas mejoras en las tecnologías de cálculo permiten que siga aumentando el tamaño y la complejidad de las simulaciones. Al mismo tiempo, las herramientas avanzadas de software para interfaces y scripting permitirán el acoplamiento de nuevas simulaciones en distintos campos. Estos desarrollos, al tiempo que aportan muchas ventajas para el diseño de productos y la predicción del comportamiento, llevan asimismo a una mayor complejidad en lo que respecta a la utilización de un número cada vez mayor de

7 Centro de Herramientas de Simulación



El grupo del centro de herramientas de simulación (STC) de ABB se ha establecido en Cracovia, Polonia. Proporciona software profesional de simulación de electrónica de potencia para ABB. Los servicios del STC incluyen:

- Desarrollo de interfaces de usuario gráficas (GUI) dedicadas y fáciles de usar para herramientas y algoritmos preparados en el marco de proyectos de investigación de los diversos centros de investigación del grupo ABB.
- Programación de interfaces de datos entre diversos softwares de simulación propios o comerciales que permitan simulaciones de acoplamiento entre ambos.
- Mantenimiento a largo plazo de las herramientas creadas internamente.
- Apoyo al usuario, incluyendo formación con las herramientas, aprendiendo normalmente con los científicos que han desarrollado las herramientas de resolución.

Las herramientas desarrolladas pueden, por ejemplo, apoyar algoritmos de diseño para tecnologías de integración de electrónica de potencia de nuevo desarrollo (por ej. nuevos dispositivos de refrigeración). La disponibilidad de esas herramientas acelera considerablemente la transferencia de nuevas tecnologías desde la investigación al producto.

Otras herramientas proporcionan nuevas metodologías y solucionadores que no están disponibles comercialmente. Por lo tanto cubren importantes vacíos en el terreno de la simulación, como por ejemplo en el campo de la compatibilidad electromagnética (EMC).

Un aspecto importante de las simulaciones acopladas es que los resultados de una simulación (o medición) se puede trasladar para entradas de modelos de otras herramientas. Un ejemplo de ello es el software “herramienta de barra bus” (BBT), una herramienta especializada en el diseño electromagnético de interconexiones eléctricas (barras bus). BBT no sólo proporciona las impedancias, densidades de corriente y configuraciones de campos relevantes, sino que también lleva a cabo el procesamiento posterior de las fuerzas mecánicas y exporta macromodelos de barras bus para posteriores simulaciones a nivel de circuito (por ej. en SPICE o en MATLAB de Simulink).

Otro ejemplo es el “generador de modelos de circuitos” (CMG) que crea modelos de circuitos equivalentes de alta frecuencia de inductores, reactancias de modo común y máquinas inductivas que utilizan impedancias medidas o simuladas.

Se aplica modelización de elementos finitos u otra simulación numérica para calcular el daño inducido por el perfil de carga aplicado que finalmente determina la vida útil esperada.

herramientas, modelos y resultados, y normalmente hará también participar a diseñadores que se encuentren en lugares distintos. Por lo tanto, es de la mayor importancia centrarse en la infraestructura necesaria y aportar un mantenimiento a largo plazo de los diversos modelos y herramientas comerciales y de propia creación. En ABB, esta tarea la lleva a cabo por el Centro de Herramientas de Simulación (STC) de electrónica de potencia de la empresa → 7.

Como consecuencia de la utilización selectiva de simulaciones de vanguardia, las tecnologías de integración se mantendrán al día con las cada vez mayores prestaciones de los dispositivos de semiconductores y sus problemas. El futuro de las aplicaciones de la electrónica de potencia se caracterizará por tanto por un continuo aumento de la densidad de potencia, una mejora de la fiabilidad del producto y una reducción del coste por potencia.

Didier Cottet
Bruno Agostini
Stanislav Skibin
Gernot Riedel
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil, Suiza
didier.cottet@ch.abb.com
bruno.agostini@ch.abb.com
stanislav.skibin@ch.abb.com
gernot.riedel@ch.abb.com

Pawek Wojcik
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
pawel.wojcik@pl.abb.com

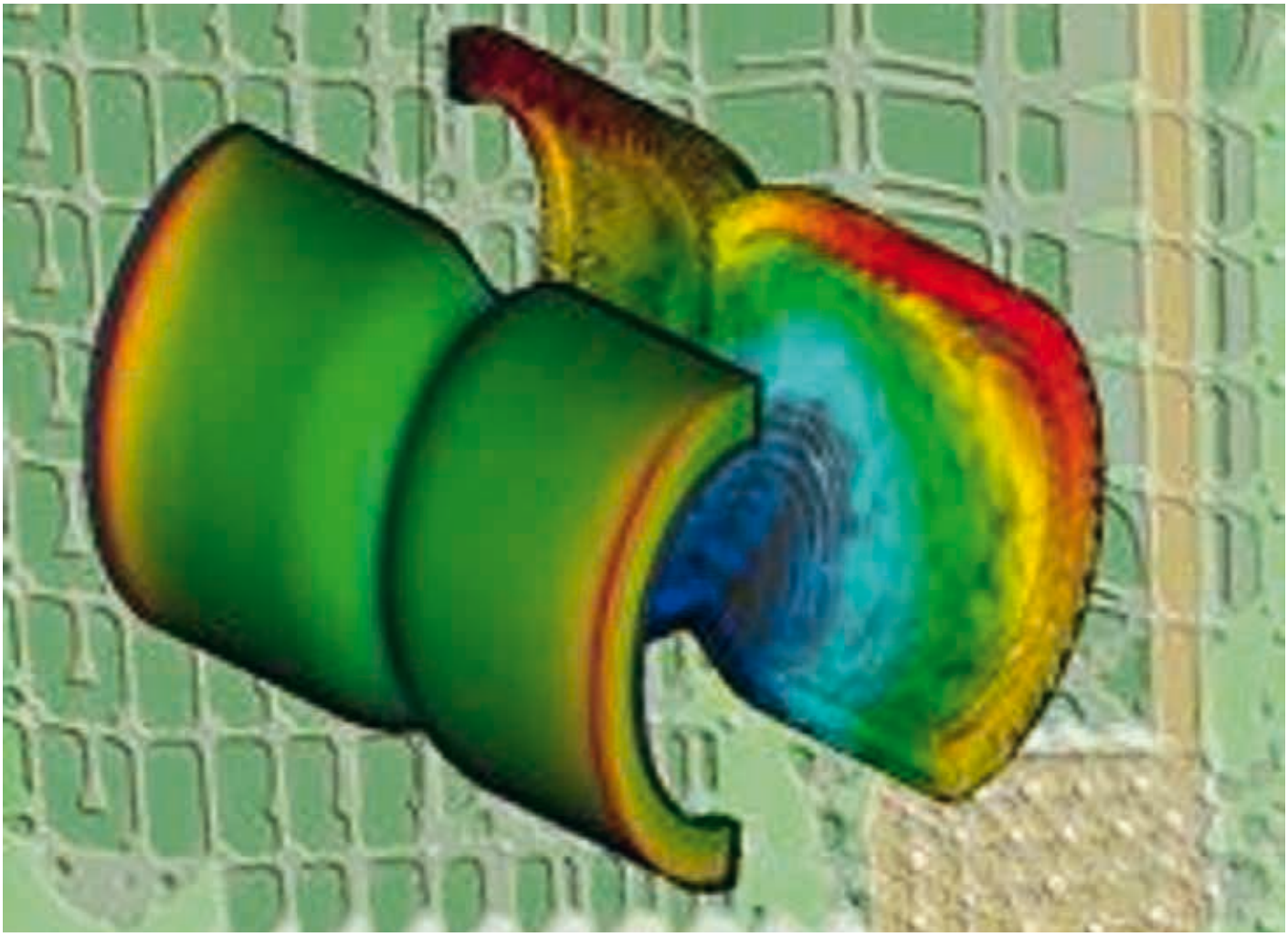
Referencias

[1] B. Agostini, M. Habert, *Measurement, observation and modeling of the performances of a transparent gravity driven two-phase loop*, in 11th International Conference on Advanced Computational Methods and Experimental Measurements in Heat Transfer, Tallinn, Estonia, 2010.

[2] I. Stevanovic, *et al.*, *Multiconductor cable modeling for EMI simulations in power electronics*, in Proc. 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, Canadá, October 25–28, 2012.

[3] I. Stevanovic, *et al.*, *Behavioral modeling of chokes for EMI simulations in power electronics*, IEEE Transactions on Power electronics, vol. 28, no. 2, February 2013, pp. 625–705.

[4] G. J. Riedel, *et al.*, *Reliability of Large Area Solder Joints within IGBT Modules: Numerical Modeling and Experimental Results*, CIPS 2012, pp.1,6, 6–8 March 2012.



Moldear el futuro

Mejora del procesamiento de polímeros mediante simulaciones por ordenador avanzadas

ROBERT SEKULA, KRZYSZTOF KASZA, LUKASZ MATYSIAK, LUKASZ MALINOWSKI, DARIUSZ BEDNAROWSKI, MICHAL MLOT, GERHARD SALGE

– Por sus excelentes propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas, los materiales poliméricos son los materiales aislantes que se utilizan principalmente en numerosos productos eléctricos de ABB. Debido a la complejidad de las formas y la amplia gama de parámetros utilizados en las tecnologías de fabricación, pueden surgir problemas con la calidad de los productos. En el aislamiento se pueden presentar, por ejemplo, burbujas de aire, llenado incompleto, gelificación prematura, propagación incorrecta del curado, sobrecalentamiento local, grietas y deformaciones. No obstante, mediante herramientas de simulación por ordenador (numéricas) avanzadas, ABB mantiene un control de calidad óptimo de sus productos y minimiza el tiempo de desarrollo de nuevos productos. Estas herramientas de simulación permiten a los ingenieros explorar miles de alternativas de diseño en períodos muy breves, lo que se traduce en mejoras del rendimiento y la calidad del diseño, además de reducir el tiempo necesario para lanzar un producto al mercado.

1 Resultados de simulaciones de moldeos de epoxy y procesos de polimerización

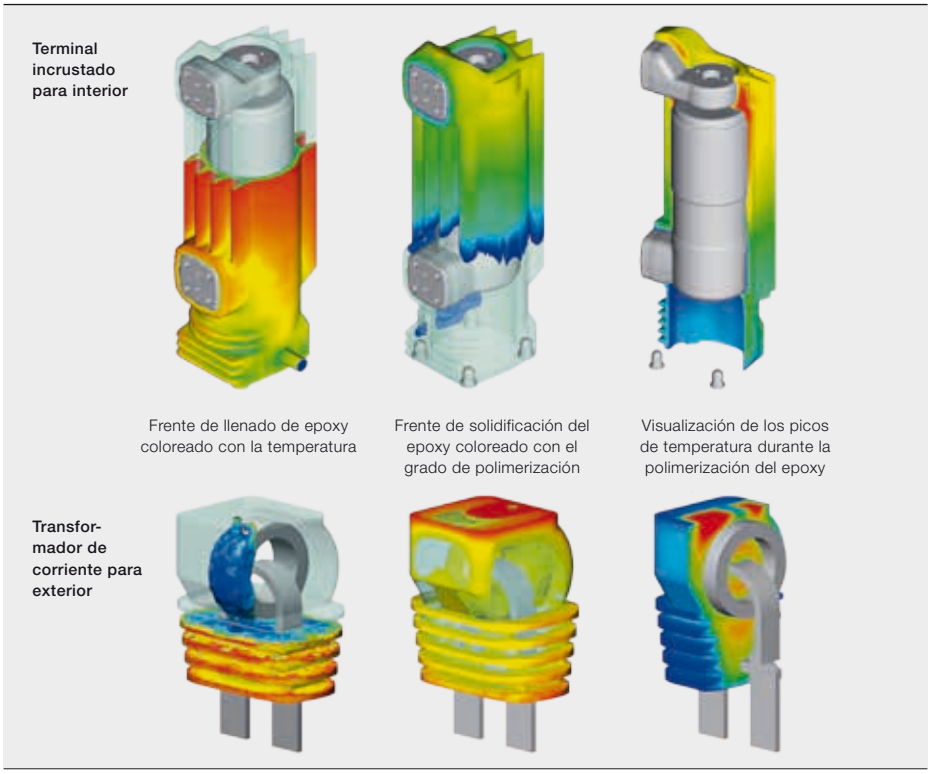


ABB utiliza simulaciones por ordenador avanzadas en todas sus tecnologías de procesamiento de polímeros, como en el caso del moldeado reactivo, el moldeado por inyección y el moldeado de silicona.

Moldeado con epoxi

Las resinas epoxídicas son el material aislante más utilizado en la fabricación de productos de media y alta tensión de ABB. El complejo proceso de fabricación, que se conoce como moldeado reactivo, incluye el llenado del molde, la gelificación (solidificación) y el enfriamiento. Gracias al enfoque multifísico que permite reunir simulaciones por ordenador avanzadas de flujo de fluidos, transferencia de calor, deformación mecánica y tensiones, se logran resultados más precisos y los ingenieros disponen de más medios para seguir y controlar el proceso de fabricación.

Pueden observar el llenado del molde con resina epoxi, la transición del material del estado líquido al sólido, la distribución de la temperatura con picos provocados por la reacción química exotérmica, la deformación durante el enfriamiento y la acumulación de tensiones asociada [1, 2] → 1. El análisis detallado de los resultados obtenidos permite seleccionar los mejores parámetros de proceso. El mantenimiento de las temperaturas de procesamiento adecuadas y la minimización de las tensiones residuales son los factores clave que determinan la calidad y la fiabilidad del producto final.

Imagen del título
Optimización del componente de una muestra obtenido con simulación de moldeado por inyección.

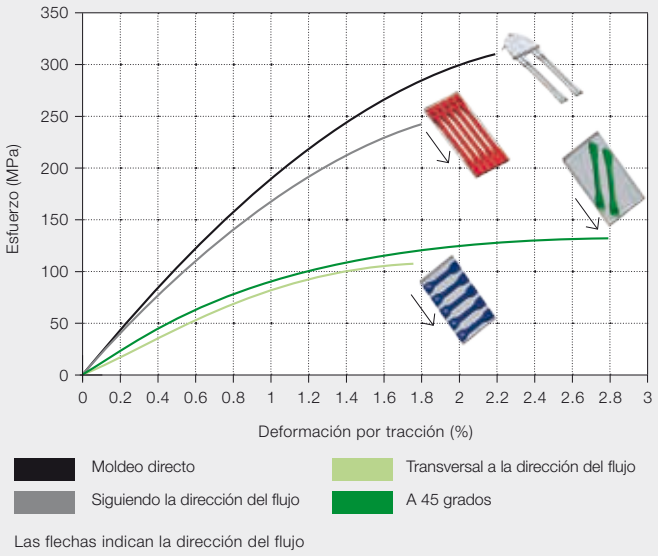
Para maximizar el potencial del compuesto en el desarrollo de sus componentes termoplásticos, ABB utiliza la simulación avanzada.

ABB ha desarrollado también una herramienta de simulación de moldeado de epoxy basada en la web que ofrece cálculos totalmente automatizados [3]. Los ingenieros de diseño o de proceso sin formación en modelado numérico pueden realizar directamente los cálculos. La generación de la malla, la configuración de la simulación, los cálculos y otras etapas se realizan automáticamente basándose en variables de entrada, como la geometría del modelo, los materiales seleccionados y los parámetros del proceso. La herramienta genera un informe con un resumen de los resultados que permite analizar la calidad y la eficiencia del proceso.

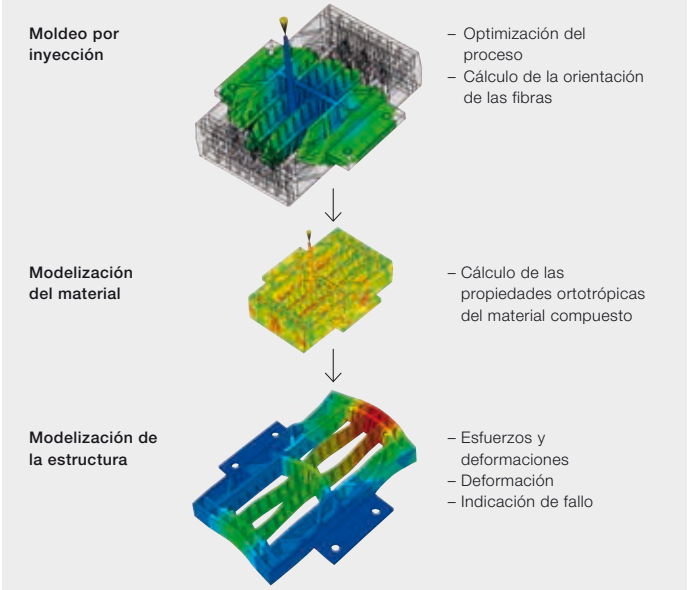
El moldeado por inyección de termoplásticos

Los polímeros termoplásticos, que se utilizan principalmente en los productos de baja tensión de ABB, se distinguen de los polímeros de resina epoxi y otros termoestables por su capacidad de fundirse y moldearse cuando se calientan por encima de determinadas temperaturas, recuperando el estado sólido al enfriarse. El moldeado por inyección es el método de procesamiento más habitual en los termoplásticos. El polímero caliente y fundido se inyecta a gran velocidad (hasta centenares de cm^3/s) y alta presión (hasta 2.000 bar) en una cavidad de molde frío. Mientras el polímero se enfría, la unidad de inyección mantiene la presión para compensar la contracción. Cuando la temperatura del polímero es de 20–30 °C por debajo de la temperatura de solidificación, se ha adquirido la suficiente resistencia mecánica como para expulsar la pieza. El tiempo del ciclo de producción

2 Comparación de resultados de pruebas de esfuerzos de tracción para fibra de vidrio con un 50 por ciento de poliacrilamida en el caso de fibras cortas de distinta orientación



3 Método de simulación para termoplástico reforzado con fibras cortas procesado por moldeo por inyección



Las simulaciones por ordenador avanzadas se realizan para optimizar los diseños de piezas y moldes antes de la fabricación de los moldes.

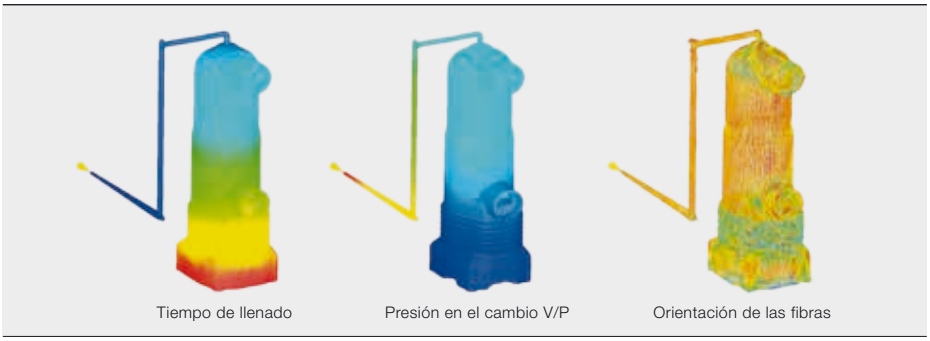
depende del espesor de la pared (entre 0,5 y 6 mm) y, normalmente, puede tardar hasta 100 segundos. El diseño de la pieza y el molde resulta muy complicado debido a los complejos fenómenos que tienen lugar durante el procesamiento de los termoplásticos: cizallamiento, calentamiento viscoso, cristalización, orientación, enfriamiento y deformación no deseada (combado).

Las simulaciones por ordenador avanzadas se realizan para optimizar los diseños de piezas y moldes antes de la fabricación de los moldes. La herramienta de simulación por ordenador permite analizar todas las etapas del proceso: inyección, compactación y enfriamiento (el tiempo de expulsión y su impacto en la distribución del calor en el molde también se tienen en cuenta). El modelo de simulación considera todos los componentes esenciales del moldeado por inyección, como la cavidad de la pieza, el sistema de canal frío o caliente, las inserciones de la pieza o el molde, los circuitos de refrigeración y la ventilación del molde, si es necesario. Las simulaciones por ordenador sirven para evaluar la calidad de la fase de inyección en cuanto al perfil de llenado, el estancamiento del flujo, la congelación prematura de los polímeros o la ubicación de las líneas de soldadura y las trampas de aire. Durante las fases de compactación y enfriamiento se evalúa la eficiencia de la compensación de contracción, de manera que se pueda realizar la selección correcta de la sección transversal de puerta fría. La forma de la pieza final también se modela teniendo en cuenta el combado provocado por la contracción del polímero, el enfriamiento desigual y la orientación del material.

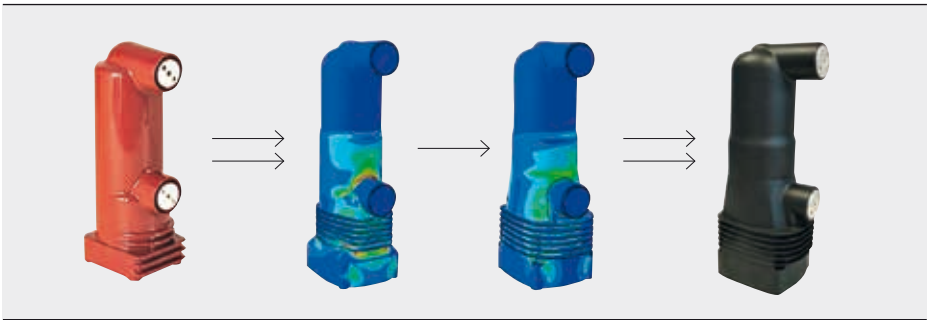
El software que se utiliza en la simulación del moldeado por inyección incluye una base de datos con más de 6.000 materiales termoplásticos predefinidos, que se pueden utilizar en la especificación de los materiales: presión-volumen-temperatura (PvT), viscosidad como función de la temperatura y la velocidad de cizallamiento, y propiedades térmicas y mecánicas. El software controla también una serie de procesos, como la inyección asistida por gas, la compresión por inyección, la co-inyección y los materiales reforzados con fibra.

Los compuestos termoplásticos reforzados con fibras de vidrio cortas también se suelen utilizar como material aislante por sus excelentes propiedades mecánicas y térmicas. La introducción de estos materiales en un producto representa un reto, porque las fibras cortas en una matriz polimérica se alinean en la dirección del flujo durante el proceso de moldeado por inyección y determinan propiedades anisótropas en los materiales. Los valores más altos de rigidez y resistencia se miden en el sentido del flujo del material durante el moldeado, mientras que el rendimiento transversal solo puede alcanzar un 35% de los valores indicados en la ficha técnica de los materiales (basándose en las

4 Resultados de la simulación de proceso de moldeo por inyección de un terminal termoplástico empotrado



5 Optimización mecánica de una estructura de terminal empotrado termoplástico



El rendimiento dieléctrico del diseño se comprueba con las simulaciones de la distribución del campo eléctrico.

mediciones de poliarilamida reforzada con un 50% de fibras de vidrio) ➔ 2.

Para maximizar el potencial del compuesto en el desarrollo de sus componentes termoplásticos, ABB utiliza la simulación avanzada ➔ 3. El primer paso en el proceso de simulación es recopilar información sobre la distribución de las fibras. Las propiedades materiales de las matrices y fibras poliméricas se definen por separado en el software de modelado de los materiales, que calcula las propiedades mecánicas resultantes del compuesto. A continuación, un paquete de simulación estructural utiliza estos valores para calcular la respuesta del producto ante una carga mecánica aplicada. La estimación de la carga crítica que puede soportar el material del compuesto es posible gracias a indicadores de fallos basados en el esfuerzo y la tensión [4, 5].

Del epoxy a los termoplásticos

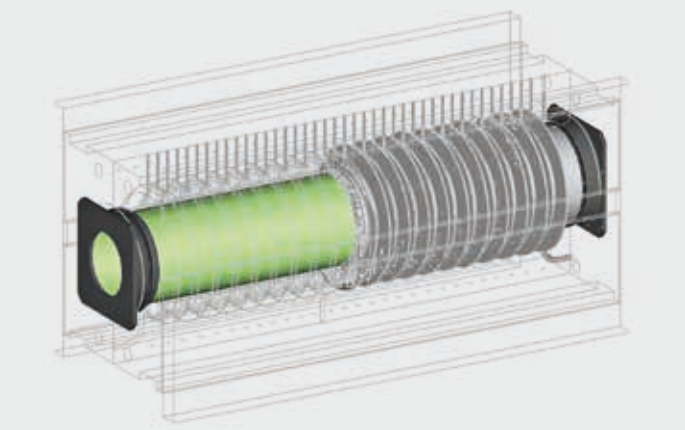
Los materiales termoplásticos se han utilizado ampliamente en aplicaciones de productos de baja tensión. Con el aumento de las capacidades de los termoplásticos de ingeniería, también se están empezando a considerar como reemplazo del aislamiento epoxi termoestable en productos con un nivel de tensión más elevado. Las propiedades mecánicas de los termoplásticos de ingeniería son mucho mejores que las de los epoxis, y presentan una rigidez significativamente mayor y una resistencia mecánica varias veces superior. La resistencia dieléctrica de los termoplásticos también puede ser superior. Estas ventajas permiten una reducción importante del peso del producto y el impacto medioambiental.

El polo encapsulado PT1 de ABB es un ejemplo del cambio de epoxis a termoplásticos en aplicaciones de media tensión de ABB. El cambio del material de aislamiento permite una reducción del peso superior a un factor de tres, y logra al mismo tiempo un rendimiento mecánico superior. Además, se reducen las emisiones de CO_2 en el ciclo de vida útil de un producto en más de un 50% [6]. Todas estas mejoras se han logrado utilizando simulaciones por ordenador avanzadas.

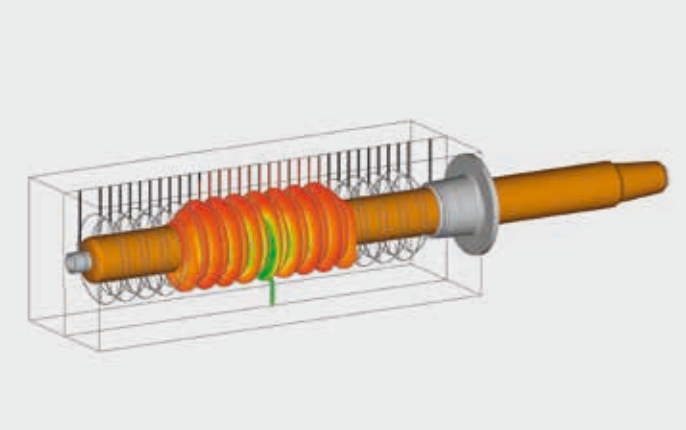
El moldeado por inyección de termoplásticos es más apropiado para paredes delgadas que para las voluminosas estructuras de los componentes de epoxi. Por lo tanto, cuando se decide realizar un cambio de material en un producto de media o alta tensión, es necesario llevar a cabo un rediseño completo del producto. La primera etapa del rediseño es generar ideas de diseño y, a continuación, realizar un proyecto de diseño de la pieza de plástico. Posteriormente, la evaluación y la optimización del concepto se llevan a cabo con herramientas de simulación. En el análisis mecánico se modelan todos los casos de carga a los que se somete el producto durante su operación. En paralelo, la capacidad de fabricación de la pieza se verifica con simulaciones del proceso de moldeado por inyección ➔ 4. El rendimiento dieléctrico del diseño se comprueba con simulaciones de la distribución del campo eléctrico. A partir de los resultados de las simulaciones, se introducen modificaciones en el diseño y se inicia el siguiente ciclo de simulaciones. Basándose en los resultados finales, el prototipo de la pieza se fabrica y se somete a todas las pruebas que exigen las normas.

Con el polo encapsulado termoplástico de ABB, este enfoque permite una reducción del 50% en el nivel máximo de tensión en la pieza ➔ 5. Con la simulación del moldeado por inyección se optimizan los ajustes del proceso y se reduce la presión del material en la cavidad del molde, que tiene gran importancia en esta aplicación ya que el interruptor de vacío de sobremoldeado se diseñó para un proceso de moldeado de baja presión. Gracias a las simulaciones por ordenador se optimizaron tanto el diseño del polo encapsulado termoplástico como su proceso de fabricación.

6 Distribución del flujo y curado de un aislante de silicona para alta tensión



6a Distribución del flujo de silicona durante el llenado en el moldeo



6b Evolución del proceso de curado de la silicona

Procesamiento de caucho de silicona líquido

El moldeado de silicona es otra tecnología de procesamiento que se utiliza ampliamente para fabricar aislamientos eléctricos de productos eléctricos de media y baja tensión como, por ejemplo, supresores de sobretensiones, bornas, aisladores y terminaciones de cables. Las excelentes propiedades de los cauchos de silicona incluyen alta estabilidad química y térmica que posibilita la hidrofobicidad del material, estabilidad UV, buena descarga disruptiva y resistencia a la erosión [7, 8].

Otro factor que influye en las propiedades aislantes de la silicona es el procesamiento del material durante la fase de fabricación del aislamiento.

Uno de los riesgos asociados al moldeado de silicona son las elevadas temperaturas que tienen lugar durante el proceso y que pueden provocar la degradación de las propiedades del material. El control de la temperatura adquiere todavía más importancia cuando se tiene en cuenta la exotermia (generación de calor) que se produce durante el curado de la silicona, que podría dar lugar a la creación de puntos calientes locales. Además, es preciso considerar que las condiciones de temperatura demasiado extremas pueden provocar la gelificación prematura del caucho de silicona y, por lo tanto, un llenado incompleto del molde. Por último, un diseño incorrecto de los sistemas de inyección y ventilación puede dar lugar a la creación de burbujas de aire durante el llenado del molde, produciéndose descargas parciales en el producto.

Las simulaciones por ordenador permiten a los ingenieros analizar internamente el molde de inyección y obtener una imagen completa de la manera en que se procesa el caucho de silicona [9, 10]. Se pueden observar, por ejemplo, el patrón del flujo de silicona, el aumento de la presión, el intervalo de temperaturas y el grado de curado de la silicona a medida que tienen lugar → 6. Además, estos resultados se pueden utilizar para identificar posibles problemas asociados con el diseño del producto o su proceso de fabricación. Las simulaciones por ordenador se pueden utilizar para hallar maneras de mejorar el diseño del producto y el proceso de producción reduciendo los períodos de tiempo y los costes de inversión.

Dariusz Bednarowski
Krzysztof Kasza
Lukasz Malinowski
Lukasz Matysiak
Michal Mlot
Robert Sekula
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
dariusz.bednarowski@pl.abb.com
krzysztof.kasza@pl.abb.com
lukasz.malinowski@pl.abb.com
lukasz.matysiak@pl.abb.com
michal.mlot@pl.abb.com
robert.sekula@pl.abb.com

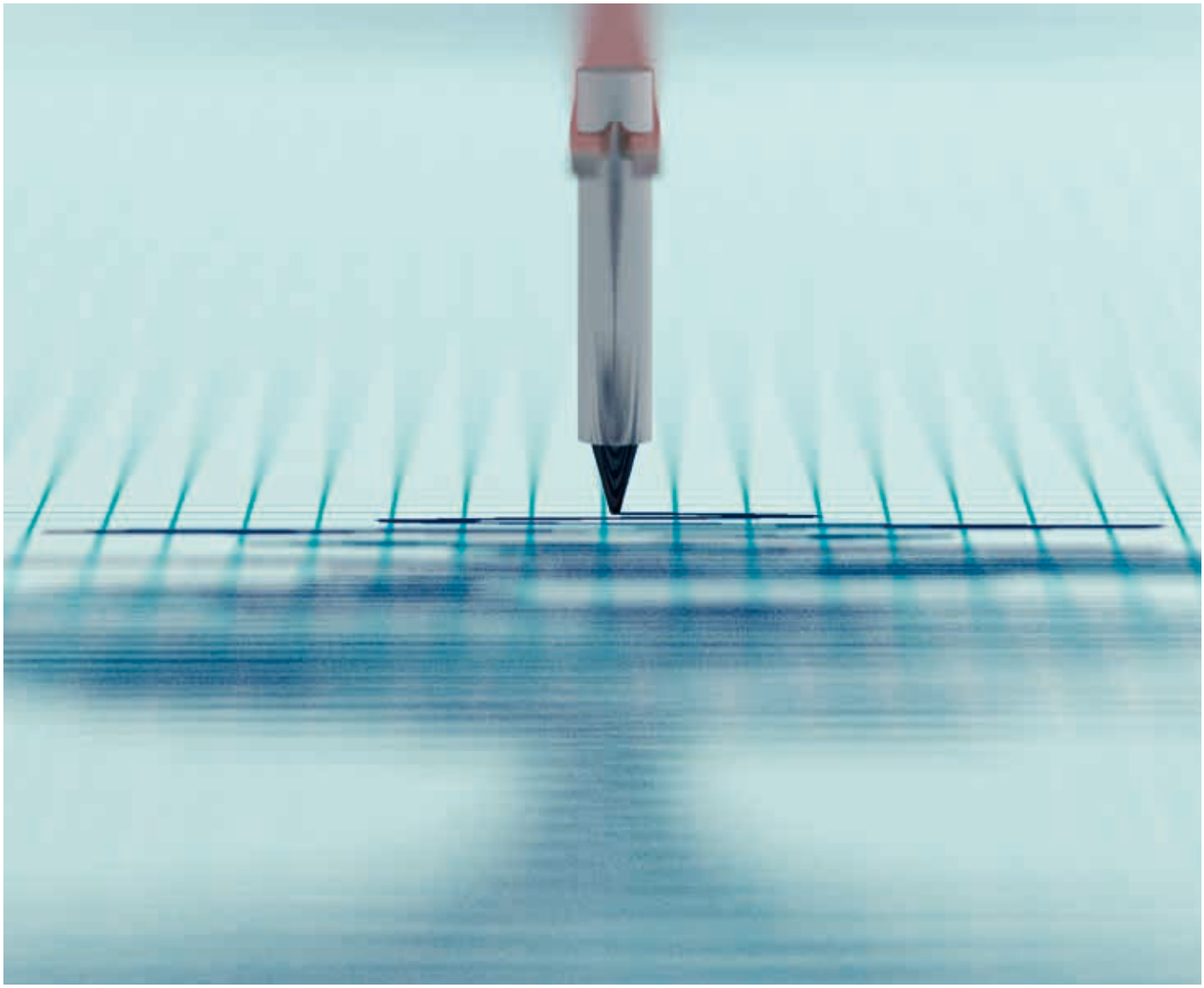
Gerhard Salge
ABB Medium Voltage Products
ABB Medium Voltage Products
Ratingen, Alemania
gerhard.salge@de.abb.com

Referencias

[1] R. Sekula, *et al.*, "3-D Modeling of Reactive Moulding Processes: From Tool Development to Industrial Application", Advances in Polymer Technology, vol. 22, vol. 1, págs. 42–55, 2003.
[2] R. Sekula, *et al.*, "Sequential fluid dynamics and structural mechanics simulations of a reactive molding process". International Journal of Materials and Product Technology, vol. 40, nº 3/4, págs. 250–263, 2011.
[3] L. Matysiak, *et al.*, "eRAMZES – Novel Approach for Simulation of Reactive Molding Process; actas de la 26ª Conferencia europea de modelado y simulación, págs. 128–135, Koblenz, Alemania, 2012.
[4] D. Bednarowski, *et al.*, "Modeling of short fiber composites strength with use of failure indicators". 10ª Conferencia internacional sobre procesos de flujo en materiales compuestos, 2010.
[5] D. Bednarowski, *et al.*, "Modeling of reinforced thermoplastics' mechanical performance with use of failure indicator", Reunión de usuarios de Digimat, 2010.
[6] T. Fugel, *et al.*, "Interruptores que superan lo esperado." *ABB Review* 1/2010; págs. 57–62.
[7] L. Stenstrom, *et al.*, "Optimized use of HV composite apparatus insulators: field experience from coastal and inland test stations". Actas de la 40ª sesión de CIGRE, 2004.
[8] "Remote Plant Plays Key Role in ABB Insulator Business", Insulator News & Market Report Quarterly Review, vol. 13, págs. 54-61, 2005.
[9] L. Matysiak, *et al.*, "First Industrial Application of the 3D silicone Molding Simulation Tool"; actas de la 5ª Conferencia europea sobre dinámica computacional de fluidos ECCOMAS CFD 2010, Lisboa, Portugal, junio de 2010.
[10] L. Matysiak, *et al.*, "Analysis and Optimization of the Silicone Molding Process Based on Numerical Simulations and Experiments, Advances in Polymer Technology". vol. 32, nº S1, págs. E258–E273, 2013.

Lecturas recomendadas

eRAMZES: Una innovación en las simulaciones por ordenador avanzadas, *ABB Review* 01/2013



Shake, rattle and roll

Resistencia sísmica de los equipos y reducción del ruido mediante simulaciones del diseño

ROBERT PŁATEK, GRZEGORZ JUSZKIEWICZ, MICHAŁ KOZUPA, GRZEGORZ KMITA, PER LINDHOLM, ROMAIN HAETTEL, MUSTAFA KAVASOGLU, ANDERS DANERYD, JOHAN EKH – Actualmente, para evaluar a fondo los sistemas eléctricos complejos, se deben realizar una serie de pruebas para ajustar y optimizar el diseño y conseguir un rendimiento óptimo. Antes de su entrega, los productos y sistemas se deben verificar en una serie de condiciones operativas y ambientales para determinar sus límites. Un aspecto importante en el diseño de productos eléctricos es el ruido y la vibración. Teniendo en cuenta que los productos eléctricos de ABB deben presentar un bajo nivel de ruido y una elevada resistencia sísmica, es crucial demostrar que el diseño es eficiente y fiable, y que además satisfará las especificaciones de los clientes y las normativas medioambientales.

La fiabilidad y la seguridad de los sistemas eléctricos, especialmente en zonas propensas a los terremotos, dependen de la resistencia sísmica de sus componentes.

Las cargas sísmicas son algunas de las cargas dinámicas que pueden afectar a los edificios, pero también a los dispositivos eléctricos. La escala de Richter, como una medida de la intensidad de los terremotos, no facilita información sobre el movimiento del suelo, que depende de las frecuencias de las ondas de superficie y las propiedades del subsuelo, etc. La fiabilidad y la seguridad de los sistemas eléctricos, especialmente en zonas propensas a los terremotos, dependen de la resistencia sísmica de sus componentes. Los terremotos devastadores pueden tener un impacto directo en la industria eléctrica y, en consecuencia, todos los productos eléctricos que funcionen en zonas sísmicamente activas, se deberán diseñar y probar de forma que se garantice un elevado rendimiento sísmico.

La fabricación de productos eléctricos a prueba de terremotos no es tarea fácil. No obstante, la experiencia acumulada durante décadas por ABB en este campo le ayuda a entender la naturaleza de los fenómenos sísmicos. Se realizan análisis eficientes de cargas sísmicas, basados en las normas del sector, con el fin de desarrollar enfoques innovadores para este tipo de problemas.

Normas y pruebas sísmicas

Los dos principales grupos de normas internacionales que se utilizan en la investigación del rendimiento sísmico son IEEE 693 [1] e IEC 61463 [2]. IEEE 693-2005, “Práctica recomendada para el diseño sísmico de subestaciones”, es un documento recién revisado sobre los procedimientos de cualificación de los equipos de subestaciones eléctricas para distintos niveles de rendimiento sísmico. La IEEE 693 recomienda encarecidamente realizar la calificación del equipo con éste colocado sobre la estructura de apoyo que se usará en la subestación final. El ensayo de vibración de las bornas ha demostrado el buen comportamiento de estos componentes en cuanto a la respuesta general según la norma IEEE 693 → 1. Aunque los ensayos de vibración están muy recomendados para la calificación sísmica de componentes críticos, los análisis numéricos pueden ser muy útiles para determinar la resistencia sísmica de estos productos. Además, en algunos casos en que es imposible realizar pruebas debido al enorme peso de los equipos, por ejemplo, en el caso de los transformadores de potencia, el análisis numérico es la única manera de determinar las características dinámicas del sistema.

Cuando no es posible realizar pruebas de vibración debido al enorme peso del equipo, el análisis numérico es la única manera de determinar las características dinámicas del sistema.

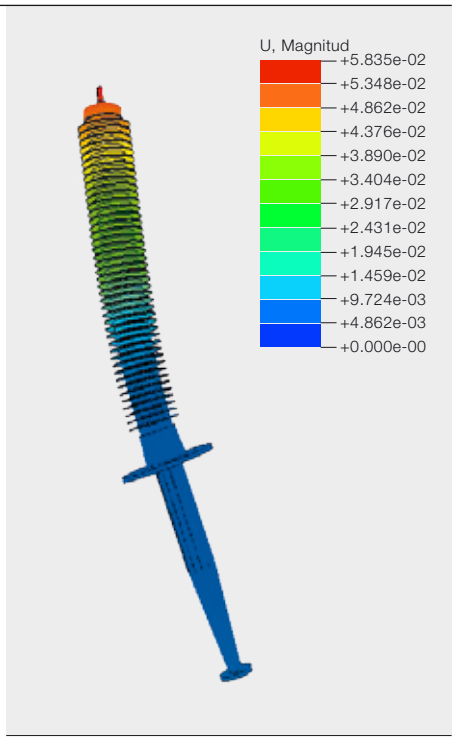
Métodos de modelado para los análisis sísmicos

En la verificación sísmica de los equipos eléctricos se utilizan diferentes análisis. Estos métodos suelen consistir en cálculos estáticos que estiman las fuerzas

Imagen del título
La resistencia sísmica y la disminución del ruido ambiental de los productos eléctricos se están mejorando gracias al análisis numérico.

1 Prueba física y simulada de una borna RIP de 230 kV

1a Borna RIP de 230 kV sometida a prueba sísmica



1b Primer modo de frecuencia natural calculado de la borna

generadas durante un episodio sísmico de una determinada aceleración del suelo y, a continuación, las comparan con la capacidad del equipo. En el caso de las estructuras rígidas, siendo las frecuencias naturales más bajas superiores a 30 Hz, no se utiliza ningún factor de amplificación del movimiento del suelo y la mayor carga es igual a la aceleración del suelo, por lo que se puede utilizar una evaluación estática. Sin embargo, las estructuras más grandes tienen normalmente frecuencias naturales inferiores a 30 Hz. El método más utilizado para calcular la carga sísmica es el análisis del espectro de respuestas, en el que se suman las respuestas de diferentes modos propios en los diseños estructurales. Se basa en un análisis modal de las frecuencias naturales y los modos propios de la estructura. Otro método popular es la simulación de "ritmo sinusoidal" donde la estructura se construye mediante una serie de ondas sinusoidales con una frecuencia igual a las primeras frecuencias naturales inferiores a 33 Hz. El siguiente paso en este método de ámbito temporal es el "historial temporal" en el que la estructura se somete a cargas de aceleración aleatorias de al menos 20 segundos, que se corresponden con la definición del espectro. A continuación, se analizan las deformaciones, las distorsiones y las tensiones y, posteriormente, se evalúa la resistencia sísmica. La metodología aplicada a las bornas sísmicas de tipo RIP (papel impregnado de resina) muestra el potencial de predecir la aceleración y el desplazamiento relativos con una buena precisión para las cualificaciones sísmicas [3]. No obstante, si se pretende avanzar, es vital adquirir conocimientos de las interacciones sísmicas entre los equipos y los fluidos de la subestación.

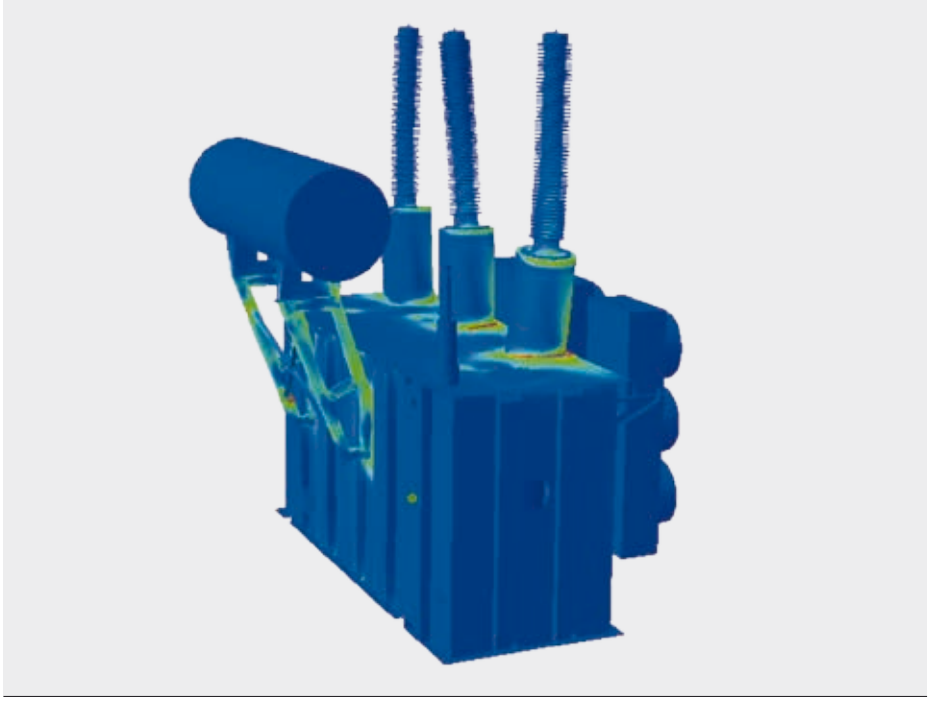
Actualmente, la limitación de la contaminación acústica es una cuestión de importancia creciente en todo el mundo.

Retos del modelado sísmico

Numerosos especialistas afirman que la respuesta sísmica del sistema transformador-borna se puede complicar interconectando los componentes [4, 5]. Además, el equipo instalado puede provocar daños como resultado de las conexiones de instalación (tornillos, remaches, soldaduras). Por lo tanto, las pruebas sísmicas de bornas con un bastidor rígido no tendrán en cuenta todas las situaciones críticas y será necesario continuar investigando. Las simulaciones realizadas del tanque de un transformador y sus componentes muestran que, en el caso de los análisis sísmicos integrales, se debe considerar el conjunto del sistema transformador-borna → 2. Además, en el caso de los productos eléctricos que contengan fluidos (aceite), se deberá verificar su influencia en las cargas sísmicas. Una mayor potencia de cálculo significa que se puede incrementar la complejidad de los modelos estructurales para que incluyan una combinación de descripciones geométricas más detalladas o multifísica. Para analizar la influencia de un fluido en las características dinámicas, se realizó una investigación empleando la interacción fluido-estructura (FSI). El enfoque FSI se basa en el intercambio de datos entre las herramientas de simulación que modelan el flujo de fluidos y el comportamiento mecánico. En la dinámica de fluidos computacional (CFD), el tanque lleno de fluido se modela mientras que, en los cálculos estructurales, solo se considera la estructura. El código CFD es responsable del cálculo del flujo del fluido. Como resultado, las fuerzas sobre las paredes de la estructura se facilitan al código estructural y se utilizan como cargas y condiciones de frontera. La nueva forma de la

Para predecir los niveles acústicos con la precisión suficiente en las etapas iniciales del diseño del producto es esencial elegir la estrategia de control acústico más adecuada.

2 Distribución de esfuerzos en el transformador completo durante el análisis sísmico.



estructura se remite a la CFD donde la actualización de la malla se prepara para el siguiente incremento de tiempo. El resultado es que es posible visualizar las tensiones, distorsiones y deformaciones en la estructura, teniendo en cuenta la dinámica de fluidos.

Vibroacústica

Actualmente, la limitación de la contaminación acústica es una cuestión de importancia creciente en todo el mundo. Por lo tanto, es imperativo que, en el diseño de productos eléctricos, se tengan en cuenta unos niveles bajos de sonido y vibraciones que cumplan las especificaciones de los clientes o las normas medioambientales. Por lo tanto, para predecir los niveles acústicos con la precisión suficiente en las etapas iniciales del producto es esencial elegir la estrategia de control acústico más adecuada.

Generación de ruido

El mecanismo específico asociado a la generación de ruido y vibraciones de muchos productos de ABB se explica mediante la cadena de conversión de la energía → 3. El procedimiento de conversión de la energía constituye un fenómeno típico multifísico de electromagnetismo, mecánica y acústica. La interacción entre la corriente alterna y los campos magnéticos asociados da lugar a diversas fuerzas que generan vibraciones estructurales, que finalmente se irradian como sonido. El mecanismo multifísico descrito se puede observar en numerosos productos de ABB, como los transformadores o los condensadores. Debido a la relativa complejidad de estos productos, suele ser necesario emplear herramientas de predicción avanzadas para describir con precisión las interacciones de los diversos parámetros de diseño y el acoplamiento entre los campos físicos. Los análisis numéricos son la herramienta clave, ya que permiten comprender los problemas de generación acústica y desarrollar soluciones eficientes de reducción del ruido.

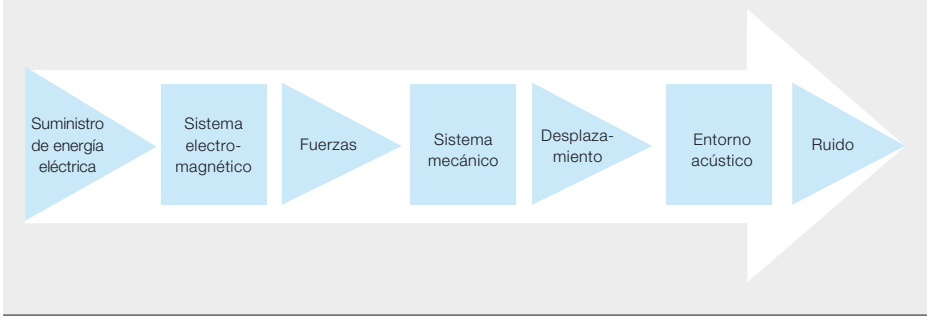
Los análisis numéricos son la herramienta clave, ya que permiten comprender los problemas de generación acústica y desarrollar soluciones eficientes de reducción del ruido.

Ejemplos de simulación vibroacústica

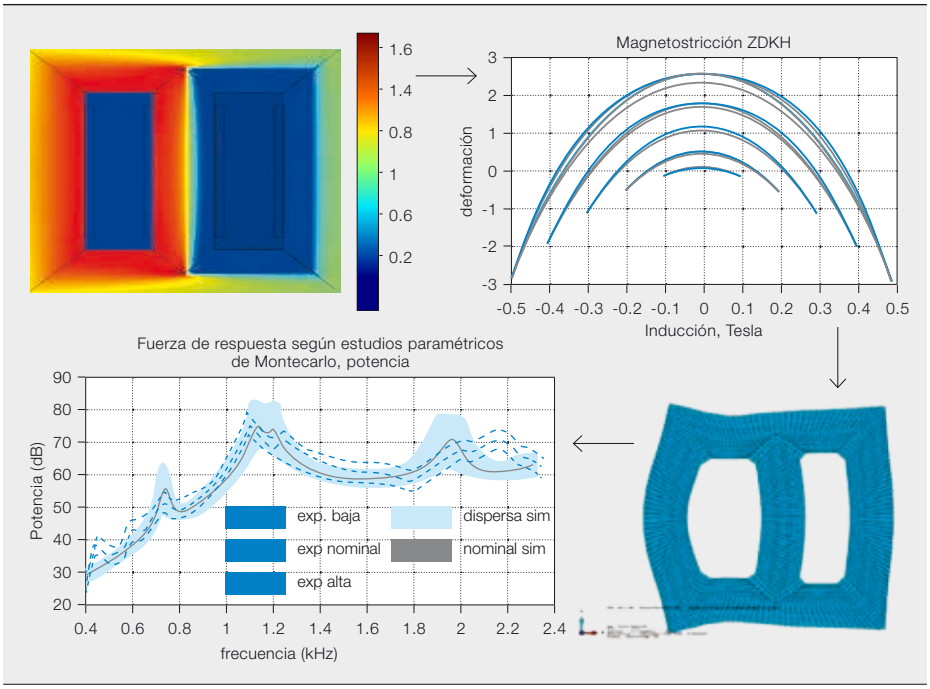
En los centros de investigación de ABB se utilizan métodos de elementos finitos y de frontera para simular el comportamiento vibroacústico de diversos productos de la empresa. El típico ejemplo de simulaciones multifísicas y multiescala es la generación de ruido en transformadores eléctricos en baño de aceite, donde se pueden distinguir dos fuentes concretas de generación de ruido: ruido del núcleo (conocido normalmente como “ruido sin carga”) y ruido del devanado (conocido normalmente como “ruido de carga”).

Tras aplicar corriente a los devanados del transformador, se genera un flujo magnético en el núcleo. El llamado acero eléctrico de grano orientado, que es el material principal de los núcleos de los transformadores, tiene una propiedad característica anisótropa no lineal denominada magnetostricción, que significa esencialmente un cambio dimensional del núcleo debido al flujo magnético alterno o rotacional puntual [6]. Estas fuerzas de magnetostricción dependientes de la frecuencia provocan vibraciones en el núcleo que se traducen en ruido sin carga. La densidad del flujo magnético en el núcleo, la tensión de magnetostricción debida a los diferentes niveles de densidad del flujo, la forma típica de deformación de la estructura del núcleo del transformador y, finalmente, los niveles de potencia acústica,

3 Cadena de conversión de la energía desde la alimentación eléctrica hasta el sonido



4 Predicción del ruido en el núcleo y validación del núcleo a escala de laboratorio



Este sencillo modelo predecirá el ruido producido por los condensadores in situ con una precisión de ±1,5 dB, mucho antes de que se fabriquen los componentes.

que presentan un buen acuerdo con los niveles medidos, se muestran en ➔ 4.

El ruido de carga aparece por la interacción entre el campo de dispersión y el flujo de la corriente en el bobinado, que produce las fuerzas de Lorentz que inducen vibraciones en el bobinado [7, 8].

La vibración del núcleo y el devanado se transmiten a través del aceite aislante, los soportes centrales y las estructuras de sujeción, llegando a las paredes del tanque donde finalmente se irradian al aire circundante en forma de ruido. Esta vibración del tanque se puede relacionar con la potencia acústica emitida mediante el cálculo de la intensidad acústica de la superficie.

En ➔ 4 se presenta un enfoque típico para un producto del tipo de un transformador. El procedimiento se inicia con los cálculos electromagnéticos que permiten obtener las fuerzas mecánicas aplicadas a la estructura. Para obtener una imagen apropiada de la vibración en el tanque es vital conocer la trayectoria estructura-fluido-estructura, que incluye la interacción y los fenómenos que tienen lugar en el propio aceite. Un modelo de vibración bien definido de las superficies exteriores no solo facilita un patrón apropiado de la radiación acústica, sino que también aporta información sobre zonas de gran amplitud con potencial de amortiguación.

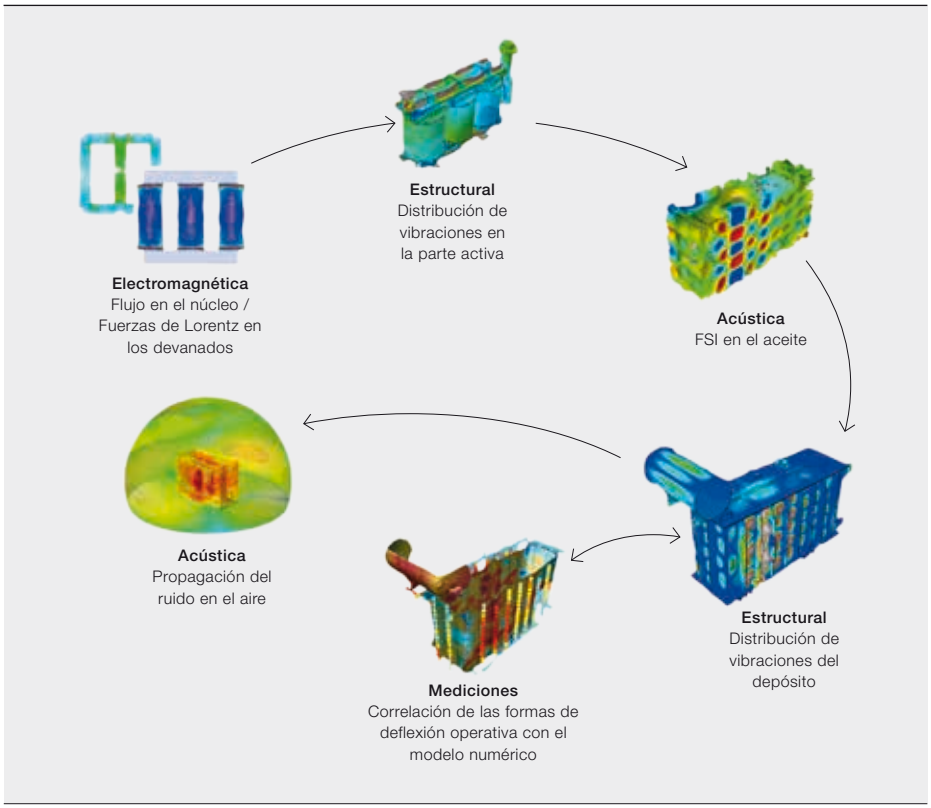
Un modelo de vibración bien definido aporta información sobre zonas de gran amplitud con potencial de amortiguación.

Los condensadores eléctricos de alta tensión utilizados en los compensadores estáticos VAR y las plantas HVDC (corriente continua de alta tensión) constituyen una importante fuente de ruido. Por lo tanto, se ha desarrollado una herramienta de predicción para calcular el ruido generado por los condensadores. La función de transferencia entre la tensión de entrada y la potencia acústica se puede calcular analíticamente describiendo el condensador como un haz de oscilación longitudinal sometido a la alternancia de las fuerzas de Coulomb. Este sencillo modelo, en combinación con los espectros de la corriente del servicio estimado de la central eléctrica prevista, servirá para predecir el ruido producido por los condensadores in situ con una precisión de ±1,5 dB, mucho antes de que se fabrique ningún componente.

Validación experimental vibroacústica

Un análisis completo de cualquier sistema estructural en el que la respuesta acústica sea la salida se deberá iniciar con un análisis modal operativo preciso y una buena correlación con los valores propios del sistema derivados de los

5 Desarrollo de herramienta de predicción multifísica



datos de las pruebas reales. Para obtener una primera validación detallada se deberá disponer de medidas realizadas en un entorno controlado en modelos a escala bien diseñados y sometidos a una excitación realista. Para finalizar el procedimiento de validación, una vez realizadas y comprendidas perfectamente las pruebas de laboratorio, hay que hacer un plan minucioso de mediciones complementarias en productos a escala real. Las técnicas de medición avanzada, como la vibrometría láser Doppler (VLD), pueden ser de utilidad en este procedimiento. La técnica VLD es capaz de facilitar patrones de vibración en 3-D del transformador durante las condiciones de carga o sin carga, generando las denominadas formas de deflexión operativas (ODS) ➔ 5 [9]. Los patrones ODS se pueden comparar directamente con el análisis numérico y, si es necesario, se pueden realizar algunas mejoras en el modelo.

Tras el shock

Las herramientas de predicción actuales, como el software multifísico combinado con la potencia de cálculo, permiten realizar estudios detallados y eficientes que muestran las interacciones complejas de los parámetros de diseño y los efectos de las propiedades de los materiales en los niveles de potencia acústica. Los modelos numéricos debidamente correlacionados constituyen la base de la construcción de "prototipos virtuales", lo que significa que los productos y sistemas se pueden probar y mejorar virtualmente sin necesidad de producir prototipos "tangibles". Estas simulaciones numéricas son a menudo una parte invisible, pero esencial, de las medidas destinadas a reducir la contaminación acústica y garantizar la continuidad del suministro eléctrico, permitiendo a los usuarios trabajar y dormir en paz. Incluso si la tierra se mueve.

Robert Płatek
Grzegorz Juszkiewicz
Michał Kozupa
Grzegorz Kmita
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
robert.platek@pl.abb.com
grzegorz.juszkiewicz@pl.abb.com
michal.kozupa@pl.abb.com
grzegorz.kmita@pl.abb.com

Per Lindholm
Romain Haettel
Mustafa Kavasoglu
Anders Daneryd
Johan Ekh
ABB Corporate Research
Västerås, Suecia
per.o.lindholm@se.abb.com
romain.haettel@se.abb.com
mustafa.kavasoglu@se.abb.com
anders.daneryd@se.abb.com
johan.ekh@se.abb.com

Frank Cornelius
ABB Dry Transformer Development Center
Brilon, Alemania
frank.cornelius@de.abb.com

Referencias

[1] Práctica recomendada para el diseño sísmico de subestaciones de IEEE, norma IEEE 693–2005, 2005.
[2] "Bornas: cualificaciones sísmicas", IEC 61463, Informe técnico II, Luglio, 1996.
[3] J. Rocks *et al.*, "Seismic response of RIP-transformer bushing" en Insulator News & Market Report (INMR), Congreso mundial sobre aisladores, supresores de sobretensiones y bornas, Brasil, 2007.
[4] A. Filiatrault *et al.*, "Experimental seismic response of high-voltage transformer-bushing systems", Earthquake Spectra, vol. 21, págs. 1009–1025, noviembre de 2005.
[5] S. Ersoy and M. A. Saadeghvaziri, "Seismic response of transformer-bushing systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, págs. 131–137, 2004.
[6] P. L. Timar, Noise and Vibration of Electrical Machines. Nueva York, NY: Elsevier, 1989.
[7] M. Kavasoglu et al., "Prediction of transformer load noise"; actas de la Conferencia COMSOL, París, 2010.
[8] R. S. Girgis *et al.*, "Comprehensive analysis of load noise of power transformers", IEEE Power Energy Society General Meeting, 2009, págs. 1–7.
[9] M. Hrkac *et al.*, "Vibroacoustic behavior of SPT transformer"; Coloquio internacional de investigación de transformadores y gestión de activos CIGRE, 2012.

Consejo de redacción

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

Clarissa Haller
Responsable de comunicaciones corporativas

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 © 2013
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|13

Centros de datos

Los ordenadores e Internet no sólo están transformando la forma de trabajar y de relacionarse de los seres humanos, sino que además continúan evolucionando a un ritmo asombroso, con aparición de nuevas aplicaciones y renovación total de las existentes. Mientras que el progreso de la informática se ha descrito en el pasado en términos puramente estadísticos, como la ley de Moore, el progreso actual se materializa de forma mucho más tangible en el paisaje cambiante de los servicios en línea, desde los medios sociales hasta la banca o el comercio electrónicos. Los consumidores asumen sin dificultad que estos servicios en línea se centran en las interfaces y la facilidad de uso. Pero lo que ve el usuario no es sino la punta del iceberg. Los centros de datos de todo el mundo están continuamente procesando e intercambiando información y respondiendo a demandas cada vez más exigentes.

El número 4/2013 de *ABB Review* estará dedicado a los centros de datos y a explorar la contribución de ABB a su apasionante evolución.

ABB Review en tabletas

Ya hay una versión de *ABB Review* para tabletas. Puede verla 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*. Suscríbase a las alertas de *ABB Review* en http://www.abb.com/abbreview

Colocar aquí una etiqueta con la dirección

¿Aumentar la eficiencia energética un 25%?

Una solución completa de sistemas eléctricos y de automatización de ABB ha permitido a la mayor planta de aluminio de Europa aumentar su eficiencia energética un 25% y al mismo tiempo incrementar su productividad. Enfocando nuestra investigación y desarrollo en mejorar el rendimiento y en la conservación de los recursos, trabajamos de forma continua para ahorrar energía y dinero. Y conservar el medio ambiente. **www.abb.com/betterworld**

Por supuesto.

Power and productivity
for a better world™

ABB