

## Artículo del mes

# Pruebas de diagnóstico de los transformadores con aislamiento de resina fundida

### Autores

Michael Krüger, OMICRON, Austria | michael.krueger@omiconenergy.com

Christoph Engelen, OMICRON, Austria | christoph.engelen@omiconenergy.com

### Fecha de publicación

Mayo 2018

### Área de aplicación

Las pruebas de diagnóstico en los transformadores tipo seco

### Palabras clave

Cast resin transformer, induced voltage testing, partial discharge measurement

### Resumen

Este artículo describe cómo realizar las pruebas de diagnóstico en los transformadores tipo seco. Los transformadores aislados con resina fundida se utilizan ampliamente en lugares sujetos a estrictas normas de protección frente a riesgos de incendio y protección ambiental. La causa más común de las fallas de estos transformadores es la ruptura eléctrica del aislamiento de resina fundida entre las espiras o partes de los devanados. En muchos casos, se producen descargas parciales (DP) antes de que ocurra la falla. Mediante pruebas de los devanados con tensión inducida, en combinación con una medición sensible de las DP, puede minimizarse el riesgo de cortes de suministro imprevistos. Se tratan aquí mediante casos prácticos los métodos para realizar en sitio la prueba de tensión inducida con equipos portátiles y con instrumentos digitales de DP para la reducción de las perturbaciones.

## Pruebas de diagnóstico de los transformadores con aislamiento de resina fundida



### Introducción

Los transformadores con aislamiento de resina fundida empezaron a desarrollarse hace muchas décadas debido a la inflamabilidad del aceite mineral y el riesgo de derrames de aceite contaminantes del terreno. Desde entonces, se han desarrollado mucho las tecnologías del transformador de resina fundida y se utilizan ahora ampliamente en aplicaciones en las que la seguridad es de gran importancia, tal como en edificios, aplicaciones industriales o zonas ecológicamente sensibles, como las de agua subterránea protegida. La potencia y la tensión nominal de los transformadores con aislamiento de resina fundida han aumentado en los últimos años. Hoy en día, se construyen transformadores de resina fundida de hasta 72,5 kV y más de 60 MVA. También pueden estar equipados con cambiadores de tomas bajo carga (OLTC, “On-Load Tap Changers”).

Aunque se considera que los transformadores aislados con resina fundida no necesitan mantenimiento, se piden cada vez más a menudo mediciones periódicas de diagnóstico, en particular cuando las interrupciones del suministro eléctrico podrían tener un alto costo consecuente. Algunas compañías aseguradoras ofrecen tarifas más baratas cuando se reduce al mínimo mediante mediciones periódicas de diagnóstico el riesgo de interrupciones del suministro eléctrico. En el caso de los transformadores con aislamiento de resina fundida, las herramientas de diagnóstico son limitadas. Durante la fabricación, se realizan las siguientes pruebas de rutina según la norma IEC 60076-11 [1]:

- Medición de la relación de transformación
- Medición de la resistencia de CC del devanado

- Medición de la relación de tensión y del desplazamiento de fase
- Medición de la impedancia en cortocircuito
- Medición con carga y sin carga
- Prueba de tensión aplicada
- Prueba de tensión no disruptiva de CA inducida
- Medición de descargas parciales ( $U_m > 3,6$  kV, nivel de aceptación 10 pC)

Para determinar el estado del transformador directamente en sitio solamente puede aplicarse un limitado número de procedimientos de prueba. A la hora de evaluar el estado del aislamiento, no son adecuados los métodos de prueba habitualmente realizados en los transformadores de aceite por lo general. Por ejemplo, un análisis del gas disuelto en el aceite (DGA) no es aplicable a los transformadores de resina. Por otro lado, la medición del factor de potencia/disipación en el caso de los transformadores de resina se ve altamente afectada por las condiciones ambientales. Por lo tanto, las mediciones de las descargas parciales (DP) ofrecen la información más valiosa sobre el estado del aislamiento. En el apartado siguiente se describe la prueba de tensión inducida realizada en sitio en los transformadores de resina, combinada con las mediciones de DP.

### **Medición de descargas parciales**

En las mediciones de descargas parciales (DP) la frecuencia de la tensión de prueba debe ser superior a la frecuencia nominal para evitar una excesiva corriente de excitación durante la prueba.

La causa más común de las fallas de estos transformadores es la ruptura eléctrica del aislamiento de resina fundida entre las espiras o partes de los devanados. En muchos casos, se producen descargas parciales antes de que ocurra la falla. Mediante pruebas de los devanados con tensión inducida, en combinación con una medición sensible de las DP, puede minimizarse el riesgo de fallas imprevistas.

Para las pruebas en sitio de DP en transformadores de resina fundida es necesario una fuente de tensión con la potencia adecuada. La frecuencia de la tensión de salida debe ser superior a la frecuencia nominal del transformador para evitar corrientes magnetizantes excesivas. Con el fin de minimizar la alimentación requerida, la fuente debe proporcionar una tensión de salida de frecuencia variable. La inductancia principal del núcleo magnético, la capacitancia del devanado de alta tensión y el condensador de acoplamiento constituyen un circuito resonante paralelo. La frecuencia de la tensión de prueba debe estar ajustada a la frecuencia de resonancia de este circuito resonante paralelo para reducir la alimentación necesaria al nivel más bajo. Si la frecuencia de resonancia es demasiado alta, se puede conectar un condensador adicional al devanado de baja tensión para reducir la frecuencia hasta el límite superior de 500 Hz según la norma IEC 60060-3 [2]. La figura 1 muestra la configuración con el equipo CPC 100: una fuente de tensión compacta con un peso de 30 kg / 66 libras.

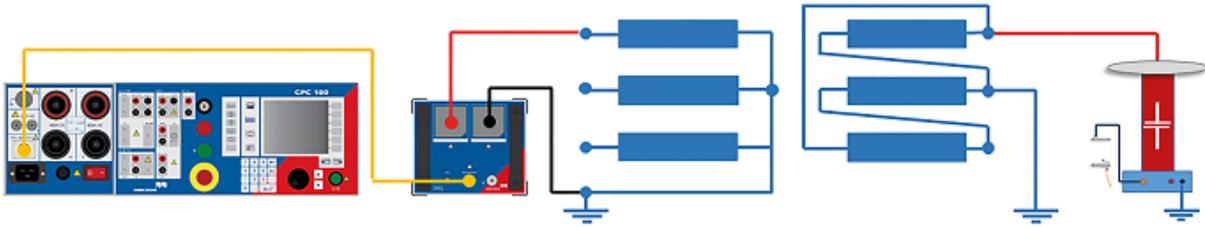


Figura 1. La unidad CPC 100 con transformadores de adaptación

El amplificador incorporado puede proporcionar hasta 5 kVA a frecuencias de 15 a 400 Hz. Tiene un diseño de "conmutación suave" para evitar las perturbaciones de los semiconductores de conmutación. Con un transformador de adaptación adicional, la tensión de salida del amplificador puede adaptarse a la tensión de excitación requerida del lado de baja tensión del transformador. Este transformador de adaptación universal puede producir tensiones de 50 V a 400 V en pasos de 50 V (a frecuencias de 100 Hz o más) y hasta 800 V (a frecuencias de 200

Hz o más). Durante la prueba de aceptación en fábrica (FAT), se utilizan generadores trifásicos como fuente de tensión. Para comprobar en sitio la integridad de las bobinas, es suficiente probar cada fase individualmente mediante una excitación monofásica. En el peor de los casos una subida de tensión por encima de la tensión nominal puede dar lugar a actividad de DP que continua incluso después de regresar a la tensión de servicio nominal. Superar la tensión nominal durante las pruebas ayuda a identificar dicha actividad de DP y clasificar su gravedad. Según [1], durante las pruebas de aceptación (FAT) se aplica una tensión de preestrés durante 30 s. A continuación, se aplica la tensión de prueba durante 3 minutos adicionales. En sitio, se pueden utilizar estas duraciones del ciclo de prueba o concertar un ciclo adaptado. Para evitar interrupciones no deseadas de los transformadores más antiguos, solo deben realizarse pruebas de alta tensión con tensiones más bajas que las aplicadas en los transformadores nuevos en fábrica. La experiencia en el campo ha demostrado que tensiones de hasta el 130% de la tensión nominal constituyen un buen compromiso para encontrar fallas de DP sin estresar demasiado la bobina.

Pueden comprobarse transformadores de potencia de hasta 3 MVA utilizando una alimentación de prueba de 5 kVA. Con el CPC 100, la impedancia de todo el circuito de prueba se puede medir en amplitud y ángulo de fase (figura 2). Si la frecuencia se ajusta a la impedancia máxima (curva roja), se reduce al mínimo la alimentación de prueba requerida.

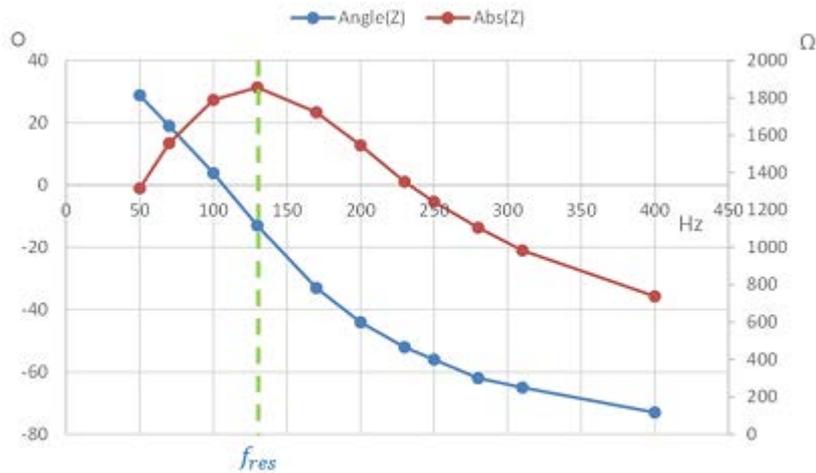


Figura 2. Impedancia del circuito de prueba en función de la frecuencia

Si la alimentación necesaria para energizar el transformador excede la potencia de una unidad CPC 100, hasta tres unidades pueden funcionar en paralelo (figura 3). Una unidad CPC 100 funciona como unidad maestra y las otras dos en un modo sincrónico como unidades esclavas. Juntas pueden proporcionar 15 kVA a través de tres conectores de 230V/16A. Con este sistema de prueba portátil pueden probarse directamente en sitio transformadores de resina fundida de hasta 25 MVA.

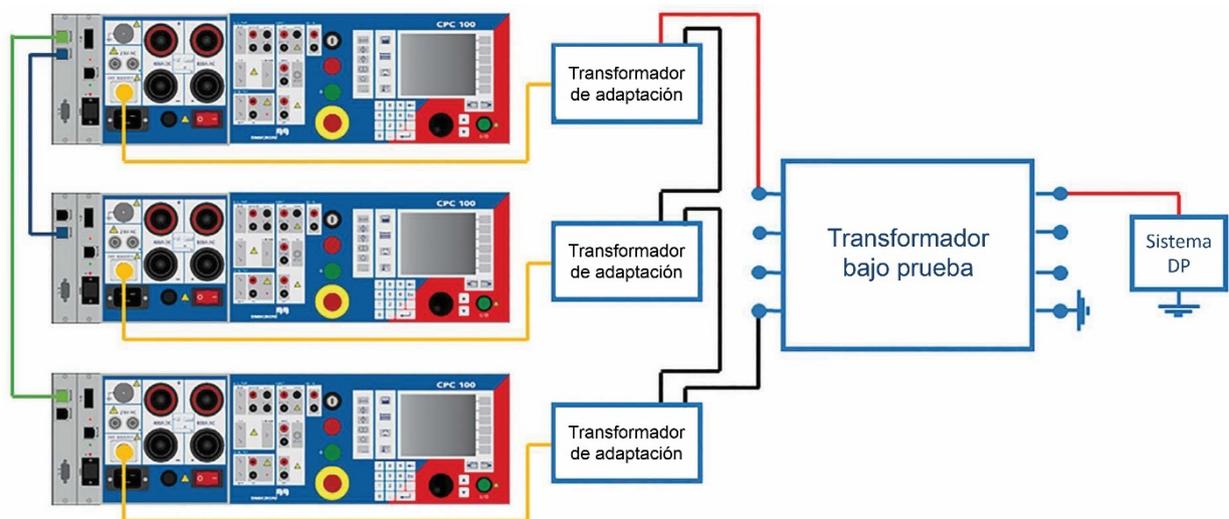


Figura 3. Sistema de pruebas de 15 kVA con tres unidades CPC 100



## Casos prácticos

### Caso 1

Se realizó una medición de DP en un transformador de resina fundida de 3,5 MVA con una tensión nominal de 30kV. La figura 6.1 muestra el diagrama de "DP resuelto en fase" (PRPD) a 40 kV. El ruido era aproximadamente 8 fC. El análisis con el diagrama 3CFRD se muestra en la figura 6.2. La señal filtrada (figura 6.3) muestra un claro patrón de descargas internas en vacío [4] con 6 pC, aunque las DP están por debajo del nivel de ruido. La tensión de extinción era superior a 36kV que es un 20% mayor que la tensión nominal. La conclusión es que no había fuentes de DP activas en el transformador durante el servicio normal.

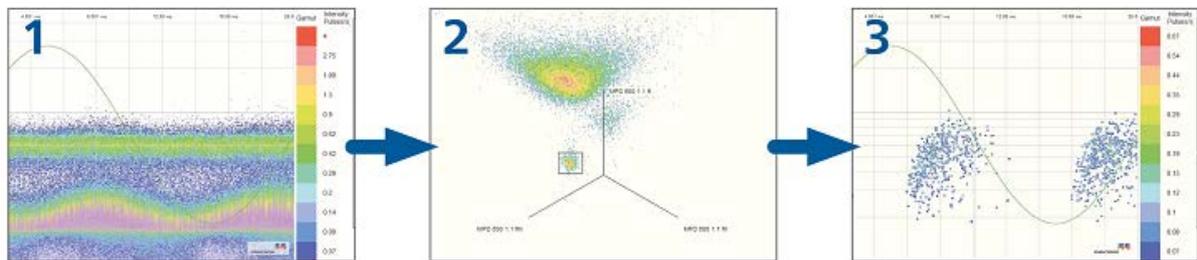


Figura 6. (1) PRPD sin filtrado 3CFRD con interferencia, (2) Diagrama de estrella con agrupamiento de ruido (agrupamiento superior) y agrupamiento de DP (marcado), (3) Patrón de DP de vacíos con filtrado 3CFRD

### Caso 2

Después de una falla monofásica de un transformador de resina de 2,5 MVA (figura 7) se investigó si los dos devanados restantes también se habían dañado. Se realizó una medición de las descargas parciales en ambos devanados exteriores al 130% de la tensión nominal para demostrar que estos devanados estaban libres de DP. No se detectaron DP por encima del nivel de ruido de 15 pC. Se decidió entonces reemplazar el devanado defectuoso y volver a poner el transformador en servicio.



Figura 7. Falla por rotura en transformadores aislados con resina fundida

La figura 8 muestra los resultados de medición de DP de fase B después de instalar el nuevo devanado en el transformador. Durante la medición en sitio de DP se midieron señales de interferencia de 17 pC. El único agrupamiento visible estaba relacionado con el ruido ambiental. En este caso se utilizó el así llamado 3CFRD inverso. Se seleccionó y filtró el único agrupamiento visible (figura 8.2). En lugar de mostrar los impulsos relacionados con este agrupamiento, se mostraron los impulsos restantes fuera de este agrupamiento. La figura 8.3 muestra el principio inverso de filtrado 3CFRD estando seleccionado el agrupamiento de ruido. Puede verse que no son visibles otros impulsos, lo que suscita la conclusión de que la nueva bobina instalada no presenta DP medibles. El filtrado 3CFRD inverso debe realizarse cuidadosamente para evitar filtrar ninguna señal de PD.

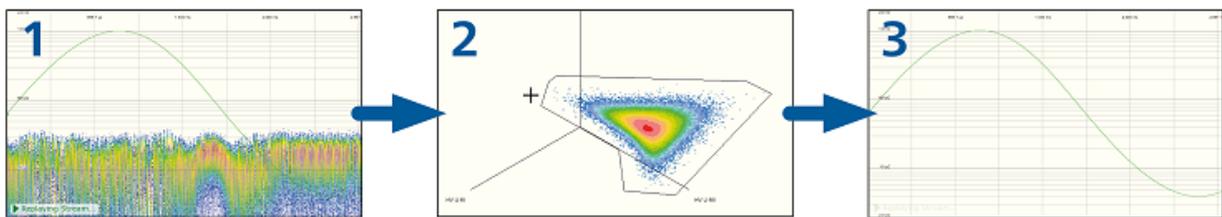


Figura 8. (1) Medición de DP sin filtrar, (2) Selección de agrupamientos 3CFRD, (3) PRPD con filtrado 3CFRD inverso

### Caso 3

En una red industrial de 20 kV todos los cables estaban equipados con acopladores de DP de alta frecuencia en las terminaciones para realizar las mediciones semestrales de supervisión de rutina en la red entera, incluyendo los cables y los transformadores. Durante una prueba de rutina de supervisión se detectaron descargas parciales en una de las terminaciones de cable. Para averiguar si las DP estaban en el cable o en el transformador conectado, se realizó una medición de DP fuera de línea. El cable no presentaba DP pero el transformador sí. La figura 9 muestra la configuración de una medición de DP en el transformador en prueba. Se detectaron DP en todas las fases que presentaban patrones típicos de vacíos internos con niveles de descarga de hasta 101 pC (figura 10). Se observó que la tensión de inicio era  $1,0 \times U_n$ . La tensión de extinción era inferior a la tensión nominal ( $0,6 \times U_n$ ) en las tres fases. Esto significa que el transformador tiene continuas descargas parciales durante su funcionamiento y debe reemplazarse. En consecuencia, el operador decidió sustituir el transformador por completo.



Figura 9. Configuración de medición de DP en un transformador con aislamiento de resina fundida de 20 kV / 2 MVA

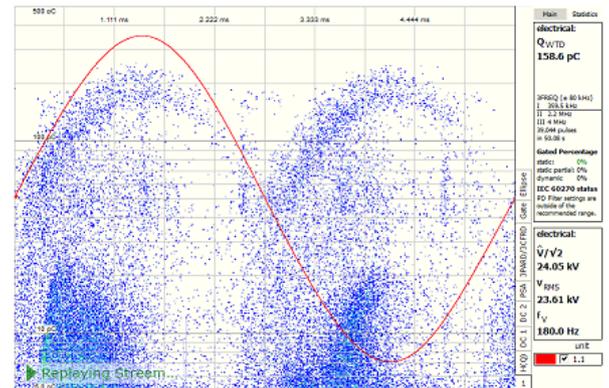


Figura 10. Resultados de la medición de DP

#### Caso 4

Se realizaron mediciones de DP en un transformador aislado con resina fundida de 30 kV / 6 kV / 17 MVA. La figura 11 muestra la configuración de prueba aplicada. Para energizar el lado de 6 kV del transformador se necesitó un transformador elevador de tensión adicional. Tres unidades CPC 100 sincronizadas proporcionaron la alimentación de 10 kW necesaria para excitar una fase de ambos transformadores. La tensión de prueba de  $1,3 \times U_n$  se aplicó durante 60 s tal como se concertó en sitio. La figura 12 muestra el resultado de la medición de DP de la fase B, que no presentaba impulsos de DP por encima del nivel de ruido de 8 pC.



Figura 11. Medición de DP en un transformador de resina de 17 MVA usando tres unidades CPC 100

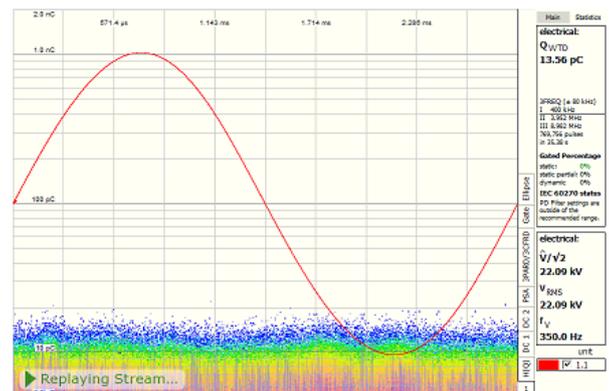


Figura 12. Resultados de la medición de DP en la fase B

## Conclusiones

Las pruebas en sitio con tensión inducida en combinación con mediciones de descargas parciales es una poderosa herramienta para evaluar el estado del aislamiento de resina fundida de este tipo de transformadores.

Para llevar a cabo la medición, se necesita una fuente de tensión de frecuencia variable. Según el consumo de energía, pueden sincronizarse hasta tres unidades CPC 100 de OMICRON. Al hacerlo, se puede aumentar la alimentación de salida hasta 15 kVA. Dependiendo del diseño del transformador y la tensión de prueba requerida, pueden medirse transformadores de potencia de hasta 25 MVA utilizando esta funcionalidad de sincronización. No obstante, ésta sigue siendo una solución flexible y portátil para pruebas en sitio, ya que todos los componentes necesarios pesan menos de 30 kg / 66 libras cada uno.

Por lo general, diferentes tipos de fuentes de ruido están presentes durante las mediciones en el sitio. Por lo tanto, el instrumento digital de DP ofrece varias formas de lidiar con las grandes perturbaciones. El así llamado método 3CFRD constituye una herramienta probada para filtrar el ruido y separar las diferentes fuentes de DP. Evaluando los niveles de las descargas obtenidos con tres ajustes de frecuencia diferentes puede minimizarse la influencia de las fuentes de ruido y evaluarse individualmente cada fuente de DP.

## **Bibliografía**

- [1] IEC 60076-11 "Transformadores de potencia – Parte 11: Transformadores de tipo seco", Comisión Electrotécnica Internacional, Ginebra 2004
- [2] IEC 60060-3 "Técnicas de pruebas de alta tensión - Parte 3: Definiciones y requisitos para las pruebas in situ", Comisión Electrotécnica Internacional, Ginebra 2006
- [3] K. Rethmeier, A. Obralic, A. Kraetge, M. Krüger, W. Kalkner , R. Plath. "Supresión mejorada del ruido mediante el análisis en tiempo real de la forma de onda de los impulsos de DP y de las perturbaciones en forma de impulso", International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Ciudad del Cabo 2009
- [4] Cigré 676 "Descargas parciales en transformadores", grupo de trabajo D1.29, Cigre 2017

## **Destacados**

"Dependiendo del diseño del transformador y la tensión de prueba requerida, pueden medirse transformadores de potencia de hasta 25 MVA utilizando esta funcionalidad de sincronización"

"Una posibilidad para separar las señales de DP de fuentes de ruido ambiental es utilizar el método 3CFRD"

"Si la alimentación necesaria para energizar el transformador excede la potencia de una unidad CPC 100, hasta tres unidades pueden funcionar en paralelo"

"Una unidad CPC 100 funciona como unidad maestra y las otras dos en un modo sincrónico como unidades esclavas"

"Mediante pruebas de los devanados con tensión inducida, en combinación con una medición sensible de las DP, puede minimizarse el riesgo de fallas imprevistas"

## Autores



**Michael Krüger** es el ingeniero jefe de OMICRON. Estudió ingeniería eléctrica en la Universidad Técnica de Aquisgrán (RWTH) y la Universidad de Kaiserslautern (Alemania) y se graduó en 1976 (Dipl.-Ing.). En 1990 se doctoró en la Universidad Técnica de Viena. Michael Krüger tiene una experiencia de más de 35 años en ingeniería de alta tensión y diagnóstico de aislamiento de GIS, transformadores de instrumentación, cables, transformadores de potencia y máquinas rotatorias.

Ha publicado numerosos trabajos sobre las mediciones eléctricas de diferentes activos y es el titular de 15 patentes. También es miembro de VDE, Cigre e IEEE y participa en varios grupos de trabajo de OEVE, IEC y Cigre.



**Christoph Engelen** tiene un grado de maestría en ingeniería eléctrica de la Universidad RWTH de Aquisgrán de Alemania. Tras graduarse en 2013, comenzó su carrera profesional como ingeniero de aplicaciones en OMICRON donde se centró en el diagnóstico de transformadores. Desde 2017 forma parte de la gerencia de productos, especializado en el desarrollo del negocio de las pruebas de los transformadores de tipo seco.

**OMICRON** es una compañía internacional que presta servicio a la industria de la energía eléctrica con innovadoras soluciones de prueba y diagnóstico. La aplicación de los productos de OMICRON brinda a los usuarios el más alto nivel de confianza en la evaluación de las condiciones de los equipos primarios y secundarios de sus sistemas. Los servicios ofrecidos en el área de asesoramiento, puesta en servicio, prueba, diagnóstico y formación hacen que la nuestra sea una gama de productos completa.

Nuestros clientes de más de 140 países confían en la capacidad de la compañía para brindar tecnología de punta de excelente calidad. Los Service Centers en todos los continentes proporcionan una amplia base de conocimientos y un extraordinario servicio al cliente. Todo esto, unido a nuestra sólida red de distribuidores y representantes, es lo que ha hecho de nuestra empresa un líder del mercado en la industria eléctrica.