



## Evaluación del estado de los núcleos de estator con el CPC 100

Los núcleos del estator de las máquinas rotativas están compuestos por múltiples capas apiladas para minimizar las pérdidas parásitas. Un cortocircuito entre dos o más capas provoca un aumento de las corrientes parásitas locales. Esto también puede dar lugar a puntos calientes locales que, en el peor de los casos, pueden causar una fusión parcial del núcleo y, finalmente, la avería completa de la máquina. Una medición del flujo anular, en la que la máquina se excita a un flujo nominal y se detectan los posibles puntos calientes con una cámara termográfica, exige una gran cantidad de potencia. Además, la configuración requiere mucho tiempo y recursos.

La medición del flujo de dispersión con el CPC 100 es una alternativa confiable, ya que utiliza una fuente de potencia portátil y un dispositivo de medición que puede energizarse mediante un enchufe eléctrico normal. Además de la medición a la frecuencia nominal, el CPC 100 permite excitar el núcleo del estator a frecuencias más altas de hasta 400 Hz. En este documento se explica el efecto de la inyección a diferentes frecuencias, la detección de fallas "más profundas" en el núcleo, así como la comparación con una medición de flujo anular.

### I. INTRODUCCIÓN

Para detectar puntos débiles en el aislamiento de los segmentos del núcleo del estator, se puede utilizar una medición de flujo de dispersión entre otros métodos. En este caso, se induce en el núcleo un pequeño porcentaje del flujo nominal, del orden del 2 al 10%, mediante un devanado auxiliar (figura 1, lado izquierdo) [1]. Si se produce un cortocircuito entre las láminas, una mayor corriente parásita, impulsada por la tensión inducida por el flujo de los devanados auxiliares, provoca un mayor flujo de dispersión, tal como se muestra en la figura 1 del lado derecho.

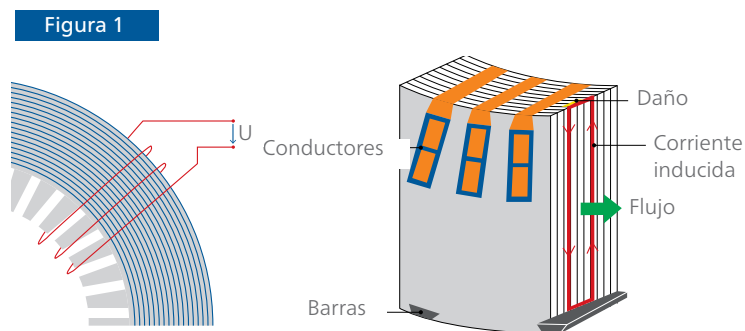


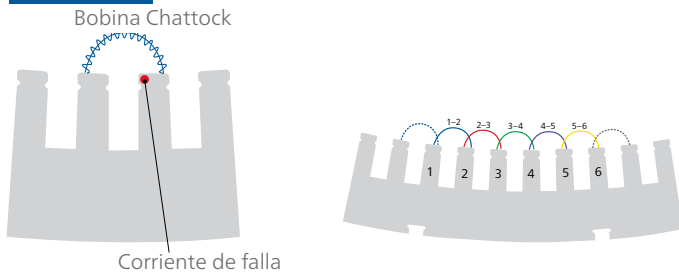
Figura 1  
Lado izquierdo: Devanado auxiliar con indicación de líneas de flujo azules; Lado derecho: mayor corriente parásita debido a un núcleo del estator dañado.

Esto puede detectarse como un mayor flujo de dispersión mediante una bobina Chattock o Rogowski que explore la superficie del estator, como se explica en la figura 2. [3] Las mediciones de la bobina se indican en mA correlacionadas con una determinada posición dentro del núcleo del estator. Como la anchura de la bobina de medición y el número de espiras del sensor siguen siendo iguales para cada medición, se puede obtener una calibración antes de cada medición.

Cuando se realizan mediciones con una inyección al 4% del flujo nominal [1], la excitación de la fuente no necesita suministrar normalmente más de 2-3 kVA [2]. En la mayoría de las máquinas se necesita incluso una potencia menor. Esto representa la mayor ventaja en comparación con otros métodos, tal como la medición con el flujo total, ya que la alimentación eléctrica y la configuración de esta prueba son rápidas y sencillas.

Un valor común con el que deben investigarse los distintos puntos, es 100 mA de la corriente de cuadratura, cuando las mediciones se realizan al 4% del flujo nominal y a la frecuencia nominal [1, 2].

Figura 2



Detección de la corriente de falla mediante la medición del flujo de dispersión por el sensor. Las diferentes ranuras son exploradas secuencialmente por diferentes mediciones. La extensión de la bobina se sitúa entre los dientes de una ranura y la siguiente ranura para garantizar una cierta zona de solapamiento.

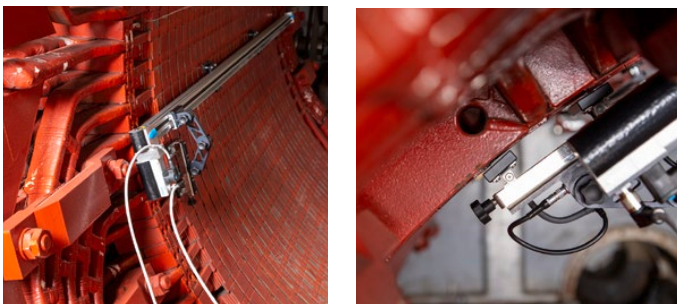
## II. PARTICULARIDADES DE LA SOLUCIÓN

Los parámetros explicados en el capítulo I son válidos también para la solución CPC 100. Además, algunas otras particularidades de esta solución permiten una medición rápida y confiable, incluyendo una operación intuitiva:

### A. Mejora de la usabilidad gracias al movimiento semiautomático del sensor

Sabiendo que una medición manual puede ser engorrosa y requerir mucho tiempo, la intención era aumentar la usabilidad en la medida de lo posible. Por lo tanto, la solución de medición del flujo de dispersión incluye un movimiento semiautomático del sensor. El carril (RAA1) permite este movimiento y se coloca con fuertes imanes en el núcleo del estator. Los dispositivos anticaída adicionales garantizan que el carril no pueda caerse una vez colocado y dañar algún dispositivo. El sensor de la diapositiva recorre la superficie del estator a una distancia de 2 a 3 mm, lo que garantiza una medición sensible. Además, no se producen picos en los resultados procedentes de los conductos de ventilación u otros desniveles si el soporte de la bobina no toca la superficie.

Figura 3

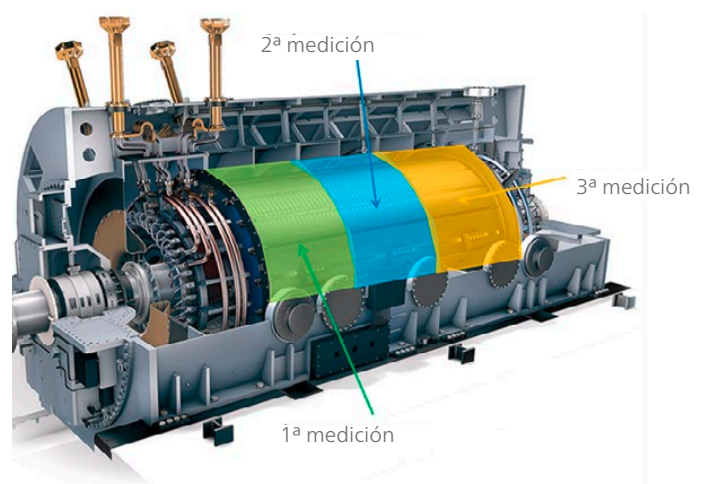


Soporte de carril y bobina durante una medición

La longitud máxima que el carril puede abarcar es 1760 mm. También se pueden medir estatores más largos, ya que los resultados de los distintos métodos de medición se pueden combinar en el software. En este caso, la mejor metodología consiste en dividir el estator en segmentos y medir cada uno de ellos, como se explica en la figura 4.

Para el diagnóstico local, así como para casos especiales, tales como las largas zonas escalonadas de grandes turbogeneradores, por ejemplo, también es posible realizar mediciones en modo manual.

Figura 4



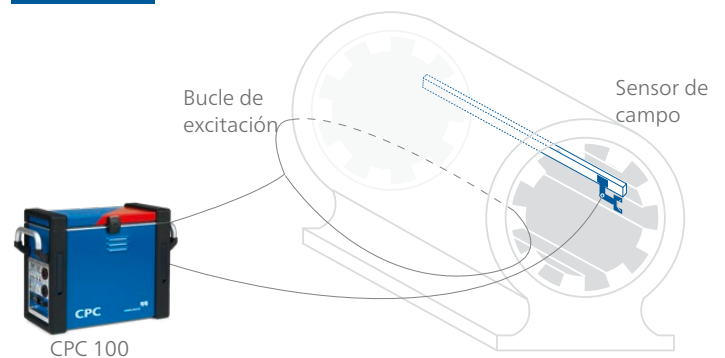
Metodología de medición en caso de tener que explorar estatores largos; Fuente de imagen Generador: Siemens

### B. Excitación y medición como solución llave en mano

La potencia necesaria, inferior a 3 kVA, permite al CPC 100 actuar como fuente y dispositivo de medición en una sola solución. Es posible obtener una potencia de excitación aún mayor también a partir de la salida de enchufe eléctrico normal, ya que la excitación sólo está activa cuando el carril está en movimiento. Junto con el carril (RAA1), la unidad de control (SCU1) y el multiplicador de devanado (WMP1), los usuarios tienen todo lo que necesitan para realizar la medición.

El cable de excitación ya está incluido y puede ampliarse si se miden máquinas más grandes. Se pueden conectar dos cables de excitación diferentes, tal como un cable de dos hilos y otro de ocho hilos, según el tipo de máquina que se vaya a medir.

Figura 5



Esquema simplificado del CPC 100 tanto como dispositivo de excitación como de medición

### C. Asistencia de Primary Test Manager

El software Primary Test Manager (PTM) ofrece asistencia a lo largo de la prueba, incluyendo esquemas de conexión y un cálculo automatizado del devanado de excitación en función del esquema de devanado (si está disponible) o, en su defecto, de la dimensión del estator.

La visualización intuitiva de la señal en tiempo real y el resumen de las mediciones con ayuda de un mapa térmico, tal como se muestra en la figura 14, también forman parte

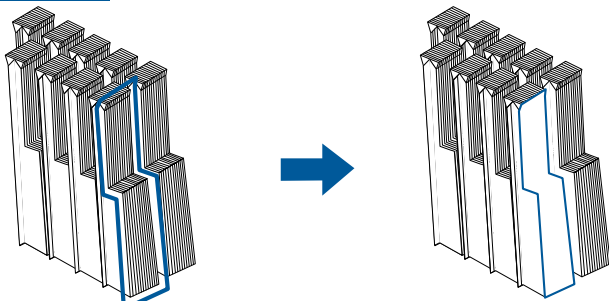
del software, así como la función de informe con un solo botón. La función de informe incluye todas las demás pruebas del activo que también son posibles con el CPC 100.

### III. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Las investigaciones relativas a la reproducibilidad y la medición a diferentes frecuencias se han realizado en un pequeño generador hidroeléctrico retirado del servicio con una tensión nominal de 6,4 kV y 156 ranuras. El devanado del estator es un bobinado con 2 espiras por bobina. Todos los demás experimentos descritos en los capítulos VI y VII se han realizado en máquinas diferentes. La configuración se explica en los capítulos correspondientes.

Las investigaciones respecto a la reproducibilidad de las mediciones, han resultado también en una mejor visibilidad de los efectos de las diferentes frecuencias de excitación. Los experimentos en el pequeño hidrogenerador, han sido realizados con la medición de una falla artificial. Se ha cortocircuitado un segmento del estator con un cable, tal como se explica en la figura 6. La razón de esta modificación es que es más fácil con el cableado sobre dos conductos de ventilación en lugar de dañar el núcleo del estator. En el capítulo IV se utilizó una falla artificial diferente a la del capítulo V.

Figura 6

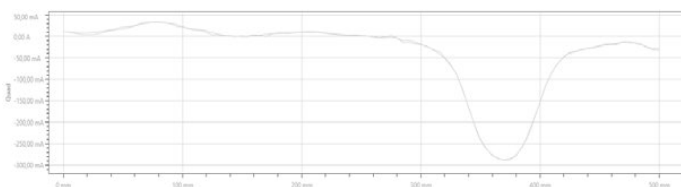


Explicación de la implementación de una falla artificial. Un cable se enrolla alrededor de un segmento del núcleo y se cortocircuita después (izquierda). Eléctricamente, esto se puede ver igual a un segmento de núcleo sin laminaciones (derecha).

### IV. REPRODUCIBILIDAD

Para estar seguros de que el límite de interpretación utilizado a menudo no está influenciado por la configuración de medición, se han realizado investigaciones sobre la reproducibilidad. Esto es aún más importante, ya que el usuario quiere conocer la tendencia a lo largo del tiempo para estimar la criticidad de los posibles puntos débiles existentes. La primera comparación en la figura 7 muestra dos mediciones en la misma ranura con una falla en ella, sin cambiar ningún ajuste.

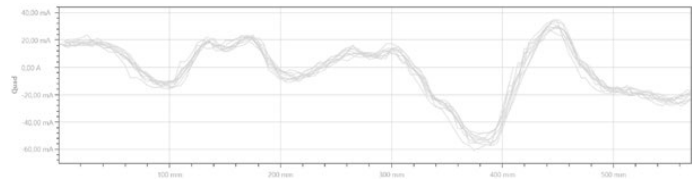
Figura 7



Dos mediciones de la misma ranura

Como no es de extrañar la alta reproducibilidad, en la siguiente comparación de la figura 8 la configuración mecánica y el ajuste se realizaron cada vez al principio de cada medición. En este caso, se exploró la misma ranura "sana", por lo que no se implementó ninguna falla en estas mediciones. Cada trazo de medición se registró después de rehacer la configuración mecánica cada vez al principio de cada medición. La dispersión de los resultados es mayor que en la figura 7, pero sigue siendo muy baja y no supone un obstáculo para la confiabilidad de las mediciones.

Figura 8



Explicación de la implementación de una falla artificial

### V. MEDICIONES A DIFERENTES FRECUENCIAS

El efecto de la medición a frecuencias más altas se explica con dos mediciones comparativas a 50 Hz y a 400 Hz. Ambas mediciones se realizaron en la misma ranura con la misma falla artificial. No se realizaron cambios o modificaciones entre las diferentes mediciones; los únicos cambios realizados fueron en los parámetros de excitación. La medición se realizó en el pequeño generador hidráulico con 24 devanados de excitación descrito en el capítulo III.

Como se sabe, el flujo es inversamente proporcional a la frecuencia, pero se comporta de forma proporcional a la tensión. Para comparar las dos mediciones a frecuencias diferentes, la tensión de excitación se mantuvo igual en el primer experimento. En consecuencia, el flujo para la medición a frecuencia 8 veces superior disminuyó en un factor de 8.

Tabla 1

Frecuencia (en Hz)	Tensión de excitación (en V)	Flujo (en % de $\phi$ )	Factor de calibración (en mV/A)
50	18,6	4	36,6
400	18,6	0,5	336,7

Medición con la misma tensión de excitación a ambas frecuencias

Tabla 2

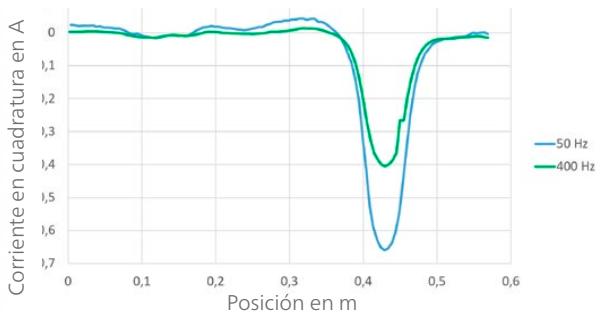
Frecuencia (en Hz)	Tensión de excitación (en V)	Flujo (en % de $\phi$ )	Factor de calibración (en mV/A)
50	18,6	4	36,6
400	148,3	4	336,7

Medición con el mismo flujo a ambas frecuencias

A la inversa, en el segundo intento, el flujo se mantuvo igual para ambas mediciones, por lo que fue necesario adaptar la tensión de excitación en consonancia. Las tablas 1 y 2 ofrecen una visión general de los dos ajustes diferentes.

Si se mide con el 0,5% del flujo nominal a 400 Hz, el pico más alto en el defecto tiene un valor de amplitud absoluta de unos 400 mA, mientras que al 4% y a 50 Hz el pico alcanza unos 650 mA (figura 9). Aunque es mucho más bajo, el flujo se redujo en un factor de 8 (!).

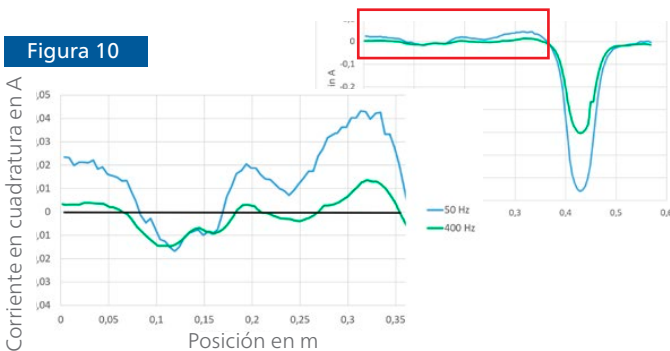
Figura 9



Medición con la misma tensión de excitación

Además, vemos una fluctuación menor también en torno a la línea cero de la medición a 400 Hz cuando se observa la sección "sana" de la ranura (figura 10).

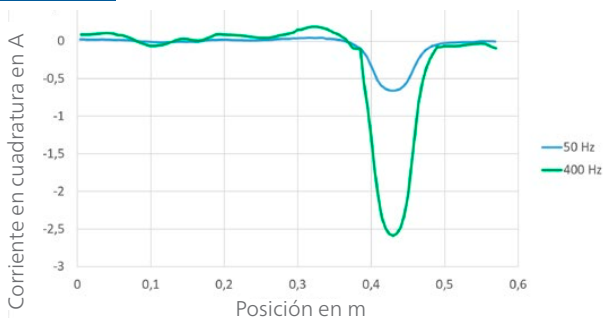
Figura 10



Zoom de la sección de la ranura sin la falla

Como ya se suponía en el primer experimento, al mantener el flujo igual para ambas frecuencias, la imagen cambia completamente, como se muestra en la figura 11. En este caso, la amplitud de la medición a 400 Hz es mucho mayor que la de 50 Hz. Si se compara con la medición de la figura 10, hay que tener en cuenta la diferencia de escala en el eje vertical.

Figura 11



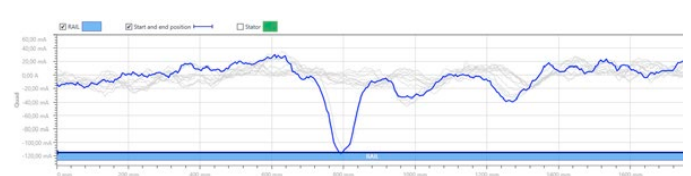
Medición con el mismo flujo; tenga en cuenta la diferente escala en el eje vertical en comparación con la figura 9.

No existe un límite absoluto de frecuencias diferentes a la nominal y podría ser objeto de futuras investigaciones. Aunque no existen límites, la medición a frecuencias más altas puede ser una metodología atractiva. Como la medición del flujo de dispersión es también un método comparativo, parece que los picos de medición en las ubicaciones de las fallas son claramente visibles a frecuencias más altas.

## VI. DETECCIÓN DE FALLAS MÁS PROFUNDAS EN EL NÚCLEO DEL ESTATOR

Las fallas en el aislamiento de las láminas pueden detectarse, incluso si están ubicadas a mayor profundidad dentro del núcleo del estator. Esto se demuestra en un caso práctico, en el que un motor estaba en un taller de reparación debido a una falla de fase a tierra en la máquina. La protección funcionó bien en este caso y se disparó inmediatamente, por lo que el daño en la máquina debido a la falla fue comparativamente pequeño y no visible desde el exterior. Una inspección endoscópica en cada conducto de ventilación permitió localizar el problema. A partir de esta investigación se supo que la falla está ubicada en la parte inferior de una barra inferior. El jefe de proyecto responsable de la reparación quería saber si el núcleo del estator estaba afectado y debía ser reparado también.

Figura 12



Resultado de la medición del motor en el taller de reparación, donde se aprecia claramente un problema en el núcleo del estator a unos 800 mm.

Además, el operario estaba convencido de que el problema en el núcleo del estator ya estaba presente antes de los trabajos de mantenimiento y que el daño no se produjo durante el cambio de la bobina.

## VII. COMPARACIÓN CON LAS MEDICIONES DE FLUJO ANULAR

Para poder hacer afirmaciones sobre la comparación de la medición del flujo de dispersión y la situación durante el funcionamiento de la máquina, se realizó una medición comparativa. La máquina de prueba se renovó por completo, por lo que existía la posibilidad de implementar fallas y compararlas con la prueba de flujo total y una cámara termográfica.

La figura 13 muestra la implementación de estas fallas, ejemplarmente en dos puntos. Se han probado diferentes formas de implementación.

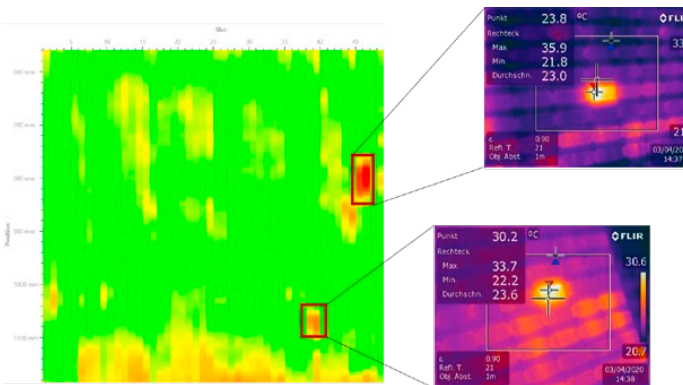
Figura 13



Ejemplo de implementación de la falla y pintura negra para evitar la reflexión durante la medición termográfica.

Dependiendo de la técnica de modificación, no todos los puntos muestran un aumento significativo, por ejemplo, en el aumento de la temperatura durante la prueba de flujo completo, o en la medición del flujo de dispersión. Dos modificaciones mostraron un aumento de temperatura de  $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que se considera crítico [1]. Estas ubicaciones también pudieron detectarse de forma confiable mediante la medición del flujo de dispersión y una amplitud superior a 100 mA. En la figura 14 se muestra el mapa térmico con los resultados de todo el estator, así como la imagen termográfica de los dos puntos críticos. Los otros puntos mostraron un menor aumento de temperatura en comparación con el entorno. También han sido visibles en la medición del flujo de dispersión, ya que las ubicaciones con mayor flujo de dispersión se mantuvieron por debajo del límite de 100 mA.

Figura 14



Mapa térmico de la medición del flujo de dispersión que incluye imágenes termográficas de la medición de comparación con el flujo completo. Las dos ubicaciones con mayor aumento de la temperatura también pudieron identificarse en la medición del flujo de dispersión, donde ambos puntos tenían una amplitud superior a 100 mA.

## VIII. CONCLUSIÓN

Como se muestra en este trabajo, la medición del flujo de dispersión con el CPC 100 es un método confiable para detectar puntos débiles en el aislamiento de interlaminación de los núcleos del estator. La portabilidad del equipo y su fácil configuración hacen que la solución sea interesante para realizar mediciones en campo, así como para aplicaciones de taller. Además, el movimiento semiautomático del sensor y la asistencia del software PTM permiten una gran facilidad de uso.

Se ha podido comprobar con éxito que se han detectado fallas ubicadas a mayor profundidad en el núcleo del estator. Además, la comparación con la medición al flujo completo dio los mismos resultados.

## Referencias

1. IEEE Std 56-2016 "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines" (Guía IEEE para el mantenimiento del aislamiento de máquinas eléctricas), Anexo D (informativo), septiembre de 2016.
2. Folleto Cigre 257, "EL CID (ELECTROMAGNETIC – CORE IMPERFECTION DETECTOR) TESTING OF LARGE STEAM-TURBINEDRIVEN GENERATORS" (Pruebas con detector de imperfección del núcleo electromagnético de grandes generadores de vapor), Grupo de trabajo A1.01.06, octubre de 2004.
3. [3] Bertenshaw, David Ronald: "STATOR CORE INTERLAMINATION FAULTS AND THEIR DETECTION BY ELECTROMAGNETIC MEANS" (Fallas de interlaminación del núcleo del estator y su detección por medios electromagnéticos). Manchester, 2014

## Los autores

**Fabian Öttl** es director de producto en OMICRON Technologies en Italia. En su puesto, es responsable de las pruebas de máquinas rotativas y de los equipos de diagnóstico. Antes de incorporarse a OMICRON, Fabian trabajaba en el departamento de I+D de un fabricante de grandes generadores como especialista en aislamiento de alta tensión. Recibió su licenciatura por la Universidad Tecnológica de Graz en 2011.

Ha escrito muchos artículos científicos y técnicos y contribuye a diferentes grupos de trabajo de Cigre e IEC.

[fabian.oettl@omicronenergy.com](mailto:fabian.oettl@omicronenergy.com)



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 160 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.

Para obtener más información, documentación adicional e información de contacto detallada de nuestras oficinas en todo el mundo visite nuestro sitio web.