



Megger[®]

¿Qué se está derritiendo aquí ?

CASO DE ESTUDIO

Momento para investigar con
SFRA

¿Qué se está derritiendo aquí ? Momento para investigar con SFRA

Antecedentes:

Este caso de estudio fue compartido generosamente por Hitachi Energy Service Group en Suecia. Un transformador para horno Diii de 22 MVA, 10,5 kV/276 V (regulación de tensión de 336 a 216 V), que había operado bajo un uso intenso durante muchos años en una planta de fundición de acero en Europa, se sometió a una serie completa de pruebas tras una falla súbita durante el funcionamiento. El contratista de servicio evaluó el estado eléctrico y dieléctrico de este transformador. Durante el servicio, este tipo de transformador tiene su devanado secundario conectado externamente en una configuración Delta a través de un puente de alta corriente. Para aclarar la designación del vector, se presenta un diagrama simple que muestra sus terminales en la Figura 1.

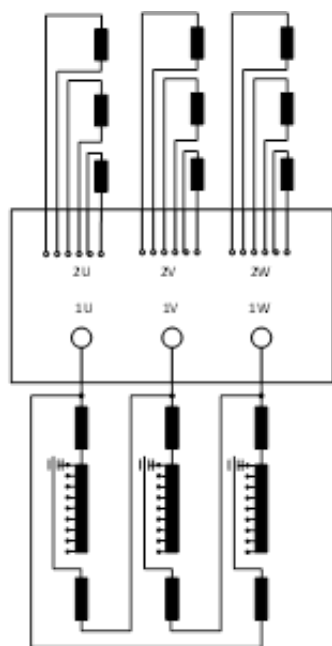


Figura 1: Transformador para horno con configuración de devanado Diii

Investigación:

- Un corte de energía de un transformador para horno es devastador para el operador industrial. La pérdida de energía provoca la pérdida de producción. Afortunadamente, en este caso, había un transformador de repuesto disponible en el lugar. Esto permitió que el contratista de servicio realizara varias pruebas en la unidad defectuosa, incluyendo relación de transformación, resistencia de devanados, resistencia de aislamiento y el análisis de respuesta del barrido de frecuencia (SFRA, del inglés *Sweep Frequency Response Analysis*). Además, se tomaron muestras de aceite para el análisis de laboratorio de gases disueltos en el aceite (DGA, del inglés *Dissolved Gas Analysis*).
- Las pruebas de relación de transformación se realizaron con excitación de baja tensión desde el lado de alta tensión. Se utilizó una conexión de devanado Dd0 para la medición. Las pruebas de relación de transformación se realizaron en todas las tomas y se obtuvieron valores aceptables para dos fases. El instrumento de prueba no pudo realizar mediciones de la relación en la fase C. Esto se puede atribuir a un estado en el que la impedancia era tan baja, que el instrumento de prueba no pudo generar la tensión de excitación configurada para la prueba.
- Los resultados de la relación de transformación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados de relación de transformación en todas las posiciones de tomas

Turns Ratio Test							
Tap position	FAT Turns Ratio	1U - 1V / 2U - 2V		1V - 1W / 2V - 2W		1W - 1U / 2W - 2U	
		Turns Ratio MEAS	[%] Error	Turns Ratio MEAS	[%] Error	Turns Ratio MEAS	[%] Error
1	48.51	48.52	0.02%	48.51	0.00%	Not possible to measure	Not possible to calculate
2	46.75	46.76	0.02%	46.76	0.02%		
3	45.01	45.01	0.00%	45.01	0.00%		
4	43.25	43.26	0.02%	43.26	0.02%		
5	41.50	41.51	0.02%	41.51	0.02%		
6	39.76	39.77	0.03%	39.77	0.03%		
7	38.00	38.02	0.05%	38.02	0.05%		
8	36.25	36.27	0.06%	36.27	0.06%		
9	35.25	35.27	0.06%	35.26	0.03%		
10	34.25	34.26	0.03%	34.26	0.03%		
11	33.25	33.26	0.03%	33.26	0.03%		
12	32.25	32.26	0.03%	32.26	0.03%		
13	31.25	31.26	0.03%	31.26	0.03%		

- Luego, se realizaron pruebas de resistencia de devanado en el transformador. La Tabla 2 presenta las mediciones de resistencia de devanado del lado de alta tensión realizadas en la fábrica (Promedio R_{FAT}) y en terreno.

Tabla 2: Mediciones de resistencia de devanado en la fábrica y en terreno (devanado de alta tensión)

Winding resistance measurement										
Tap position	R_{FAT} average [mΩ]	1U - 1V			1V - 1W			1W - 1U		
		R_{MEAS} (mΩ)	R_{CORR} (mΩ)	$\Delta R_{CORR-FAT}$ [%]	R_{MEAS} (mΩ)	R_{CORR} (mΩ)	$\Delta R_{CORR-FAT}$ [%]	R_{MEAS} (mΩ)	R_{CORR} (mΩ)	$\Delta R_{CORR-FAT}$ [%]
1	26.683	27.105	26.764	0.30%	27.159	26.818	0.50%	28.138	27.784	4.13%
2	25.669	26.173	25.844	0.68%	26.304	25.973	1.19%	27.875	27.525	7.23%
3	24.509	25.161	24.845	1.37%	25.274	24.956	1.82%	27.24	26.898	9.75%
4	23.425	24.076	23.773	1.49%	24.206	23.902	2.03%	26.255	25.925	10.67%
5	22.341	23.063	22.773	1.93%	23.193	22.901	2.51%	25.349	25.030	12.04%
6	21.198	22.069	21.792	2.80%	22.167	21.888	3.26%	24.803	24.491	15.54%
7	20.358	21.408	21.139	3.84%	21.539	21.268	4.47%	24.543	24.234	19.04%
8	19.734	20.827	20.565	4.21%	20.888	20.625	4.52%	24.227	23.922	21.22%
9	19.067	20.305	20.050	5.15%	20.379	20.123	5.54%	23.87	23.570	23.62%
10	18.58	19.89	19.640	5.70%	19.884	19.634	5.67%	23.536	23.240	25.08%
11	17.905	19.3	19.057	6.44%	19.359	19.116	6.76%	23.179	22.888	27.83%
12	17.436	18.863	18.626	6.82%	18.941	18.703	7.27%	22.904	22.616	29.71%
13	16.429	17.883	17.658	7.48%	18.016	17.790	8.28%	22.047	21.770	32.51%

- Los resultados de resistencia de devanados generalmente se interpretan en función de la comparación de las mediciones realizadas por separado en cada fase de un devanado conectado en Y o entre pares de terminales en un devanado conectado en Delta. También se puede realizar una comparación con los datos originales medidos en la fábrica. Una medición se considera aceptable y no se necesita más investigación si las lecturas de fase individual se encuentran dentro del 2 % de las otras lecturas de fase para los transformadores trifásicos o dentro del 2 % de los valores de fábrica informados. Cuando las lecturas están fuera del rango del 2 %, se recomienda investigar más a fondo o consultar al fabricante del transformador para determinar la aceptabilidad de los resultados. Sin embargo, para valores de resistencia muy bajos, no es poco común que las mediciones estén fuera del límite del 2 %, incluso en un transformador perfectamente normal. En tales casos, las tolerancias de medición del equipo de prueba pueden no ser suficientes para resolver el límite aceptable del 2 % entre las mediciones [1].

- De acuerdo con IEEE C57.152 [2], se deben investigar los valores superiores al 5 %, en comparación con los registros de fábrica.
- En este caso, los valores de fábrica se obtuvieron a 24,7 °C, y las mediciones de campo se realizaron a 28 °C. La corrección a los valores de fábrica se realiza como se indica en [2] después de la ecuación (1).

$$R_s = R_m \left(\frac{T_s + T_k}{T_m + T_k} \right) \quad (1)$$

- R_s – Resistencia a la temperatura de referencia T_s
- R_m – Resistencia a la temperatura medida T_m
- T_k – 234,5 °C (cobre) y 225 °C (aluminio)
- Los resultados revelan un desorden. La resistencia de devanados de fase C es una preocupación en la posición de la toma 1 y, a medida que cambia la posición de la toma y se agregan partes adicionales del devanado de la toma (o regulador), los resultados se deterioran considerablemente más. Los resultados de las pruebas de fase A y fase B también son inaceptables en posiciones de toma más altas. Las diferencias significativas observadas en este transformador se visualizan mejor en el gráfico de mediciones de resistencia (Figura 2) y el error graficado, indicado en % (Figura 3).

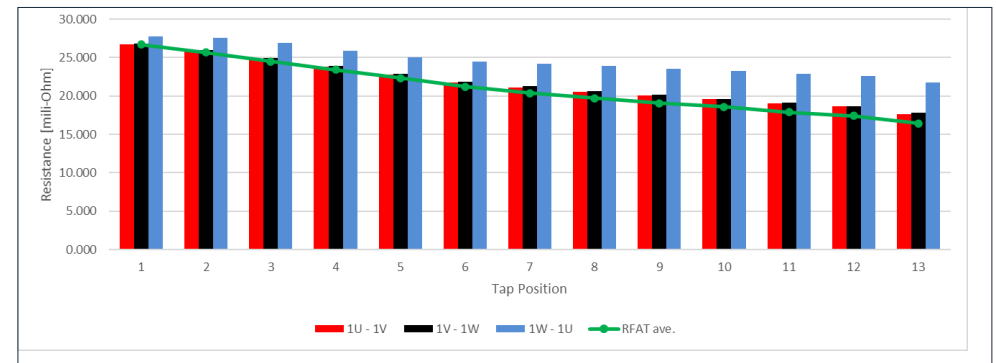


Figura 2: Medición de resistencia de devanado corregida a pruebas de aceptación de fábrica (FAT, del inglés Factory Acceptance Testing) para la comparación

¿Qué se está derritiendo aquí ? Momento para investigar con SFRA

- El gráfico de la Figura 2 efectivamente muestra un valor elevado de los resultados de la prueba de resistencia de devanado en comparación con los valores de FAT, pero lo más importante es la variación de la fase C.

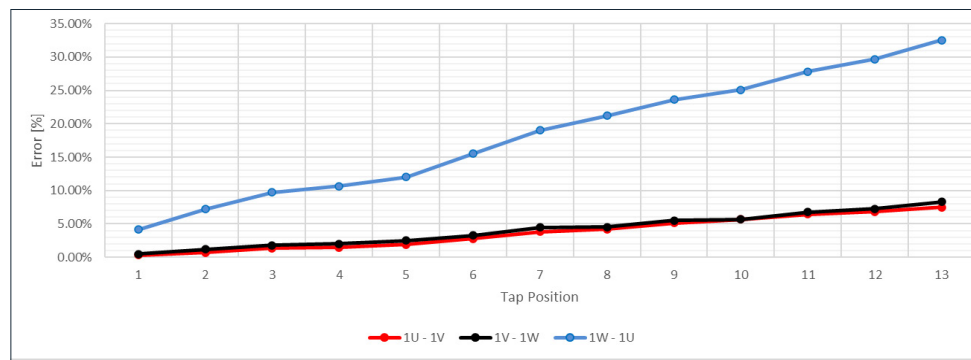


Figura 3: Variación porcentual con respecto a las mediciones de FAT

- La Figura 2 muestra que las fases A y B se comportan de manera similar con cierto incremento con respecto de las mediciones de FAT a medida que cambia la posición de la toma. Las tomas 9, 10, 11, 12 y 13 se considerarían inequívocamente para la investigación, ya que la diferencia es >5 %.
- La fase C se comporta de manera bastante diferente, superando la variación aceptable en todas las posiciones de la toma.
- Las fases A y B se vieron afectadas por la falla en la fase C, ya que los devanados en operación estaban conectados en Delta.
- Los resultados de la prueba de resistencia de devanado en el lado de baja tensión se presentan en la Tabla 3. La tabla muestra los resultados de la prueba para una sección del devanado de baja tensión. Las otras secciones del devanado de baja tensión arrojaron resultados similares.

Tabla 3: Medición de resistencia de devanado de fábrica y en terreno (devanado de baja tensión)

		Resistencia de devanado medida en el lado de baja tensión								
		2U			2V			2W		
Pos. de toma.	R _{FAT} promedio [mΩ]	R _{MEAS} [mΩ]	R _{CORR} [mΩ]	ΔR _{CORR-FAT} [%]	R _{MEAS} [mΩ]	R _{CORR} [mΩ]	ΔR _{CORR-FAT} [%]	R _{MEAS} [mΩ]	R _{CORR} [mΩ]	ΔR _{CORR-FAT} [%]
1	0,1098	0,1127	0,1113	1,35 %	0,1116	0,1102	0,36 %	0,1119	0,1105	0,63 %

- A continuación, el equipo de prueba intentó realizar una prueba de resistencia de aislamiento a 500 V CC; estos resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados de aislamiento obtenidos a 28 °C.

Capacitancia	Energizado	Medición	Tensión de prueba [kV]	IR _{60s} [GΩ]
CH-(L+G)	Alimentación	Baja tensión + Tanque		No es posible medir
CL-(H+G)	Baja tensión	Alta tensión + Tanque	0,5	7,49
C(H+L)-G	Alta tensión + Baja tensión	Tanque		No es posible medir

- Se tomó una muestra de aceite del transformador y se envió a un laboratorio para una prueba de DGA. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Concentración de gas de una muestra de aceite del transformador

Descripción de la prueba	Análisis de gas disuelto: resultados proporcionados en ppm								
	(O ₂)	(N ₂)	(H ₂)	(CH ₄)	(C ₂ H ₆)	(C ₂ H ₄)	(C ₂ H ₂)	(CO)	(CO ₂)
Última prueba antes de la falla	27000	59000	8	2	0	14	0	121	2290
Prueba después de la falla	29000	64000	488	214	22	330	408	378	2710

- Los resultados de la prueba de DGA "más reciente antes de la falla" no son representativos de un problema de gasificación, especialmente en un transformador para horno. Los números se encuentran en la condición 1 según lo especificado por los estándares existentes. Este es un caso en el que solo un monitor de gas en línea o una muestra de aceite "afortunada" pudieron haber detectado la falla de arco entrante antes de que esta se suscite.

- El análisis de DGA posterior a la falla indica una posición D2 en el triángulo de Duval 1, así como en el Pentágono 1. D2 es una indicación de "descarga de energía alta, incluida la formación de arco eléctrico. Se prevé fusión metálica y presencia de partículas de carbono en el aceite". Estos resultados se muestran en la Figura 4

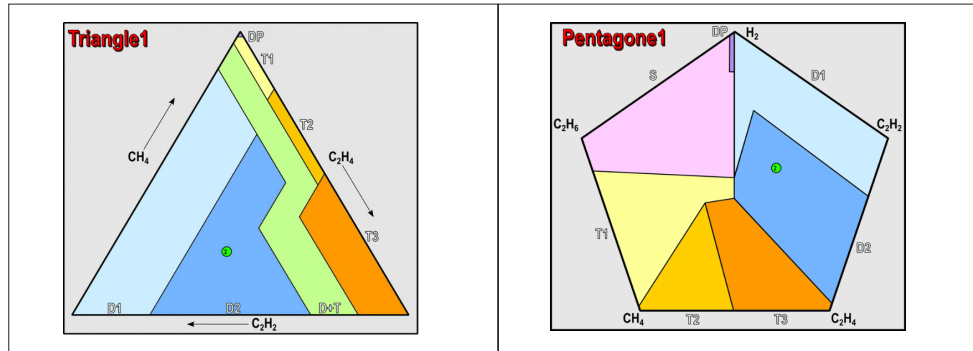


Figura 4: Análisis de fallas por el método Duval de la muestra de aceite tomada después de la falla del transformador

- Todas las pruebas indican claramente una falla dentro del transformador. La pregunta es: ¿dónde? Para localizar la falla en la parte activa del transformador, se realizó una prueba de SFRA con el equipo FRAX 101 de Megger.

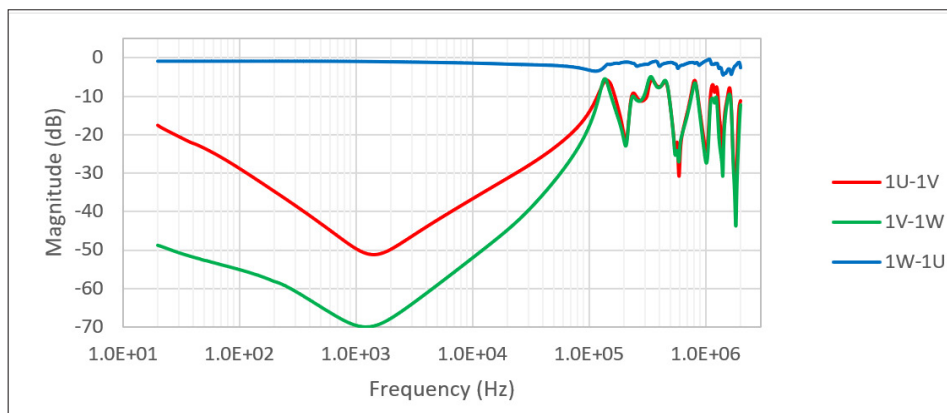


Figura 5: Circuito abierto de alta tensión: posición de la toma 1

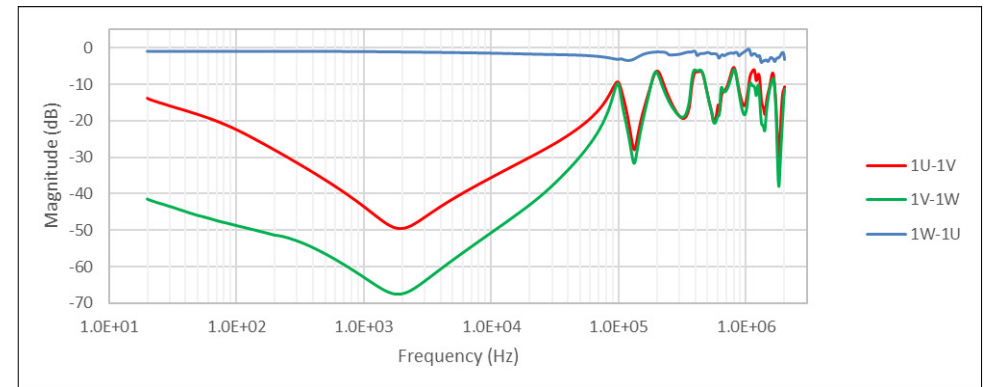


Figura 6: Circuito abierto de alta tensión: posición de la toma 13

- Los resultados de la prueba de circuito abierto de SFRA (Figuras 5 y 6) indican un cortocircuito en la fase C (trazas azules). La falla también ha afectado las otras dos fases, lo que da como resultado una respuesta totalmente asimétrica.

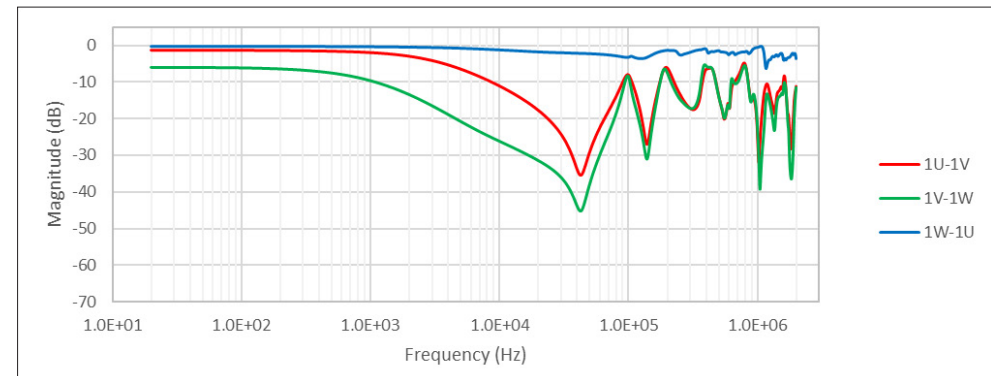


Figura 7: Prueba de cortocircuito de alta tensión

¿Qué se está derritiendo aquí ? Momento para investigar con SFRA

- Los resultados de la prueba de cortocircuito de alta tensión de SFRA confirman que la fase C se ve afectada en este transformador, pero el daño en esta fase también afecta la respuesta de las fases A y B.
- No había duda de que el transformador requería un trabajo importante antes de devolverlo al servicio. Para evaluar el alcance de los daños identificados por esta serie de pruebas, el propietario ordenó una inspección interna.
- Durante la inspección, se observó la falla en la bobina de regulación de la fase C, como se muestra en la Figura 8.
- Los devanados de las fases A y B, así como el núcleo, no se vieron afectados.



Figura 8: El devanado regulador de la fase C como se encontró durante la inspección visual

- El propietario del activo decidió reparar la unidad. La unidad se llevó al taller de reparación del fabricante para una restauración completa. La unidad reparada volvió a ponerse en servicio.
- La causa raíz de la falla no es 100 % clara. Este transformador para horno estuvo bajo un uso intenso durante muchos años, durante los cuales, se energizaba y desenergizaba frecuentemente a potencia total. El estado del transformador nunca se investigó a fondo antes de que ocurriera la falla.

Conclusiones:

- Durante la vida útil de un transformador de potencia o distribución, es casi imposible evitar transitorios y fallas pasantes que pueden dañar gravemente la parte activa del transformador.
- Después de muchos años de servicio, especialmente para transformadores para hornos, es conveniente evaluar a fondo la condición operativa. Para los transformadores que han estado en servicio durante varios años, es posible que sea necesario modificar el perfil operacional para que el transformador pueda resistir los esfuerzos operativos.
- Después de una falla, se deben considerar varias acciones.
 - Si la falla fue externa al transformador, desmagnetice el transformador después de aislarlo del sistema. Elimine la magnetización residual en el núcleo para facilitar la interpretación significativa de los resultados de la prueba de CA, específicamente las pruebas de SFRA, excitación y relación de transformación.
 - Si la falla es interna, utilice prácticas de pruebas de baja energía. Asegúrese de que los gases combustibles se extraigan del transformador.
- En este estudio de caso, las pruebas eléctricas y dieléctricas confirmaron que el devanado de fase C falló gravemente y que la unidad no podía volver a funcionar sin reparación. Se puso en marcha una unidad de repuesto para minimizar el tiempo de inactividad durante las pruebas y la reparación de la unidad defectuosa.
- El daño en este transformador podría haberse identificado únicamente mediante SFRA. Otras pruebas respaldan los hallazgos y ayudan a identificar la posible causa principal de la falla

Beneficios:

- Siempre se requiere una combinación de procedimientos de prueba de baja energía después de una condición de falla. La disponibilidad in situ del equipo de SFRA y el registro de las mediciones de SFRA permiten una rápida identificación de una falla y su ubicación. Otros procedimientos ayudan a validar y evaluar la magnitud del daño.
- El muestreo de aceite es una buena práctica cuando una condición de falla activa afecta continuamente el funcionamiento regular del transformador. Sin embargo, las fallas pueden ser rápidas y violentas, lo que no le da tiempo al operador para evitar daños al transformador. El muestreo de DGA continuo se recomienda especialmente para transformadores muy cargados, como en el caso de este transformador para horno.
- Para el propietario de activos industriales, la pérdida de suministro de energía es directamente proporcional a las pérdidas financieras y la producción no recuperable. En este caso, había una unidad de repuesto disponible y se minimizó el tiempo de inactividad.
- Sea proactivo, no reactivo. Mantenga registros de referencia de los resultados de las pruebas de fábrica y de rutina de su equipo, y asegúrese de que su caja de herramientas para pruebas eléctricas esté equipada con las herramientas adecuadas, especialmente con un dispositivo portátil de SFRA, como FRAX 101 de Megger.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Transformer Service Handbook – 4th Edition" (ABB, 2018, página 189)
- [2] IEEE C57.152-2013 "Guide for Diagnostic Field testing of Fluid-filled Power Transformers, Regulators, and Reactors".

¿Qué se está derritiendo aquí ? Momento para investigar con SFRA

Referencia de productos:



TTRU3

- Medidor de relación de transformación trifásico, totalmente automático, autocomprobante y guiado por menú
- Utiliza la realización de pruebas ascendentes de relación de transformación con patente pendiente
- Incluye pruebas de corriente de excitación de baja tensión y de equilibrio magnético
- Prueba de OLTC (cambiador de tomas automático) con un toque



TRAX + TDX

- Un probador multifuncional paratransformadores y subestaciones y otros equipos de subestación.
- DFR de banda estrecha (NB DFR: de 1 a 505 Hz)
- Corrección de temperatura individual (ITC)
- Detección de dependencia de tensión (VDD)



FRAX 101

- El instrumento de FRA más pequeño y resistente de la industria
- Cumple con todos los estándares internacionales
- La mejor herramienta para detectar cambios mecánicos y eléctricos de la parte activa de un transformador



Para obtener más información, comuníquese con:

- **Dr. Evgenii Ermakov**
Experto en Diagnóstico de Transformadores
Hitachi Energy - Suecia
evgenii.ermakov@hitachienergy.com
- **Dr. Diego Robalino**
Director de Desarrollo de Negocios,
Área de Transformadores
Grupo Megger
diego.robalino@megger.com
- **Dr. Peter Werelius**
Especialista sénior en Aplicaciones y Productos
Megger - Suecia
peter.werelius@megger.com

Megger Iberia

C/ La Florida 1, Nave 16,
Parque Empresarial Villapark
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)

es.megger.com

megger.iberia@megger.com

