



## Avaliação da condição do núcleo do estator com o CPC 100

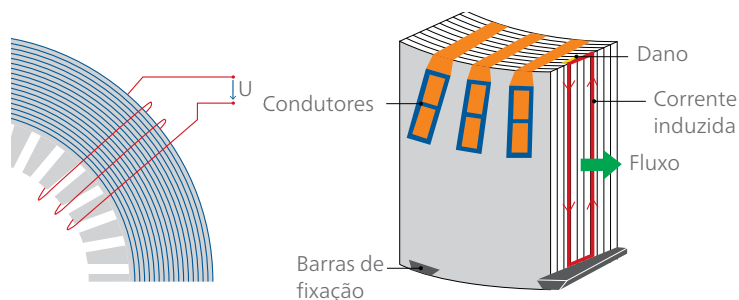
Os núcleos dos estatores de máquinas rotativas são compostos por múltiplas camadas empilhadas para minimizar perdas de corrente parasitas. Um curto entre duas ou mais camadas leva a correntes parasitas locais maiores. Esse problema pode mais uma vez levar a pontos de aquecimento locais, o que, no pior dos casos, pode causar um derretimento parcial do núcleo e eventualmente danificar completamente a máquina. Uma medição de fluxo, em que a máquina é excitada no fluxo nominal e a detecção de pontos de aquecimento é realizada com uma câmera termográfica, demanda uma grande quantidade de potência. Além disso, a configuração demanda bastante tempo e recursos.

A medição do fluxo de dispersão com o CPC 100 é uma alternativa confiável, usando uma fonte de potência portátil e um equipamento de medição que pode ser energizado por meio de uma tomada comum. Além da medição na frequência nominal, o CPC 100 permite que você excite o núcleo do estator em frequências maiores de até 400 Hz. O efeito da injeção em diferentes frequências, a detecção de falhas "mais profundas" no núcleo, assim como a comparação com uma medição de fluxo são explicados neste artigo.

### I. INTRODUÇÃO

Para detectar pontos fracos no isolamento dos segmentos do núcleo do estator, uma medição do fluxo de dispersão, entre outros métodos que podem ser usados. Nesse caso, uma pequena porcentagem do fluxo nominal na faixa de 2 a 10% é induzida no núcleo por meio de um enrolamento auxiliar (Lado esquerdo da figura 1) [1]. Se um curto ocorrer entre a laminação, uma corrente parasita maior – movida pela tensão induzida do fluxo dos enrolamentos auxiliares – causa um fluxo de dispersão maior, conforme mostrado no lado direito da Figura 1.

Figura 1



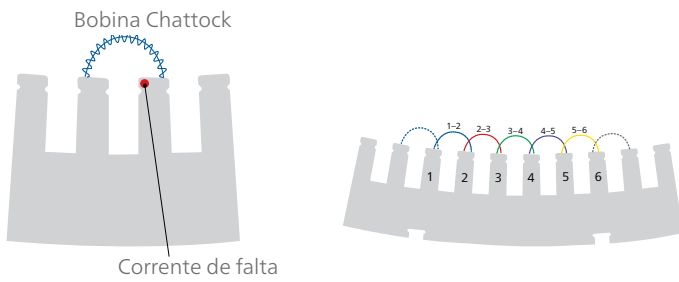
Lado esquerdo: Enrolamento auxiliar com indicação de linhas de fluxo azuis; Lado direito: maior corrente parasita devido a dano no núcleo do estator.

Isso pode ser detectado como um fluxo de dispersão maior por uma bobina Chattock ou Rogowski escaneando a superfície do estator, conforme explicado na Figura 2. [3] As leituras da bobina estão em mA, correlacionadas a uma certa posição dentro do núcleo do estator. Conforme a largura da bobina de medição e o número de espiras do sensor permanecem os mesmos para cada medida, uma calibração pode ser obtida antes de cada medição.

Ao medir em uma injeção de 4% de fluxo nominal [1], a excitação da fonte não costuma precisar entregar mais do que 2 a 3 kVA [2]. Uma potência mais baixa é necessária na maioria das máquinas. Isso representa a maior vantagem em comparação com outros métodos, tais como a medição do fluxo total, já que a fonte de alimentação e a configuração para este teste são fáceis e seguras.

Um valor comum em que locais deveriam ser investigados é de 100 mA da corrente de quadratura, em que as medições são realizadas em 4% de fluxo nominal e frequência nominal [1, 2].

Figura 2



Deteção de corrente de falta por meio de medição do fluxo de dispersão pelo sensor. Diferentes slots são escaneados sequencialmente por medições diferentes. O período da bobina é entre os dentes de um slot até o próximo slot, de forma a garantir uma certa área sobreposta.

## II. PARTICULARIDADES DA SOLUÇÃO

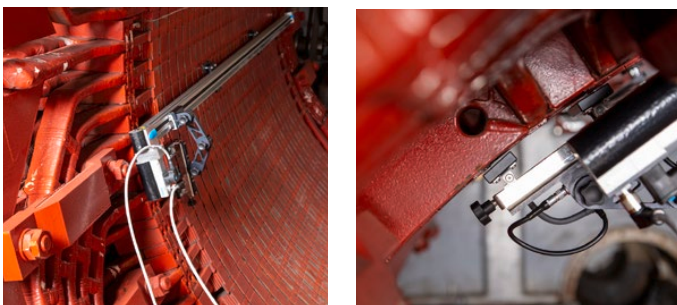
Os parâmetros explicados no Capítulo I também são válidos para a solução do CPC 100. Além disso, algumas outras particularidades dessa solução permitem uma medição rápida e confiável, incluindo uma operação intuitiva:

### A. Melhoria na usabilidade devido a sensor de movimento semiautomático

Sabendo que uma medição manual pode ser complicada e demorada, a intenção era aumentar a usabilidade tanto quanto possível. Portanto, um movimento semiautomático do sensor vem com a solução de medição do fluxo de dispersão. O trilho (RAA1) habilita este movimento e é colocado no núcleo do estator com ímãs fortes. Travaquedas adicionais garantem que o trilho não possa cair e danificar equipamentos uma vez que esteja posicionado.

O sensor no trilho viaja sobre a superfície do estator em uma distância de 2 a 3 mm, o que garante uma medição sensível. Além disso, não há presença de picos nos resultados dos dutos de ventilação ou de outra disparidade caso o suporte da bobina não esteja tocando na superfície.

Figura 3

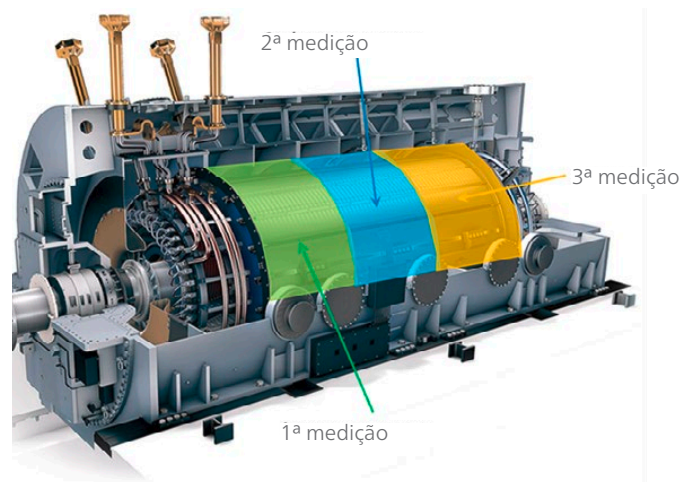


Suporte para trilho e bobina durante uma medição

O comprimento máximo que o trilho pode cobrir é de 1760 mm. Estatores mais longos também podem ser medidos, já que os resultados dos diferentes métodos de medição podem ser combinados no software. A melhor abordagem neste caso é dividir o estator em segmentos e medir cada segmento, conforme explicado na Figura 4.

Para diagnóstico local, assim como para casos especiais, tais como em áreas finais de difícil acesso de grandes turbogeradores, por exemplo, também são possíveis medições em um modo manual.

Figura 4



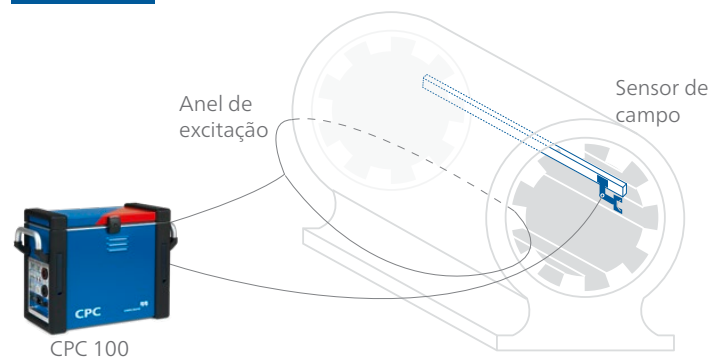
Abordagem de medição caso estatores longos precisem ser escaneados; Gerador de figura-fonte: Siemens

### B. Excitação e medição como uma solução-chave

A potência de menos de 3 kVA necessária habilita o CPC 100 a agir como fonte e equipamento de medição em uma solução. Até mesmo maiores poderes de excitação, também pela saída de uma tomada comum, são possíveis, já que a excitação está ativa apenas quando o trilho está se movendo. Junto com o trilho (RAA1), a unidade de controle (SCU1) e o multiplicador de enrolamento (WMP1), os usuários possuem tudo o que precisam para realizar a medição.

O cabo de excitação já está incluso e pode ser estendido caso máquinas maiores forem medidas. Dois cabos de excitação distintos podem ser conectados, tal como um cabo de duas vias e um cabo de oito vias, dependendo do tipo de máquina a ser medida.

Figura 5



Esquemática simplificada do CPC 100 como um equipamento tanto de excitação quanto de medição

### C. Suporte ao Primary Test Manager

Orientação durante o teste, incluindo esquemas de conexão e um cálculo automatizado da excitação de enrolamento dependendo do esquema de enrolamento (se disponível), ou, então, da dimensão do estator, são fornecidos pelo software do Primary Test Manager (PTM) em operação.

Exibição intuitiva de sinais em tempo real e um resumo da medição com a ajuda de um mapa de calor, conforme mostrado na Figura 14, também fazem parte do software,

assim como uma função de relatório com um botão. A função de relatório inclui também todos os outros testes possíveis para o ativo, usando o CPC 100.

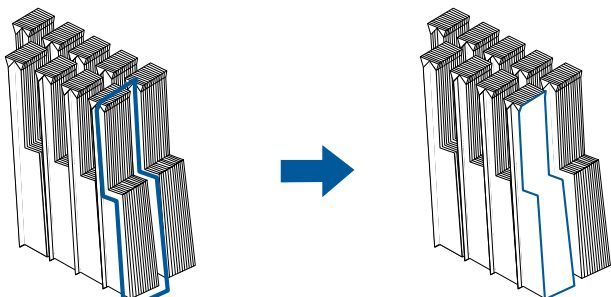
### III. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

As investigações a respeito da reprodutibilidade e medição com diferentes frequências foram realizadas em um pequeno hidrogerador desativado com uma tensão nominal de 6,4 kV e 156 slots. O enrolamento do estator é uma bobina enrolada com duas espiras por bobina. Todos os outros experimentos descritos no Capítulo VI e no Capítulo VII foram realizados em máquinas diferentes. A configuração é explicada nos capítulos correspondentes.

Para uma melhor visibilidade do efeito de diferentes frequências de excitação sobre a reprodutibilidade, os experimentos no hidrogerador pequeno foram realizados com uma medição sobre uma falta artificial. Um segmento do estator é encurtado por uma malha, conforme explicado na Figura 6. O motivo para esta modificação é que ela é uma modificação mais fácil com a malha sobre dois dutos de ventilação em vez de danificar o núcleo do estator.

No Capítulo IV, foi usada uma falta artificial diferente da que foi usada no Capítulo V.

Figura 6



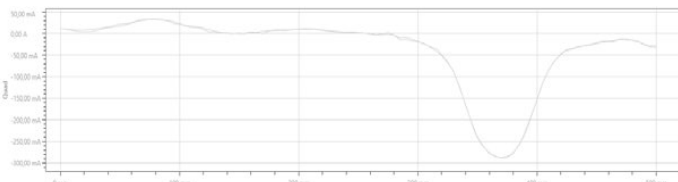
Explicação da implementação de uma falta artificial

### IV. REPRODUTIBILIDADE

Para garantir que o limite de interpretação comumente usado não seja influenciado pela configuração da medição, foram realizadas investigações sobre a reprodutibilidade. A investigação se torna ainda mais importante, uma vez que o usuário deseja ter uma tendência ao longo do tempo, para estimar a criticidade dos potenciais pontos fracos existentes.

A primeira comparação na Figura 7 mostra duas medições no mesmo slot com uma falta, sem alterar nenhuma configuração.

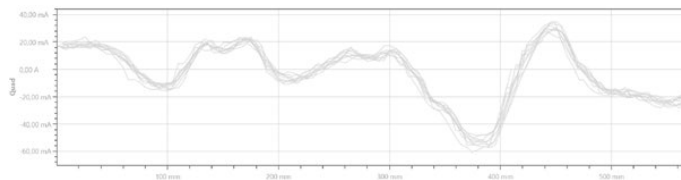
Figura 7



Dois medições do mesmo slot

Já que a alta reprodutibilidade não é surpreendente, na próxima comparação, na Figura 8, a configuração mecânica e o ajuste foram realizados a cada vez, no começo de cada medição. Nesse caso, o mesmo slot "saudável" foi escaneado, então nenhuma falta foi implementada nessas medições. Cada traço da medição foi registrado após refazer a configuração mecânica a cada vez, no começo de cada medição. A variação dos resultados é maior do que na Figura 7, mas ainda assim muito baixa e não apresenta um impedimento para uma medição confiável.

Figura 8



Explicação da implementação de uma falta artificial

### V. MEDIÇÕES COM FREQUÊNCIAS DIFERENTES

O efeito da medição com frequências maiores é explicado com duas medições comparativas em 50 Hz e em 400 Hz. Ambas as medições foram executadas no mesmo slot, com a mesma falta artificial. Não foram feitas alterações ou modificações entre as diferentes medições; as únicas alterações feitas foram nos parâmetros de excitação. A medição foi realizada no pequeno hidrogerador com 24 enrolamentos de excitação descritos no Capítulo III.

Como se sabe, o fluxo é inversamente proporcional à frequência, mas se comporta de forma proporcional à tensão. Para comparar as duas medições com frequências diferentes, a tensão de excitação foi mantida no primeiro experimento. Conseqüentemente, o fluxo para a medição da frequência oito vezes maior diminuiu em um fator de oito.

Vice-versa na segunda tentativa, o fluxo foi mantido igual para ambas as medições, portanto a tensão de excitação precisou ser adaptada de acordo. A Tabela 1 e a Tabela 2 oferecem uma visão geral das duas opções diferentes.

Tabela 1

Frequência (em Hz)	Tensão de excitação (em V)	Fluxo: (em % de $\phi$ )	Fator de calibração (em mV/A)
50	18,6	4	36,6
400	18,6	0,5	336,7

Medição com a mesma tensão de excitação para ambas as frequências

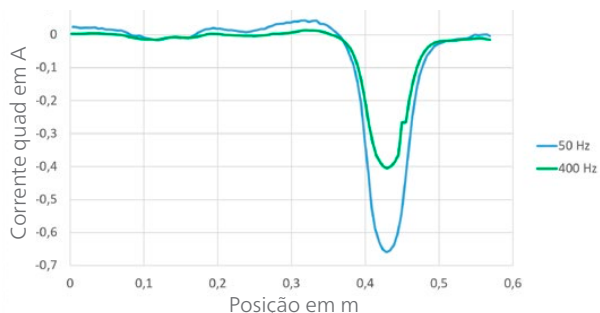
Tabela 2

Frequência (em Hz)	Tensão de excitação (em V)	Fluxo: (em % de $\phi$ )	Fator de calibração (em mV/A)
50	18,6	4	36,6
400	148,3	4	336,7

Medição com o mesmo fluxo para ambas as frequências

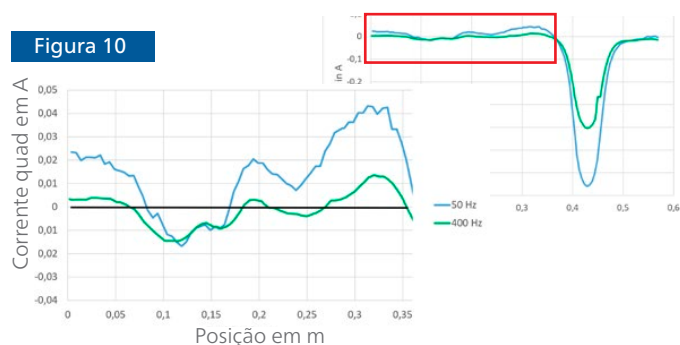
Se medido com 0,5% de fluxo nominal em 400 Hz, o pico mais alto no defeito possui um valor absoluto de amplitude de cerca de 400 mA, enquanto a 4% e 50 Hz o pico chega a cerca de 650 mA (Figura 9). Apesar de ser muito mais baixo, o fluxo foi reduzido pelo fator de oito (!).

Figura 9



Medição com a mesma tensão de excitação

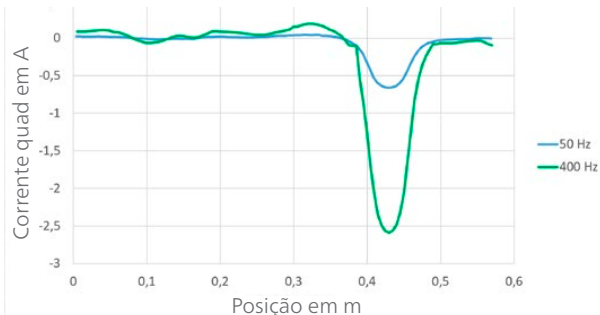
Além disso, também observamos uma flutuação menor próxima à linha zero da medição em 400 Hz ao olhar para a seção "saudável" do slot (Figura 10).



Diminua o zoom da seção do slot sem a falta

Como já assumido no primeiro experimento, ao manter o fluxo igual para ambas as frequências, a figura muda completamente, conforme exibido na Figura 11. Nesse caso, a amplitude da medição de 400 Hz é muito maior do que a da medição de 50 Hz. Ao comparar isso com a medição na Figura 10, lembre-se da escala diferente no eixo vertical.

Figura 11



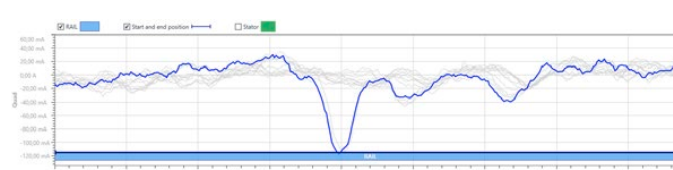
Medição com o mesmo fluxo; lembre-se da escala diferente no eixo vertical em comparação com a Figura 9.

Um limite absoluto de frequências diferente da frequência nominal não existe e pode ser o assunto de investigações futuras. Apesar de não existirem limites, a medição com frequências maiores pode ser uma abordagem atrativa. Como a medição do fluxo de dispersão também é um método comparativo, ela passa a impressão de que picos de medições em locais de falta são claramente visíveis com frequências maiores.

## VI. DETECÇÃO DE FALTAS MAIS PROFUNDAS NO NÚCLEO DO ESTATOR

Faltas na laminação de isolamento podem ser detectadas, mesmo que estejam localizadas em uma parte mais profunda do núcleo do estator. Isso é demonstrado em um caso de uso prático, em que um motor estava na oficina para reparos devido a um defeito monofásico na máquina. A proteção funcionou bem nesse caso e disparou quase que imediatamente, portanto o dano na máquina devido à falta foi comparativamente pequeno e invisível se observado de fora. Uma inspeção endoscópica em cada duto de ventilação foi capaz de localizar o problema. Sabia-se, por esta investigação, que a falta estava localizada no lado inferior de uma barra mais baixa. O líder do projeto responsável pelo reparo queria saber se o núcleo do estator

Figura 12



Resultado da medição do motor na oficina onde um problema de cerca de 800 mm no núcleo do estator está claramente visível.

foi afetado e se também precisa de reparos.

Além disso, o operador estava convencido de que o problema no núcleo do estator já estava presente antes da manutenção e que o dano não ocorreu durante a troca da bobina.

## VII. COMPARAÇÃO COM AS MEDIÇÕES DE FLUXO

Para poder fazer declarações a respeito da comparação entre a medição do fluxo de dispersão e a situação durante a operação da máquina, foi realizada uma medição de comparação. A máquina de teste foi renovada completamente, então havia a possibilidade de implementar faltas e compará-la com o teste de fluxo total e uma câmera termográfica.

A Figura 13 mostra a implementação dessas faltas, de forma exemplar em dois locais. Diferentes formas de implementação foram testadas.

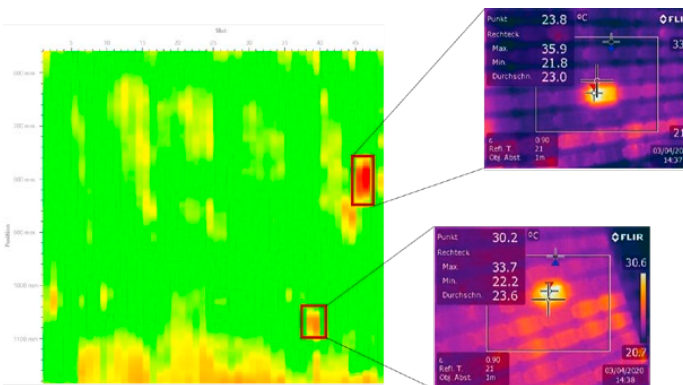
Figura 13



Exemplo da implementação de falta e pintura em preto para evitar reflexão durante a medição termográfica.

Dependendo da técnica de modificação, nem todo ponto demonstra um aumento significativo, por exemplo no aumento de temperatura durante o teste de fluxo total, ou na medição do fluxo de dispersão. Duas modificações mostraram um aumento de temperatura  $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que é considerado crítico [1]. Esses locais também poderiam ser detectados com segurança com a medição do fluxo de dispersão e uma amplitude maior do que 100 mA. O mapa de calor com os resultados de todo o estator, assim como a imagem termográfica dos dois pontos críticos, estão demonstrados na Figura 14. Os outros pontos apresentaram um aumento de temperatura menor se comparado ao ambiente adjacente. Eles também estiveram visíveis na medição do fluxo de dispersão, já que os locais com maior perda de fluxo permaneceram abaixo do limite de 100 mA.

Figura 14



Mapa de calor da medição do fluxo de dispersão incluindo figuras termográficas da medição de comparação com o fluxo total. Esses dois locais com maior aumento de temperatura poderiam ter sido identificados também na medição do fluxo de dispersão, onde ambos os pontos apresentaram uma amplitude maior do que 100 mA.

## VIII. CONCLUSÃO

Conforme apresentado neste artigo, a medição do fluxo de dispersão com o CPC 100 é um método confiável para detectar pontos fracos no isolamento de interlaminação de núcleos do estator. A portabilidade do equipamento e a configuração fácil tornam a solução interessante para realização de medições no local, assim como para aplicações em oficinas. Além disso, uma alta usabilidade é alcançada por um movimento semiautomático do sensor e pelo software de suporte PTM.

Poderia ser comprovado com sucesso que faltas localizadas em uma parte mais profunda do núcleo do estator foram detectadas. Além disso, a comparação com a medição de fluxo total demonstrou os mesmos resultados.

## Referências

1. IEEE Std 56-2016 "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines," Annex D (informative), setembro de 2016.
2. Cigre brochure 257, "EL CID (ELECTROMAGNETIC – CORE IMPERFECTION DETECTOR) TESTING OF LARGE STEAM-TURBINEDRIVEN GENERATORS", Working group A1.01.06, outubro de 2004
3. [3] Bertenshaw, David Ronald: "STATOR CORE INTERLAMINATION FAULTS AND THEIR DETECTION BY ELECTROMAGNETIC MEANS". Manchester, 2014

## Os autores

**Fabian Öttl** é um gerente de produtos na OMICRON Technologies, na Itália. Em sua função, é responsável por testar máquinas rotativas e equipamentos de diagnóstico. Antes de se juntar à OMICRON, Fabian trabalhava no departamento de P&D de uma fabricante de grandes geradores como especialista em isolamento de alta tensão. Ele recebeu o seu certificado como Mestre em Ciências da Graz University of Technology em 2011.

Ele escreveu muitos artigos técnicos e científicos e contribuiu para diferentes grupos de trabalho da Cigre e da IEC.

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



OMICRON is an international company serving the electrical power industry with innovative testing and diagnostic solutions. The application of OMICRON products allows users to assess the condition of the primary and secondary equipment on their systems with complete confidence. Services offered in the area of consulting, commissioning, testing, diagnosis and training make the product range complete.

Customers in more than 160 countries rely on the company's ability to supply leading-edge technology of excellent quality. Service centers on all continents provide a broad base of knowledge and extraordinary customer support. All of this together with our strong network of sales partners is what has made our company a market leader in the electrical power industry.

For more information, additional literature, and detailed contact information of our worldwide offices please visit our website.

[www.omicronenergy.com](http://www.omicronenergy.com)

Subject to change without notice.