



**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

AValiação DA QUALIDADE DO NÚCLEO ESTATÓRICO E DETERMINAÇÃO DE IMPERFEIÇÕES NA ISOLAÇÃO ENTRE CHAPAS

**Egídio José Faria*
Voith Siemens Hydro**

**Ernesto Locato Mazolla
Voith Siemens Hydro**

RESUMO

O presente trabalho visa mostrar os diferentes métodos para avaliar a qualidade do núcleo quanto a determinação de pontos quentes (imperfeições na isolação das chapas) e assim determinar sua qualidade e condições de operação.

Pretende-se mostrar a aplicação não somente em núcleos de máquinas novas, mas principalmente a importância destes métodos na avaliação da troca dos núcleos por ocasião da modernização e repotenciação de geradores de usinas existentes.

PALAVRAS-CHAVE: hidrogeradores – núcleo estatórico – imperfeições – perdas.

1.0. INTRODUÇÃO

O núcleo estatórico dos geradores é composto por chapas estampadas de aço-silício de baixa perda e pequena espessura. Estas chapas são envernizadas para proporcionar uma isolação elétrica e evitar a circulação de corrente entre as mesmas (correntes de Foucault). Uma boa isolação entre chapas é importante também para garantir uma baixa perda no ferro do núcleo e uma alta eficiência da máquina, lembrando também que a perda no ferro é uma das parcelas que compõem as fontes de calor do estator e portanto também limita a capacidade térmica dos geradores.

Os segmentos que compõem os núcleos estatóricos são normalmente estampados por ferramentas, formando-se desta forma os diâmetros e as ranhuras onde serão alojadas o enrolamento. Devido a este processo de estampagem, normalmente após o corte, as chapas são lixadas para eliminar as rebarbas e devido a este lixamento é necessário um re-vernizamento. É importante também garantir a

qualidade da aderência do verniz à chapa para que não ocorra descolamento do mesmo durante a montagem e a vida útil de funcionamento do núcleo.

A presença de chapas em curto permitiria circulação de corrente e provocaria pontos quentes. Estas correntes de Foucault com certeza aumentariam a perda no ferro e reduziriam a eficiência do gerador. Além disso, os pontos quentes iriam colaborar para degradar e reduzir a vida útil do núcleo estatórico e também do enrolamento.

2.0. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS IMPERFEIÇÕES NO NÚCLEO

2.1. – Ensaio de magnetização

Atualmente é largamente utilizado no Brasil o método do ensaio de magnetização. Como o intuito do ensaio é determinar imperfeições na isolação entre chapas é escolhido normalmente o valor de 1,0 Tesla para que ocorra em um curto espaço de tempo o aquecimento do núcleo. O ensaio é realizado conforme a norma IEEE std. 56 (1977), item (8.1.10).

O ensaio consiste na colocação de espiras de maneira mais uniforme possível distribuídas pela circunferência envolvendo o núcleo e eventualmente a carcaça e aplicação de uma determinada tensão e corrente.



Figura 1 – Espira envolvendo núcleo e carcaça

O valor de densidade de fluxo magnético pode apresentar variação, em decorrência das perdas envolvidas no circuito elétrico, tais como queda de tensão nos cabos de média tensão, queda de tensão proveniente do circuito bifásico (fase/fase ou fase/neutro), distância entre o transformador da subestação e o transformador utilizado no ensaio e também da tensão disponível nos tap's do transformador utilizado no ensaio.

O cálculo da tensão de magnetização (U_{mag}) e corrente de magnetização (I_{mag}) segue as seguintes fórmulas :

$$U_{mag} = 4,44 \times B \times L \times HJ \times KFE \times F \times 1,1$$

Onde :

B = densidade de fluxo magnético desejada = 1 T.

L = altura do núcleo sem canais de ventilação.

HJ = altura da coroa do estator.

KFE = fator de empilhamento.

F = frequência da rede no ensaio.

O fator 1,1 é aplicado para considerar o fator de forma e a queda de tensão.

$$I_{mag} = K_i \times HJ \times \square \times (DA - HJ)$$

Onde :

K_i = Fator para considerar a não homogeneidade da distribuição do campo B, divisão do núcleo em segmentos e as placas de pressão, conforme o tipo de núcleo e construção, variando entre 1,1 e 2,0.

DA = diâmetro externo do núcleo.

Os valores acima são calculadas considerando-se uma espira. Um número de espiras é escolhido para adaptar à tensão disponível no local e à capacidade de corrente dos cabos que formarão as espiras. Por isso, considera-se uma faixa de densidade de fluxo magnético aceitável de 0,8 a 1,2 Tesla que é suficiente para o aquecimento do núcleo em curto espaço de tempo.

Além da necessidade dos cabos, para a realização do ensaio é necessário uma fonte de corrente com a capacidade dada por $U_{mag} \times I_{mag}$.

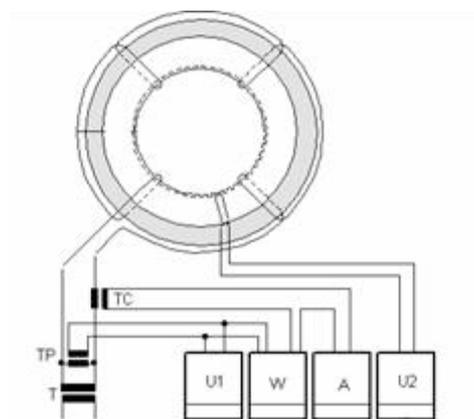


Figura 2 – Esquema de ligação

Onde :

U1 e U2 - Voltímetros c.a.;

A - Amperímetro;

W - Wattímetro;

TC - Transformador de corrente;

TP - Transformador de potencial;

T - Transformador utilizado no ensaio.

2.1.1 – Método de ensaio

Um ensaio de curta duração, ou seja, em uma hora, é suficiente para identificar pontos de imperfeição. Neste período, monitora-se pontos de coloração diferentes (pontos quentes) visualmente e através de um aparelho de termovisão a cada 15 minutos. Se algum ponto é identificado, interrompe-se imediatamente o ensaio e verifica-se a região com problema. Caso seja constatada alguma falha, esta é eliminada. Registros dos valores de corrente, potência e tensões também são realizados em intervalos de 10 minutos.

2.1.2 Critério de avaliação

A maior diferença de temperatura (\square) encontrada entre o ponto mais quente e a média dos demais pontos no momento de cada leitura deve atender os valores da tabela abaixo :

Avaliação	\square
Ótimo	< 5 K
Bom	\square 10 K

2.1.3 Considerações sobre o ensaio de longa duração

No passado, este ensaio era realizado também por 24 horas para proporcionar uma acomodação das chapas do núcleo. A implantação e recomendação deste ensaio teve origem após a verificação que era necessário uma acomodação das chapas que compunham o núcleo através de uma vibração forçada para posterior retorqueamento dos tirantes. Esta característica era implícita às chapas laminadas a quente. Desde a utilização das chapas laminadas a frio, tem-se verificado que esta acomodação tem sido desprezível quando se mede o torque residual nos tirantes. Em medições realizadas em núcleos onde foi realizado o ensaio de longa duração concluiu-se que o

ensaio pouco contribuiu para uma acomodação das chapas. Por isso, atualmente este ensaio é realizado somente quando solicitado, uma vez que para determinação de imperfeições no núcleo o ensaio de curta duração é suficiente, mais rápido e mais simples de executar.

O método, preparativos e arranjo para o ensaio de longa duração são os mesmos do ensaio de curta duração. Porém alguns cuidados a mais são tomados para máquinas com núcleo maior que 1,5 m de altura, como :

- Para evitar diferenças térmicas no núcleo, por causa de correntes de ar, o mesmo é completamente coberto com lona, desde sua parte superior até o piso.
- Para evitar o efeito “chaminé, instala-se resistores abaixo da carcaça, os quais podem ser ligados ou desligados, conforme a necessidade de diminuir a diferença de temperatura entre as placas de pressão superior e inferior.

Na primeira hora também é aplicado 1 T e nas seguintes reduz-se para uma tensão que proporcione uma densidade de fluxo magnético de 0,2 a 0,6 T. Durante este período monitora-se a temperatura para controlar os seguintes limites :

- Temperatura na base da ranhura $\square 70^{\circ}\text{C}$;
- Diferença de temperatura entre as placas de pressão inferiores e superiores $< 10\text{ K}$;
- Diferença de temperatura entre núcleo e carcaça $< 25\text{ K}$.
- Durante o aquecimento a elevação de temperatura não deve ultrapassar 5 K/h.

Através do ajuste dos valores de densidade de fluxo magnético entre 0,2 e 0,6 T mantém-se a temperatura do núcleo entre 60 e 70 $^{\circ}\text{C}$ no final do ensaio. em alguns casos é necessário ligar e desligar o circuito de magnetização e também resistores de aquecimento para que os limites sejam mantidos. Neste ensaio valem os mesmos critérios de avaliação.

2.2. – EL CID

A utilização do método EL CID (“ELetromagnetic Core Imperfection Detection”) vem crescendo no Brasil e é muito utilizado principalmente nos Estados Unidos.

Existe uma maior quantidade de dados , ensaios e experiência na utilização em turbogeradores, onde não surgem fenômenos espúrios que acabam prejudicando tanto a medição quanto a análise dos resultados. Estes fenômenos se devem as descontinuidades que podem aparecer nos hidrogenadores, por exemplos, máquinas, que devido a suas dimensões tem o núcleo estatórico fornecido em partes a serem montadas na obra.

Este método dispensa a necessidade de fontes independentes como a utilização do transformador de excitação e cabos de maior capacidade. Porém requer equipamento especial e conhecimento e experiência para operá-lo.

Este método foi desenvolvido no final da década de 70 pela Central Electricity Generating Board na Inglaterra, sendo uma maneira mais fácil de se verificar a qualidade e condição do núcleo do estator que o teste de magnetização. Com o teste ELCID é suficiente excitar o núcleo com apenas 4% da indução magnética nominal, podendo ser realizado com uma fonte em 110/220 V, de 10 a 20 A, monofásica. Isto aliado a

sensores montados em dispositivos roboticos, permitem fácil acesso a praticamente qualquer núcleo de estator, de forma prática e rápida, podendo ser realizado como enrolamento montado.

O método pode ser aplicado em máquinas onde:

- a) todos os pólos foram removidos, porém o rotor não (ex. Ludington Pumped Station - USA)
- b) poucos pólos foram removidos (Chute a Caron Storage Station - Canada)
- c) não são removidos nenhum pólo (Waldeck - Alemanha)
- d) máquinas novas, tanto na fábrica quanto no campo, com ou sem o rotor instalado (Mariborsk - Eslovenia)

2.2.1 Método de ensaio

Para a realização deste ensaio, é necessário pessoal experiente para a interpretação dos resultados.

Devem ser feitos os seguintes trabalhos preliminares:

- Cálculo da excitação do núcleo.
- Verificar a melhor maneira de acessar o pacote de chapas, definido-se por um sistema de robô, carrinho ou manual para explorar toda a superfície do núcleo.
- Instalação do enrolamento de excitação composto de espiras de fio fino e muito mais fácil de trabalhar que os utilizados para os ensaios de magnetização que envolvem corrente mais altas.
- Ajustar o aparelho para trabalho na faixa de 100 mA.
- Verificar na primeira ranhura, se todos os parâmetros calculados estão devidamente ajustados e correspondem a realidade.
- Verificar cada uma das ranhuras individualmente.

3.0. - COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS

3.1. – Vantagens e desvantagens

Uma vantagem do ensaio de magnetização é a simplicidade de execução do mesmo, assim como, a clareza dos critérios de avaliação. Portanto não requer um equipamento especial específico e muita experiência do operador.

Caso possa-se aproveitar cabos existentes e o transformador também já esteja disponível na obra, o custo do ensaio é relativamente barato, principalmente considerando que só é necessário o ensaio de curta duração. Porém quando os cabos e o transformador precisam ser adquiridos especialmente para este ensaio, esta vantagem desaparece quando comparado ao EL CID.

Este último leva vantagem nos cuidados necessários para a execução do ensaio, pois não aquece o núcleo, não provoca vibração das chapas, não requer grandes montagens e não utiliza-se de valores elevados de corrente ou tensão, o que concede mais segurança ao operador e à máquina, permite análise tanto do interior quanto do exterior da ranhura, mesmo com o enrolamento inserido. Além disto, permite uma perfeita análise ao longo do tempo, pois todos os dados são registrados podendo servir de comparação com medições futuras.

3.2. – Experiências realizadas em fábrica

Experiências práticas foram realizadas em um núcleo, que apesar de novo foi "danificado", ainda em fábrica, sendo produzidos diferentes tipos de danos, que foram avaliados tanto por um método quanto pelo outro. Diferentes falhas geradas pela introdução de uma arruela entre chapas, pinturas condutivas e até mesmo um ponto de solda passaram pela análise.

Além deste núcleo, também um outro onde a temperatura de um ponto estava poucos graus acima da média, porém ainda dentro do especificado, foi analisado sendo seus resultados apresentados. Ambos os núcleos foram ensaiados pelos dois métodos, sendo apresentados abaixo os ensaios e resultados.

3.2.1. Núcleo danificado

3.2.1.1 Introdução das falhas artificiais

Na fábrica existia um núcleo fabricado para um cliente que por problemas financeiros desistiu da compra. O que nos gerou a oportunidade de realizar algumas experiências destrutivas ou não no mesmo.

- a) Vários pontos do núcleo foram pintados com tinta condutiva, tentando simular um curto circuito entre chapas, o que representaria a presença de sujeira tal como limalha de ferro e outros materiais condutivos sobre a superfície.
- b) Introdução de arruelas entre chapas do núcleo, gerando curtos francos entre duas chapas.
- c) Pontos de solda colocando diversas chapas em curto no mesmo local.

3.2.1.2 Comparação de resultados pelos dois métodos de ensaio

- a) Pintura condutiva: não foram detectadas alterações de corrente (EL CID) ou temperatura (magnetização).
- b) Arruelas entre chapas: os resultados encontrados para os dois métodos foram pouco afetados pela introdução das arruelas, porém a corrente nos locais danificados subiu cerca de 10% e ocorreu um incremento na temperatura de 2 K. Ambos os resultados seriam considerados normais sendo o núcleo aprovado para funcionamento.
- c) Pontos de solda: Ocorreu uma grande variação na corrente, com a mesma ultrapassando 100 mA (o valor antes da introdução das falhas artificiais era cerca de 40 mA) e a temperatura subiu 12 K, com os dois métodos indicando falhas na qualidade do núcleo, e a necessidade de reparo ou até mesmo substituição parcial ou total das chapas.

3.2.2. Núcleo em processo normal de fabricação

Este núcleo também foi submetido aos dois ensaios. Durante a magnetização foi encontrado um ponto com uma elevação de temperatura de 6K, dentro dos nossos padrões de aprovação, porém acima da média normalmente obtida em fábrica, entre 2 a 4 K. Através do EL CID, a mesma região do núcleo foi estudada sendo localizado o mesmo ponto com uma corrente de 70 mA, também dentro dos padrões de aceitação deste equipamento, porém também acima do obtido em outras áreas.

3.3. – Limites para utilização dos dois métodos

Cada um dos métodos apresenta vantagens e desvantagens que podem ser vistas abaixo:

- a) Magnetização: de fácil interpretação e muito bem aceito por todas as empresas e especialistas, pode gerar grandes gastos de equipamentos (fontes de alimentação e cabos) e transporte, além das dificuldades de montagem. Não é indicado para máquinas com o enrolamento inserido e o rotor mais pólos montados.
- b) EL CID: não envolve grandes fontes de alimentação, reduzindo drasticamente custos com estes equipamentos. Graças a sistemas robotizados pode ser aplicado em condições extremas onde não há possibilidade, devidos a dimensões reduzidas, da entrada de pessoas para controle das temperaturas. Permite um acompanhamento melhor da evolução da máquina, possibilitando medições futuras, pois pode ser empregado com grande confiabilidade mesmo com os enrolamentos inseridos, medindo inclusive o interior das ranhuras nesta condição. Como desvantagens podemos citar o problemas causados pela discontinuidade dos núcleos, que gera correntes diferentes daquelas encontradas em núcleos contínuos, impossibilitando ou dificultando de sobremaneira a interpretação de resultados, que via de regra deve ser realizada por pessoa capacitada e altamente treinada para isto. Através da aplicação cada vez maior de circuitos eletrônicos, novas experiências e pesquisas, o efeito da discontinuidade esta cada vez mais sendo reduzido.

4.0 – APLICAÇÃO PRÁTICA EM MODERNIZAÇÃO DE USINAS

Na modernização de geradores, o núcleo é sempre um dos componentes avaliados, se deve permanecer ou ser substituído. Nem sempre há ganho na potência do gerador quando ele é substituído, porém existe a necessidade de avaliar a qualidade de sua isolação, para evitar uma nova intervenção na máquina em curto espaço de tempo. Para esta avaliação é necessário utilizar um dos métodos acima. O método EL CID tem vantagens principalmente por causa da presença do enrolamento estatórico montado nas ranhuras e redução de trabalhos de desmontagens através da utilização de sistemas de coleta de dados acoplados em carrinhos robotizados.

5.0. CONCLUSÃO

Tratam-se de dois sistemas muitas vezes considerados como complementares, especialmente onde temos discontinuidades nos núcleos estatóricos. Porém, pelo observado em fábrica, e considerando a grande evolução apresentada pelo EL CID, tal deficiência deve ser resolvida brevemente.

Para ensaio de núcleos no campo, e com máquinas montadas, o EL CID se apresenta com uma excelente opção.

6.0. BIBLIOGRAFIA

- (1) IEEE std 56 (1977)

- (2) Voith Siemens Hydro – Instrução Técnica para ensaio de magnetização de curta duração.
- (3) Voith Siemens Hydro – Instrução Técnica para ensaio de magnetização de longa duração.
- (4) Voith Siemens Hydro – Procedimento para cálculo de dados para ensaio de magnetização.
- (5) Limited Access Inspection of Hydrogenerators - Brad McNamara - Adwel, John Maybury - Adwel
- (6) Current Low Power Core Testing Using EL CID - D. B. Paley - Adwel
- (7) Verification of the Effectiveness of EL CID on a Hydrogenerator Stator Core - D. B. Paley - Adwel, Brad McNamara - Adwel, G Mottershead - Voith Siemens, S. C. Onken