



GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

SISTEMA DE ISOLAMENTO DE BOBINADO ESTATÓRICO DE MÁQUINA DE ALTA TENSÃO, ATUALIZAÇÃO TECNOLÓGICA E INTERPRETAÇÃO DE NORMA.

TAKAO PAULO HARA (1); GUILHERME TAKAO HARA (1); LUCAS IMAIZUMI PEREIRA (2)
HARA ENGENHARIA LTDA (1) IMA ENERGIA (2)

RESUMO

Conforme IEC 60034-1, o estator com isolamento classe térmica F (155 °C) deve ter elevação máxima de temperatura de 83 °C. com vida estimada de aproximadamente 240.000 horas, ou seja, 27,4 anos. Isto parece muito razoável, visto que as concessões de empreendimentos bem com a vida econômica de aproximadamente 30 anos. Não é desejável falhas ou defeitos graves no sistema de isolamento do estator no período de 30 anos. O que devemos fazer para que este fato não ocorra, mesmo que existam diversas normas técnicas e diferentes tecnologias de isolamento no mercado. Esclarecer aspectos técnicos e de aceitação de um bom sistema de isolamento.

PALAVRAS-CHAVE

Palavra-Chave, Gerador, Motor, Máquinas Síncronas, Norma, Vida Útil

1.0 INTRODUÇÃO

Conforme IEC 60034-1, o estator com isolamento classe térmica F (155 °C) de uma máquina 13,8 kV deve ter elevação máxima de temperatura de até 83 °C. Considerando uma temperatura de ar frio de 40 °C, tem-se como consequência uma temperatura máxima de 123 °C, o que pela regressão de Arrhenius tem-se uma vida estimada de aproximadamente 240.000 horas, ou seja, 27,4 anos – considerando apenas o envelhecimento por temperatura do isolamento. O período estimado é considerado adequado tendo em vista que as concessões de empreendimentos, bem com a vida econômica são de aproximadamente 30 anos para empreendimentos público ou privado.

Não é desejável falhas ou defeitos graves no sistema de isolamento do estator, considerado o coração da máquina elétrica de alta tensão, no período previsto de operação de 30 anos. Uma falha ou defeito grave irá indispor a máquina por longos períodos, o que pode representar enorme prejuízo ao agente. Entende-se que uma indisponibilidade de 2,0% é razoável para atender a manutenção preventiva, falhas ou defeitos graves, desta forma, o projeto, fabricação e manutenibilidade devem ser atendidas. No caso de motores, deixando de acionar a carga, que normalmente é aplicado em processo de grande volume de envio ou processamento de material. Para geradores, deixando de gerar energia assim e consequentemente não atendendo contrato, se isto ocorrer em época de escassez de geração, o custo da energia no curto prazo poderá estar em valores elevados. No caso de compensadores síncrono, a sua indisponibilidade resultará em perdas de receita imediatamente via redução da Receita Anual Permitida - RAP. Desta forma, deve-se ocorrer indisponibilidade apenas quando previstas no plano de manutenção (< 2%). O que deve-se fazer para que não tenha indisponibilidade por falha ou defeito grave, mesmo que haja diversas normas técnicas e diferentes tecnologias de isolamento no mercado? Por que as falhas e defeitos prematuros ocorrem? Este trabalho aborda as principais questões que vai ao encontro da mitigação das possíveis falhas e defeitos prematuros.

Este trabalho trata de máquinas elétricas rotativas que operam sem inversor de frequência (PWM). Visto que as máquinas elétricas rotativas que operam com inversor de frequência, possuem requisitos de projeto e operação específicos. Para diferentes temas, existem normas específicas.

No aspecto técnico, o conceito ideal consiste em fabricar um sistema de isolamento com mínimo de vazios no isolamento principal e que o sistema de proteção anti-corona tais com ICP – Inner Corona Protection, OCP – Outer Corona Protection e ECP End-winding Corona Protection sejam bem dimensionados. Apesar de ser relativamente simples, alguns fabricantes e oficinas de reparo apresentam resistências ou tem dificuldades em se atualizar tecnologicamente em material e nos seus processos de fabricação para que se obtenha valores adequados para uma boa performance do sistema de isolamento.

As normas que tratam deste assunto definem geralmente os procedimentos de ensaio e são raras as normas que sugerem valores de aceitação. No entanto, quando sugerem, são muito generosos, resultando em sistemas de isolamento inadequados para o tempo operativo esperado de cerca de 30 anos. Os fabricantes e as oficinas de reparo atendem facilmente os valores sugeridos nas normas.

Para cada tipo de ensaio existem uma série de normas, o que torna difícil para o profissional não especialista em sistema de isolamento discernir qual norma é a mais adequada e qual o valor de aceitação adotar. Os principais ensaios para assegurar a qualidade do bobinado serão abordados neste trabalho, assim como as suas respectivas normas e critérios de aceitação.

As escolhas inadequadas dos sistemas anti-corona têm levado os fabricantes e oficinas de reparo a ter altos níveis de corona e descargas parciais no bobinado. Nos casos graves, tem surgido descargas elétricas (sparking erosion) na ranhura e altos níveis de corona na região de sobreposição (luva) da OCP/ECP. Muitos operadores de máquinas convivem com o problema de corona e que a princípio não tem solução de correção, visto que são equívocos de projeto, de escolha de material ou de processamento inadequado durante a fabricação. O problema de correção se agrava caso o bobinado seja pintado com tinta ou verniz de acabamento preto, vermelho, rosa, azul, branco, ou outras cores, visto que a tinta ou verniz com pigmento colorido dificulta o acesso ao OCP e ECP.

Apesar da tecnologia e conhecimento sobre descargas parciais ter algumas dezenas de anos e ser normalizada pelas normas IEEE 1434, IEC 60034-27-1, IEC 60034-27-2, IEC 60270 e ASTM D1868, muitos fabricantes e oficinas de reparo ignoram ou tem dificuldades em realizar o ensaio de descargas parciais. Este ensaio quando adequadamente realizado, atenuando os ruídos, traz mais informações do sistema de isolamento comparado as perdas dielétricas ($\tan \delta$), visto que a perda dielétrica indica a média dos vazios ao longo da parte medida. A medição de descargas parciais indica o nível de vazios excitados, a tensão que se iniciam as descargas parciais – *Partial Discharge Inception Voltage (PDIV)* – e onde as descargas parciais ocorrem, tais como na região do cobre, no isolamento principal e na superfície do isolamento. Existe uma enorme dificuldade ou agravante pelas normas não sugerirem valores de aceitação. Para dificultar ainda tem-se a discussão da unidade de medida das descargas parciais seja em μA , dB, mV ou pC, onde não existe um padrão na unidade de medida, mas a predominância é em tensão (mV) ou em carga aparente (pC).

Neste trabalho, discutem-se os ensaios polêmicos sobre sistema de isolamento, as normas vigentes e suas interpretações. Ademais, se esclarecem os aspectos técnicos e os valores recomendados para aceitação de um bom sistema de isolamento. Vale destacar que a renovação dos profissionais que atuam no mercado por parte dos agentes e O&M de máquinas, bem como dos fabricantes e das oficinas de reparo, corroboram para a publicação deste trabalho.

2.0 – PROJETO DO SISTEMA DE ISOLAMENTO

Num sistema de isolamento de alta tensão, buscam-se as seguintes características:

- Alta rigidez dielétrica;
- Alta resistência para descargas parciais (DP);
- Alta condutividade térmica;
- Boa resistência a abrasão;
- Boa resistência a delaminação devido ao aquecimento térmico;
- Boa resistência a umidade de vapor de óleo.

Do ponto de vista de rigidez dielétrica, o sistema de isolamento deve-se adotar soluções conservadoras ou clássicas, visto que uma ousadia no projeto pode custar muito caro ao agente. Assim deve-se ter um isolamento com rigidez dielétrica na ordem, de 2,5 kV/mm, podendo utilizar até 2,75 kV/mm, com a consequente espessura de isolamento para a tensão nominal da máquina de alta tensão.

Sob a ótica das descargas parciais, no passado, a resistividade do OCP era muito difícil de ajustar, visto que cada fabricante tinha o seu produto e tecnologia, onde era cercado de segredo industrial, assim as oficinas reparadoras não tinham acesso. Atualmente existem vários produtos comerciais, padronizados e de fácil acesso pelos fabricantes (OEM) e reparadoras. O OCP com resistência superficial de 400 Ω/\square tem apresentado melhor desempenho quanto ao contato barra/ranhura e equalização do efeito corona.

Tem-se ainda a questão do comprimento do OCP, visto que muitas máquinas de alta tensão têm problema de corona devido comprimento do OCP inadequado. A experiência tem demonstrado que o comprimento adequado do OCP deve estender no mínimo 10 mm além da altura do dedo de aperto, assim atenuando bem o campo elétrico na região da transição do stress na saída do núcleo.

Quanto a ECP, existem no mercado material com 3 faixas de aplicação, que depende basicamente do comprimento da cabeça de bobina e da corrente capacitiva. A sobreposição da OCP/ECP, que denominamos de luva (overlap) deve ser na ordem de 20 a 30 mm.

Para um sistema de isolamento adequado e equilibrado, as seguintes etapas devem ser consideradas:

- Isolamento do condutor, que depende da aplicação da máquina;
- Isolamento entre espiras, que depende do nível de tensão e aplicação da máquina;
- Isolamento para a terra, que depende do nível de tensão e aplicação da máquina;
- Isolamento entre fases na cabeça de bobina, que depende do nível de tensão e aplicação da máquina.

3.0 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO ISOLAMENTO PRINCIPAL

Existem duas tecnologias de isolamento: Vacuum Pressure Impregnation (VPI) e Resin Rich (RR). Dentro da tecnologia VPI, dois processos podem ser adotados, single ou global VPI. Os processos de cura de cada sistema estão descritos a seguir.

3.1 Single VPI

Neste processo isola-se a barra ou bobina conformada com fita de mica porosa; posiciona-se um grupo de barras ou bobinas em moldes dedicados de impregnação para assegurar o dimensional; e impregna-se com resina epóxi em tanque de VPI – Vacuum Pressure Impregnation. Retiram-se as barras ou bobinas do tanque VPI e finaliza a cura do isolamento em estufa. Desmolda-se e realiza-se o acabamento.

3.2 Resin Rich

Neste processo isola-se a barra ou bobina conformada com fita de mica rica em resina epóxi com substrato porosa, numa prensa térmica com dispositivos dedicados nas dimensões do projeto, a barra ou bobina é pré-aquecida na temperatura para fluir a resina epóxi, assim que houver a fluidez da resina epóxi, aumenta-se a temperatura e a pressão, mantém-se essas condições por um determinado tempo até a cura da resina epóxi. Reduz-se a temperatura e a pressão e remove-se a barra ou bobina para acabamento.

A prensa térmica pode ser realizada de diferentes formas, os fabricantes que possuem grande volume de fabricação, utilizam prensa térmica hidráulica. Já as reparadoras, utilizam prensa mecânica (aperto por grampos) associado à estufa.

3.3 Processo Global VPI

Neste processo isola-se a barra ou bobina conformada com fita de mica rica em resina epóxi com substrato porosa, instala-se na ranhura, fazem-se as conexões e amarrações. O núcleo bobinado é impregnado no tanque de VPI, similar ao descrito anteriormente. Este processo não é recomendado para aplicação em máquinas de alta tensão que utilizam OCP, isto é agravada se a máquina for de grande porte. Dificilmente um bobinado em global VPI atenderá o requisito inicial deste trabalho, que é vida útil de 30 anos e disponibilidade > 98% ao longo da vida. Neste processo, há a dificuldade de assegurar o contato da OCP com a ranhura, impregnação adequada devido a dimensão da máquina e a espessura do isolamento, delaminações podem ocorrer devido ao efeito da dilatação térmica na operação, elevado nível de corona e descargas parciais. Se há necessidade de selagem do bobinado (necessidade técnica), ele pode ser fabricado com sistema single VPI ou Resin Rich e após bobinado, fazer o processo de selagem com resina adequada. Inclusive este processo e avaliação está previsto em 20.18.2 da NEMA MG-1:2009 – Motor and Generator.

Bobinado Global VPI dificilmente permite reparos em caso de falhas ou defeitos graves. Normalmente há necessidade de rebobinar o estator, por completo, em casos graves, há necessidade de substituir o núcleo.

O sistema Global VPI é adequado para aplicação em máquinas de baixa tensão, onde não há a necessidade de utilizar o OCP, logo, são tensões que não há problema de corona, descargas parciais e de dimensões que o efeito da dilatação térmica não provoca descolamento.

Normalmente o custo do sistema Global VPI é bem menor comparado ao single VPI e ao Resin Rich.

4.0 - ISOLAMENTO

Para assegurar um sistema e isolamento com poucos vazios e com sistema de OCP e ECP bem dimensionados, deve-se atentar para os seguintes ensaios.

4.1 Isolamento do condutor

Normalmente os agentes não interferem na especificação ou escolha de solução. No entanto, é de suma importância o correto dimensionamento da isolação do condutor. Principalmente se será barra com transposição Roebel ou bobinas multiespiras. Atualmente existem 3 principais tipos de solução: isolamento com verniz de alta qualidade, verniz com camada de poliglass e verniz com fita de mica. A escolha de cada tipo de isolamento está associada a aplicação e a severidade de trabalho da máquina.

4.2 Isolamento entre espiras

O sistema de isolamento entre espira deve ser robusto de tal forma a suportar a tensão residual por surto de manobra do para raio do cubículo de surto. Por exemplo, para uma máquina de 13,8 kV, utilizando para raio de classe 15 kV, há uma máxima tensão residual para impulso de manobra de 40 kV_{pico} e de impulso íngreme de 54,9 kV_{pico}.

Para avaliar e aprovar o isolamento entre espiras, temos atualmente duas normas:

4.2.1 IEEE 522:2004 – Guide for testing turn insulation of form-wound stator coil for alternating-current. A norma recomenda aplicar 3,5 o resultado da tensão de fase-terra x raiz quadrada de 2. Neste caso, para 13,8 kV, termos 39,4 kV_{pico}. O que está coerente com a máxima tensão residual por surto de manobra de 40 kV_{pico}.

A norma recomenda que os ensaios devem ser realizados nas seguintes etapas:

Na bobina individual após a fabricação. Sugere-se realizar também na bobina antes do isolamento;

Na bobina completamente montada no estator;

Em bobina individual e montada no rebobinamento de máquina;

Em bobinas de máquina em operação, manutenção preventiva, geralmente aplica-se 75% do valor de máquina nova.

4.2.2 IEC 60034-15: Impulse voltage withstand levels of form-wound stator coils for rotating a.c. machines

A norma recomenda aplicar 4 vezes da tensão de fase + 5000 V. Neste caso, para 13,8 kV, teremos 60,2 kVpico. O que está coerente com a máxima tensão residual por impulso íngreme de 54,9 kVpico.

A norma recomenda realizar os ensaios de impulso nas mesmas etapas da norma IEEE 522, porém para bobinas de máquina em operação, em uma manutenção preventiva, geralmente, aplica-se 65% do valor de máquina nova.

São raras as empresas que atendem as normas IEEE 522 ou IEC 60034-15 para bobinas acima de 4,3 kV. Logo, para bobinas com tensão maior que 4,3 kV, realiza-se com tensão reduzida ou não fazem este ensaio. Esta é a maior razão de curto-circuito prematuro de bobina na ranhura de estator, se iniciando por curto entre espiras e evoluindo para uma falha terra. A solução mais comum é isolar a bobina falhada (by-pass), assim causando desequilíbrio elétrico e magnético. Se o estator for de poucas bobinas por circuito por fase, pode-se haver concentração de fluxo e fundir o núcleo magnético.

4.3 Isolamento para a terra

Conforme descrito anteriormente, deve-se escolher qual tecnologia de isolamento utilizar (single VPI, Resin Rich ou Global VPI) e o stress no dielétrico (kV/mm). Se a máquina é grande de porte, descarta-se a aplicação de global VPI, pelas razões já comentadas. As outras, Single VPI ou Resin Rich, conseguem obter qualidade, custos e prazos equivalentes.

Na produção do isolamento, deseja-se o mínimo de micro vazios na isolação, desde o cobre até a parede externa. O isolamento deve ser uniforme na espessura das quatro laterais, proporção mica/resina, boa aderência no cobre, etc.

5.0 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO ISOLAMENTO

Para avaliar a qualidade de isolamento, há muitas normas e de diferentes origens. Debate-se a seguir as normas mais relevantes.

5.1 Perdas dielétricas

As perdas dielétricas também são conhecidas como tangente de delta ou fator de potência, medem a média das imperfeições ou micro vazios na isolação.

Para medir as perdas dielétricas do isolamento, temos as normas.

5.1.1 IEEE 286:2000 - Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation,

Esta norma apresenta as várias formas de medir a perdas dielétricas, tanto em barras e bobinas, como em bobinado completo. Ela sugere que seja medido as perdas em 2, 4, 6 e 8 kV para máquina de 13,8 kV, sendo 25% de tensão de fase-terra. Define tip-up como perdas em 8 kV menos perdas em 2 kV. Não sugere valor máximo de perdas e tip-up.

5.1.2 IEC 60894: 1987 - Guide For Test Procedure For The Measurement Of Loss Tangent Of Coils ABars For Machine Windings

Esta norma está obsoleta. Visto que existia a VDE 530 que tratava deste tema com maior abrangência e aceitação pela comunidade técnica.

5.1.3 EN 50209:1999 - Test of insulation of bars and coils of high-voltage machines

Esta norma é derivada da VDE 530, como a norma é alemã, na criação da norma europeia, ela foi editada apenas neste tema. Os demais temas da VDE 530 foram absorvidos pela IEC 60034.

Nesta norma, a referência de tensão é a nominal, representada como V_n . Tendo como critério de aceitação:

$$\text{tg}\delta_{0,2}: 30 \times 10^{-3}$$

$$\Delta\text{tg}\delta: 5 \times 10^{-3}$$

$$\frac{1}{2}(\text{tg}\delta_{0,6} - \text{tg}\delta_{0,2}): 2,5 \times 10^{-3}$$

5.1.4 IEC 60034-27-3:2015. Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines

Para que este tema fosse inserido na IEC 60034 que trata de máquinas elétricas rotativas, na tentativa de absorver a IEC 60894 e a EN 50209, foi criada a IEC 60034-27-3.

Nesta norma, a referência de tensão é a nominal, representada como V_n . Tendo como critério de aceitação:

$$\text{tg}\delta_{0,2}: 20 \times 10^{-3}$$

$$\Delta\text{tg}\delta: 5 \times 10^{-3}$$

$$(\text{tg}\delta_{0,6} - \text{tg}\delta_{0,2}): 5 \times 10^{-3}$$

Comparando as duas normas, verifica-se que existem diferenças em $\text{tg}\delta_{0,2}$ e no tip-up. Esta diferença não é relevante, mas devido ao histórico de uso como sugere a EN 50209, principalmente o tip-up, este vem sendo utilizado desde a norma VDE 530, logo esses números estão nas mentes dos profissionais de isolamento.

O estabelecimento dos valores máximos para perdas diétricas e o tip-up sempre foi controverso. O usuário final considera que os limites propostos são muito fáceis de atingir e não garante que a parede do isolamento esteja bem impregnada. Alguns fabricantes de máquinas consideram que os limites propostos também são conservadores, mas se reduzir muito os valores de aceitação algumas bobinas e barras bem feitas seriam reprovadas.

Acontece que para bobinas ou barras passarem no ensaio do VET – Voltage Endurance Test, os valores de perdas dielétricas e tip-up devem ser bem menores que ao proposta nas normas. A experiência tem mostrado que os valores devem ser 1/3 dos propostos pelas normas. Atualmente, os valores mais utilizados nas ET são:

$$\text{tg}\delta_{0,2}: 15 \times 10^{-3}$$

$$\Delta\text{tg}\delta: 2 \times 10^{-3}$$

$$\frac{1}{2}(\text{tg}\delta_{0,6} - \text{tg}\delta_{0,2}): 1 \times 10^{-3}$$

5.2 Descargas Parciais

O ensaio de descargas parciais tem como objetivo medir os vazios existentes no isolamento que são excitados com a presença do campo elétrico. O grande benefício deste ensaio é que se pode identificar os vazios com a atividade das descargas parciais e onde estão ocorrendo: na região da superfície da barra, no meio do isolamento ou próximo ao cobre.

5.2.1 IEC 60270:2000 - High-voltage test techniques - Partial discharge measurements

Esta norma apresenta as várias possibilidades de medição das descargas parciais em qualquer equipamento de alta tensão. Sua aplicação é mais utilizada em laboratórios e onde não existem normas específicas para equipamentos que tratam de descargas parciais. Ela recomenda que a descarga parcial seja medida em pC. A norma trata de medição desde 10 pC a, em casos graves, 1.000 pC. Desta forma, como existe norma específica para máquinas elétricas rotativas, iremos tratá-las a seguir.

5.2.2 IEC 60034-27-1: 2018 - Off-line partial discharge measurements on the winding insulation

Esta norma trata da medição de descargas parciais off-line. Recomendam as técnicas de medição e instrumentos, arranjo das instalações, normalização e sensibilidade, procedimento de medição, redução de ruído, documentação dos resultados e interpretação dos resultados para máquina acima de 6 kV e que não tenha sistema de supressão de corona na ranhura. Ela sugere que as descargas parciais podem ser medidas e analisadas em tensão (mV) ou carga aparente (pC), porém na tela do medidor devem apresentar os resultados em mV e pC.

Nesta norma a medição é realizada na parte inserida na ranhura. Não é medida na cabeça de bobina, visto que a fase adjacente não está energizada e não há tensão para terra, associado a isto, ainda temos a tensão que é baixa.

Apesar da norma não sugerir e nem recomendar valores mínimos, argumentando-se que a descarga parcial não é causa raiz. No entanto, na prática, há forte correlação das descargas parciais com a perda dielétrica e o OCP. Desta forma, verifica-se que uma barra ou bobina bem fabricada apresenta descargas parciais < 50 mV ou 50 pC. Para bobinado montado, os valores de descargas podem variar dependendo do tipo e comprimento da ECP e cabeça de bobina. Normalmente em bobinado bem fabricado as descargas parciais ficam < 100 mV ou 100 pC.

5.2.3 IEC 60034-27-2: 2012 On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines

Esta norma trata da medição de descargas parciais on-line. Recomendam as técnicas de medição e instrumentos, arranjo das instalações, normalização e sensibilidade, procedimento de medição, redução de ruído, documentação dos resultados e interpretação dos resultados para máquinas acima de 3 kV. Ela sugere que as descargas parciais podem ser medidas e analisadas em tensão (mV) ou carga aparente (pC), porém na tela do medidor devem apresentar os resultados em mV e pC.

Nesta norma também não é sugerido valores mínimos de descargas parciais, visto que em máquina operando, a criticidade de medição é muito maior. A medição de descargas parciais é realizada em parte do bobinado, visto que não há descargas parciais próximos ao neutro. Porém, tem-se a possibilidade de ter descargas parciais na cabeça de bobina, inclusive com a interação de fases. As descargas parciais variam consideravelmente com a potência, temperatura, tensão da máquina, excitação (reativo), etc.

Os valores de descargas parciais on-line são muito próximos ao do off-line, importante medir a descarga parcial no comissionamento para ter medição inicial (finger print) da máquina e podendo ser analisado as descargas parciais em mV ou pC ao longo da vida útil da máquina. As principais medidas como PDIV, PDEV, Qm, NQN devem ter leitura e registros em mV e pC.

5.2.4 IEEE 1434:2014 - Guide for the measurement of partial discharges in ac electric machinery

Esta norma além de oferecer o que a IEC 60034-27-1 e IEC 60034-27-2, versa também sobre as justificativas técnicas para todos os parâmetros medidos. Oferece uma gama enorme conceitos e explicações.

Pode-se medir as descargas parciais pela IEEE 1434, este se aplica para medição off-line e on-line, mais focada para máquina montada e a medição é realizada adquirindo descargas com frequência acima de 40 MHz. Na norma, recomenda-se fazer a medição e a análise em tensão (mV).

Ainda não muito usual, mas algumas empresas já solicitam em suas especificações técnicas, os limites de aceitação das descargas parciais em barras ou bobinas. O valor mais aplicado é de que a descargas parciais < 50 pC ou 50 mV. Normalmente em bobinado bem fabricado, as descargas parciais ficam < 100 mV ou 100 pC. As descargas

parciais em barra ou bobina novas podem ser ligeiramente maiores, visto que ainda o sistema de isolamento não está completamente curado.

5.2.5 - Comentários

Os sinais de DP de alta frequência que ocorrem no interior do sistema isolante de uma máquina rotativa podem ser capturados através dos acoplamentos capacitivos. Os capacitores formam um caminho preferencial para correntes de frequência um pouco mais elevada. A definição do acoplador e de seu valor deve levar em conta a capacitância do objeto a ser avaliado, bem como a faixa de frequências em que se deseja realizar a medição. Na realidade, o capacitor de acoplamento funciona como um filtro passa alta quando conectado ao enrolamento estatórico e a uma terminação resistiva, que pode ser de 500, 1000 ou mesmo de 1500 Ohms.

Comercialmente, alguns valores de capacitor foram estabelecidos como uma certa padronização. Assim, é possível encontrar capacitores de 80pF, 145pF, 500pF, 1000pF ou até mais. Como exemplo, uma configuração típica no sistema elétrico brasileiro utiliza acopladores de 80pF com resistências de 680 Ohms. Esta configuração apresenta uma frequência de corte superior aproximada de 2,8 MHz, o que significa que sinais abaixo desta frequência serão significativamente atenuados, o que pode representar algumas perdas nos sinais de DP.

A instalação e o número de acopladores também é um fator que deve ser bem analisado e discutido, tanto no âmbito técnico como no econômico. A definição do número de acopladores está relacionada com a dimensão física da máquina, pois sabe-se que os sinais de alta frequência se atenuam enormemente nos enrolamentos estatóricos. Desta forma, caso se deseje aumentar a área analisada do enrolamento, um número maior de acopladores deve ser instalado. Entretanto, na maioria dos casos, em máquinas de pequeno e médio porte, um acoplador em cada fase é o suficiente para uma boa avaliação do estado do isolamento.

6.0 ISOLAMENTO ENTRE FASES

O isolamento entre fases é crítico em dois momentos. No cruzamento da barra ou bobina de topo e fundo e na mudança de grupo de barra e bobinas. Como o isolamento na cabeça de bobina não está estressado para a terra, a tensão está na superfície do isolamento, logo a distância entre as barras é crucial. Se as distâncias não forem respeitadas, fatalmente haverá problema de corona.

Apesar de não existir recomendação de norma, mas bons fabricantes de isolamento, fazem controle de suportabilidade de tensão no isolamento da cabeça de bobina. Na fase de desenvolvimento, recomenda aplicar 2,5 a tensão de fase por 10 segundos e em produção 2 a tensão de fase por 10 segundos.

7.0 SISTEMA DE ISOLAMENTO E HOMOLOGAÇÃO

Para avaliar e homologar um bom sistema de isolamento, recomendam-se as seguintes normas.

7.1 Voltage Endurance Test - VET

7.1.1 IEEE 1043:1996 - IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils e IEEE 1553:2002 - IEEE Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators.

A norma IEEE 1043 descreve os procedimentos e controle para realizar o ensaio e a 1553 recomenda o valor de tensão a ser aplicado e o critério de aceitação do ensaio de envelhecimento acelerado (VET). Para máquinas de tensão de 13,8 kV, aplica-se 30 kV – conforme esquema A descrito na norma IEEE 1553 – e a temperatura de 110 ou 120 °C – deve ser acordada entre as partes, fornecedor e cliente final. Antes da publicação da IEEE 1553, os valores de tensão eram de 32 kV, para equilibrar, recomenda-se aplicar 120 °C.

Sendo como amostras 4 barras ou 2 bobinas, uma barra ou perna de bobina pode falhar depois de 250 horas e as demais devem suportar > 400 horas. Permite-se retoque da OCP, mas se o componente for de boa qualidade não há necessidade de retoque.

7.1.2 IEEE 1310:2012 - Trial Use Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators.

O ensaio de ciclagem térmica, descritos na IEEE 1310, há uma discussão atual, se de fato, ele retrata o envelhecimento térmico natural de um sistema isolante, sendo considerada por diferentes especialistas como mais severa do que o efeito natural do envelhecimento. A discussão é válida e deve ser analisada em fóruns nacionais e internacionais para eventuais ajustes na norma vigente. Independentemente dessa discussão, está cada vez mais presente nas especificações técnicas brasileiras a solicitação deste ensaio, em linha com que o mercado Norte-Americano e a América Espanhola vêm praticando há anos.

A recomendação que seja realizado 500 ciclos térmicos de acordo com os tempos de aquecimento e de arrefecimento descrito na IEEE 1310. Deve-se chegar a um consenso entre o fornecedor e o cliente quanto as temperaturas do ensaio, no mínimo, ciclos de 40°C a 130°C. Ademais, deve-se realizar os ensaios diagnósticos intermediários (dimensional, FD, PD) realizados em paradas estratégicas após alguns ciclos de temperatura, por exemplo, paradas após 10, 50, 150, 250, 500 ciclos. Como o cobre e o seu isolamento tem diferentes taxas de dilatação, com os ciclos térmicos há uma tendência de delaminação no isolamento. Ao final do ensaio, a IEEE 1310, recomenda a realização de ensaio de prova, podendo ser, por exemplo, a tensão aplicada (hipot) de $2Un+1$.

Para sistema de isolamento que sofrem forte ciclos térmicos associado a aplicação de alta confiabilidade, normalmente as amostras são submetidas ao ensaio de Ciclagem Térmica pela norma IEEE 1310, segue para o ensaio de Voltage Endurance IEEE 1043/1553 como ensaio de prova. Passando nesses ensaios, pode-se dizer que o sistema isolante está devidamente dimensionado e, não só atenderá, mas excederá a sua expectativa de vida útil.

7.1.3 IEC 60034-18-31:2012 - Functional evaluation of insulation systems – Test procedures for form-wound windings – Thermal evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines.

Esta norma, por ser recente e não específica, ainda não é conhecida a sua aplicação no Brasil. A norma propõe os procedimentos de teste e têm como objetivo comparar a temperatura, desempenho de suportabilidade do isolamento da parede principal entre o condutor e o aterramento e, quando exigido pelo projeto da bobina ou barra, o isolamento entre as espiras.

8.0 CONCLUSÃO

Como ficou demonstrado, existem várias normas para tratar do sistema de isolamento, porém algumas não são abrangente o suficiente para tratar da questão como um todo. Associado a isso, existem os diferentes critérios e procedimentos. Para agravar, a maioria das normas não fornecem parâmetros de aceitação, quando indicam são generosos a favor dos fornecedores.

A vida útil do gerador está diretamente associada ao fornecimento do gerador baseado em uma boa especificação técnica definindo os parâmetros mínimos de aceitação, com o devido acompanhamento do owner engineering nas etapas de projeto, fabricação, montagem e comissionamento.

Para os geradores já em operação não há muito o que fazer, a não ser identificar as fragilidades e monitorá-los e preparar-se para a aquisição de um bom bobinado. Novamente, é fundamental ter em mãos uma boa especificação técnica para escolher um fornecedor qualificado.

É desejável que o equipamento não necessite de grandes investimentos no período da concessão, deste modo, os geradores deveriam ter a vida útil de pelo menos 30 anos.

Pode-se verificar que existe certo desconhecimento dos investidores quanto a fazer uma aquisição de uma máquina elétrica rotativa baseado em uma especificação técnica. A existência de uma especificação técnica bem redigida definindo os parâmetros mínimos de aceitação é um seguro de que pelo menos o fornecedor tomará os devidos cuidados.

A experiência tem demonstrado que uma boa especificação técnica definindo os parâmetros mínimos de aceitação não aumenta o custo do gerador, muito pelo contrário, em muitos casos reduz-se, pois diminuem-se as incertezas dos fornecedores.

Como podemos constatar, as máquinas de classe térmica F (155 °C) devem-se adotar a elevação de temperatura de 83 °C, pois considerando temperatura do ar de entrada do gerador de 40 °C, teremos 123 °C de temperatura máxima de operação, onde pela lei de Arrhenius podemos ter uma vida estimada de 240.000 horas ou seja 27,4 anos.

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Hara, T.P. - Specification of hydrogenerator stator windings Copel's experience - IRMC - Iris Rotating Machine Technical Conference - Dallas – USA. March 1998
- (2) Hara, T.P. - Experiência da COPEL em especificação de bobinados de hidrogeradores - VII ERLAC;
- (3) Hara, T.P. - Avaliação do tempo de vida restante das unidades geradoras da UHE GBM e aspectos econômicos - VI ERLAC
- (4) Hara, T.P. - Envelhecimento de ligas de aço ao silício - IV SEMEL
- (5) Stone, Greg C., Culbert Ian, Boulter, Edward A., Dhirani, Hussein - Electrical Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, IEEE Press Wiley 2014
- (6) Stone, Greg C., Culbert Ian, Boulter, Edward A., Dhirani, Hussein - Electrical Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, IEEE Press 2004
- (7) Hara, T.P. – Expectativa de vida de gerador, o que limita – XXIII SNPTE

DADOS BIOGRÁFICOS



Brasileiro, 66 anos, casado, graduado em engenharia elétrica em 1.979 pela PUC-RS, trabalhou na Copel desde 1.980 até 2.010. Com cerca de 30 anos de experiência relacionadas a sistemas de gestão e engenharia de operação e manutenção de usinas hidro e termoeletricas. Desenvolveu várias pesquisas na área de materiais e técnicas de reparos de máquinas elétricas rotativas. Dezenas de trabalhos publicados em congresso e seminário nacional e no exterior. Foi coordenador do GTMU/GCOI, na gestão 96/97 e 98/99. Atualmente é diretor técnico da Hara Engenharia, secretário do MGA-SEL da Abranma e instrutor do curso de manutenção de máquinas elétricas rotativas.

(2) GUILHERME TAKAO HARA

Brasileiro, 30 anos, solteiro, graduado em engenharia industrial elétrica com ênfase em eletrotécnica em 2018 pela UTFPR. Com cerca de 6 anos de experiência relacionadas a engenharia de operação e manutenção máquinas elétricas rotativas de média e alta tensão. Possui alguns trabalhos publicados em congresso e seminário nacional. Atualmente é diretor da Hara Engenharia.

(3) LUCAS IMAIZUMI PEREIRA

Lucas Imaizumi Pereiralucas.imaizumi@imaenergia.com / www.imaenergia.com Brasileiro, 35 anos, graduado em Engenharia Elétrica pela UNESP, pós-graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UNESP e MBA em Gestão Industrial pela FGV. Profissional com mais de 10 anos de experiência no mercado de máquinas elétricas, especialmente geradores. Realiza projeto elétrico e isolamento de geradores síncronos; desenvolve pesquisa em isolamento – com desenvolvimento de novos materiais, melhoria do processo de fabricação e estudos de vida útil; analisa a causa raiz de falhas de máquina; entre outras atividades. Atualmente é Engenheiro Especialista da IMA Energia, empresa prestadora de serviços em Engenharia para Máquinas Elétricas.