

Capítulo VIII

Avaliação do isolamento em transformadores de potência

Ensaio de perdas dielétricas e capacitância

Por Marcelo Paulino*

A avaliação de equipamentos de subestação tem evoluído com a utilização de procedimentos e sistemas de teste dotados de técnicas e ferramentas que promovem uma avaliação eficaz e rápida desses equipamentos. Essa avaliação deve ser aprimorada, de forma a garantir o funcionamento contínuo das instalações responsáveis pelo suprimento de energia elétrica.

Como os equipamentos elétricos instalados em subestações podem ser solicitados a operar sob diversas condições adversas, tais como: altas temperaturas, chuvas, poluição, sobrecarga e, dessa forma, mesmo tendo uma operação e manutenção de qualidade, não se pode descartar a possibilidade de ocorrerem falhas que deixem indisponíveis as funções de transmissão e distribuição de energia elétrica aos quais pertencem. Assim, as atividades de comissionamento e manutenção periódica para verificação regular das condições de operação desses equipamentos tornam-se cada vez mais importante. E torna-se imperativo a busca por

procedimentos e ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de forma rápida e precisa.

Este trabalho mostra técnicas de avaliação e testes de transformadores utilizando varredura de frequências. Por meio da observação do fenômeno do efeito pelicular e do fenômeno da polarização do meio dielétrico, o trabalho avalia a condição do isolamento de transformadores de potência e buchas de alta tensão.

Medida de capacitância, fator de potência e fator de dissipação com variação de frequência

Medida da Capacitância (C) e Fator de Dissipação (FD) estão estabelecidos como importantes métodos de diagnóstico de isolamento, publicado primeiro por Schering em 1919 e utilizado para esse propósito em 1924. Em um diagrama simplificado do isolamento, C_p representa a capacitância e R_p , às perdas.

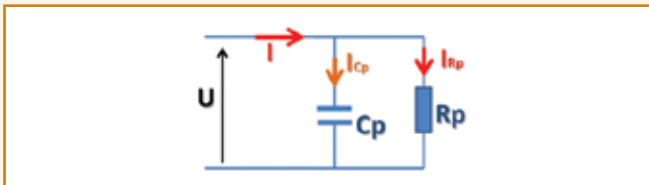


Figura 1 – Diagrama simplificado do isolamento.

O fator dissipação é definido como:

$$(1) \quad \tan \delta = \frac{|I_{Rp}|}{|I_{Cp}|} = \frac{1}{R_p \cdot \omega \cdot C_p}$$

Na Figura 2, C1 e R1 conectados em série representam as perdas do objeto em teste, e C2 representa perdas livres do capacitor de referência.

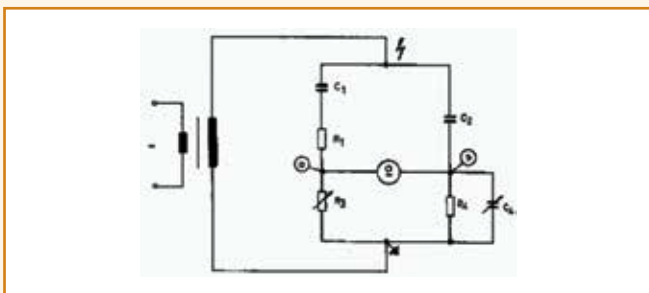


Figura 2 – Representação de uma Ponte Shering.

Relações entre o fator de potência e o fator de dissipação

A relação entre fator de potência (FP), definido como o cosseno do ângulo entre a corrente total e a tensão aplicada ($\cos \varphi$), e o fator de dissipação (FD), definido como a tangente do ângulo entre a corrente total e a corrente capacitiva ($\tan \delta$). Matematicamente, a correlação entre os dois pode ser escrita como:

$$(2) \quad FD = \frac{FP}{\sqrt{1 - FP^2}}$$

$$(3) \quad FP = \frac{FD}{\sqrt{1 + FD^2}}$$

Novas aplicações de avaliação do isolamento com variação de frequência

Até os dias de hoje, o fator de dissipação ou o fator de potência só foram medidos na frequência da linha. Com a fonte de potência do equipamento utilizado neste trabalho é possível agora fazer essas medições de isolamento em uma larga faixa de frequência.

Além da possibilidade de aplicar uma larga faixa de frequência, as medições podem ser feitas em frequências diferentes da frequência da linha e seus harmônicos. Com este princípio, as medições podem ser realizadas também na presença de alta interferência eletromagnética em subestações de alta tensão.

A faixa de frequência utilizada varia de 15 Hz a 400 Hz. Os testes podem ser realizados sem problemas, pois, nesta faixa de frequências, as capacitâncias e as indutâncias do sistema elétrico testado são praticamente constantes. Para avaliarmos o isolamento, devemos considerar que o dielétrico perde sua capacidade de isolar devido a:

- Movimento de íons e elétrons (corrente de fuga);
- Perdas por causa do efeito da polarização.

Procedimentos gerais

Em linhas gerais, seguem alguns procedimentos para a realização das medidas de capacitância e fator de potência para transformadores de dois enrolamentos. A Figura 3 mostra a representação esquemática do isolamento para transformadores de dois enrolamentos.

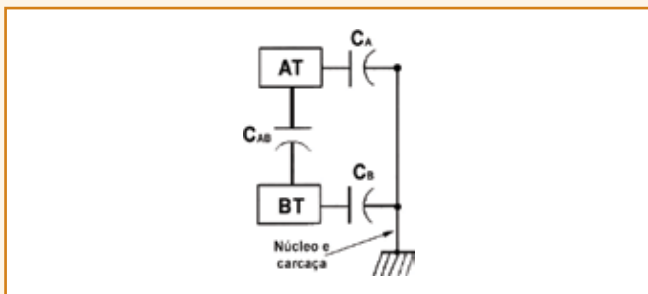


Figura 3 – Representação esquemática do isolamento para transformadores de dois enrolamentos.

Em que:

- Cab representa o isolamento entre os enrolamentos de Alta Tensão (AT) e os enrolamentos de Baixa Tensão (BT);
- Ca representa o isolamento entre os enrolamentos de Alta Tensão (AT) e a carcaça;
- Cb representa o isolamento entre os enrolamentos de Baixa Tensão (BT) e a carcaça.

Assim:

- O transformador deve estar desenergizado e completamente isolado do sistema de potência;
- O aterramento adequado do tanque do transformador deve ser checado;
- Os terminais das buchas de alta tensão devem ser isolados

da conexão das linhas;

- Todos os terminais das buchas de um determinado grupo, como os terminais A, B, C (e Neutro) do enrolamento de Alta Tensão; A, B, C (e Neutro) do enrolamento de baixa tensão e A, B, C (e Neutro) do enrolamento terciário devem ser conectados;
- Os terminais do neutro de todos os enrolamentos conectados em estrela com ponto aterrado devem ser desconectados do terra (tanque);



Figura 4 – Transformador preparado para teste.

- Se o transformador tiver um comutador de taps, então ele deve ser posto na posição de neutro (0 ou no meio dos taps);
- Conectar os terminais de aterramento do equipamento de teste no aterramento do transformador (subestação);
- Conectar a saída de alta tensão do equipamento de teste (fonte) no enrolamento de alta tensão do transformador (de acordo com as instruções de conexão). Deve-se evitar que partes desparafusadas ou soltas do cabo de teste de alta tensão toquem qualquer parte como buchas e o tanque do transformador. Isto pode causar abertura de arcos (flashovers);
- Conecte o cabo de medida (vermelho) no enrolamento de baixa tensão, e o cabo Guarda (azul) carcaça do transformador (de acordo com as instruções de conexão do equipamento de teste utilizado). Neste caso é realizada a medida:

♦ UST-A: medida de AT para BT, guardando carcaça (Cab).

- Alguns equipamentos de teste possuem a facilidade de trocarem a função dos cabos, ou seja, o cabo vermelho pode ser um cabo de medida ou Guarda, dependendo da escolha do testador. O mesmo ocorre para o cabo Azul. Assim, com a mesma conexão é realizada a medida:

♦ GST-A: medida de AT para carcaça, guardando BT (Ca).

- Para realizar o teste de BT para carcaça, conecte o cabo de medida (vermelho) no enrolamento de alta tensão, e o cabo de saída de alta tensão do equipamento de teste (fonte) no

enrolamento de baixa tensão. O cabo Guard (azul) continua na carcaça do transformador. É realizada a medida:

- ♦ GST-A: medida de BT para carcaça, guardando AT (Cb).

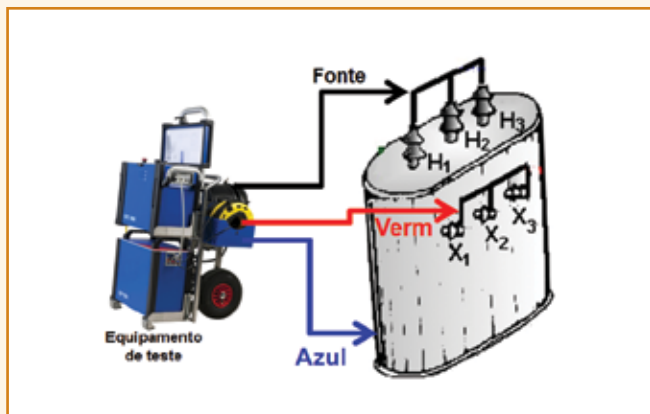


Figura 5 – Esquema de conexão para medidas AT-BT e AT-carcaça.

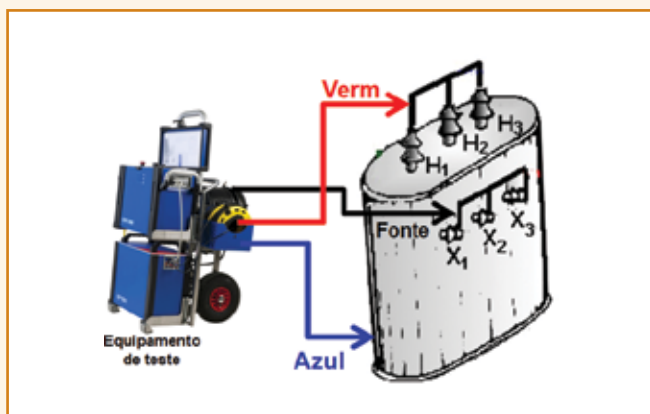


Figura 6 – Esquema de conexão para medidas BT-carcaça.

- “Curte-circuite” todos os TCs de bucha, se houver;
- Não faça nenhum teste com alta tensão em transformadores sob vácuo;
- A tensão de teste pode ser alterada respeitando-se a tensão do enrolamento sob teste;
- Todos os testes devem ser feitos com a temperatura do óleo próxima a 20 °C. Correções de temperatura podem ser calculadas usando as curvas de correção, mas elas dependem em grande parte do material isolante, do conteúdo de água e de vários outros parâmetros;
- É importante obedecer às determinações registradas nos manuais dos equipamentos de testes.

Avaliação do ensaio de fator de potência

Para os testes realizados apenas na frequência da linha (60 Hz), o range dos valores de fator de potência para novos e antigos transformadores são publicados pelas normas e por outras literaturas. Pela IEEE Std. 62-1995, são determinados os seguintes valores:

TABELA I – CONDIÇÕES DO ISOLAMENTO PELA IEEE STD. 62-1995

Transformador	Condições do isolamento		
	Bom	Aceitável	Deve ser investigado
Novo	DF < 0.5%	-	-
Antigo sob serviço	DF < 0.5%	0.5% < DF < 1%	DF > 1%

Todos os valores medidos a 20 °C

Neste caso é importante que o testador use o histórico do equipamento para realizar uma análise adequada.

Com o desenvolvimento de novas técnicas e novos equipamentos de teste, a avaliação do isolamento pode ser feita com a variação de frequência da tensão de teste. Assim capacita o testador a realizar testes sem problemas de interferência eletromagnética e com maior capacidade de avaliação. Com a variação de frequência, o resultado mostra uma tendência que pode ser usada para avaliação, pois à medida que elevamos a frequência, as perdas aumentam, ou seja, os valores de FP ou FD tendem a aumentar. As Figuras 7 e 8 mostram o comportamento do FP com variação de frequência para um transformador novo de 69 kV.



Figura 7 – Transformador novo de 69 kV.



Figura 8 – Fator de potência para transformador novo de 69 kV.

A seguir temos um exemplo de resultado onde é realizada a comparação das medidas de fator de potência entre as buchas das três fases de um banco de reatores ASEA/BROWN BOVERI, tipo RM46, 2002, com potência: 40,33 MVar, tensão HV: 500 kV, corrente HV: 127 A. A Figura 9 mostra um dos reatores e a Figura 10 mostra os valores de FP para as três fases do banco.



Figura 9 – Reator ASEA/BROWN BOVERI, tipo RM46 (154 kV-20 kV).

Nota-se que o fator de potência tende a aumentar com o aumento da frequência, comprovando o descrito anteriormente. Entretanto, registraram-se picos negativos e positivos exatamente sobre a frequência de 60 Hz. Isso ocorreu devido à forte interferência eletromagnética na medida, pois os reatores avaliados estão instalados ao lado do bay de 500 kV energizado. Vale ressaltar que, se as medidas fossem feitas apenas com 60 Hz, os resultados anotados certamente estariam errados, pois não levariam em consideração as condições reais do isolamento sob teste.

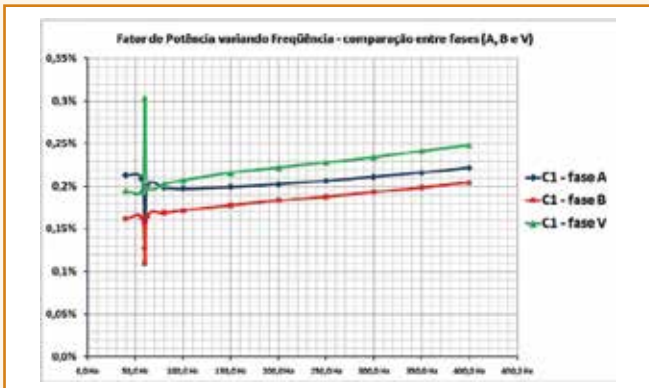


Figura 10 – Medidas de fator de potência nas fases A, B e V.

Diagnóstico de umidade no isolamento

Para a avaliação do conteúdo de umidade no isolamento líquido e sólido, o emprego do método Karl Fischer, além de amplamente utilizado, serve como dado de referência para outros métodos, tais como os métodos de resposta dielétrica. Entretanto, este método sempre é afetado por diversas influências, como o ingresso de umidade do ambiente durante a coleta, transporte e preparação da amostra. Isso compromete os resultados e dificulta a comparação com valores referenciais.

Buscando uma solução para determinação da umidade, métodos de diagnóstico de dielétricos foram desenvolvidos para deduzir a umidade no papel e realiza a análise das características do isolante. Os trabalhos da Força Tarefa D1.01.09 do Cigré mostram a validade desses métodos. Estes trazem a promessa de dar maior precisão ao diagnóstico e determinação da umidade no isolamento. Métodos de diagnósticos do dielétrico deduzem o teor de umidade no isolamento sólido empregando os mecanismos de estabelecimento de correntes polarização e despolarização, bem como fator de dissipação com variação de frequência. A seguir é descrito o método que combina medidas no domínio do tempo e medidas no domínio da frequência. Isso possibilita diagnósticos seguros até mesmo para isolamentos muito antigos.

Medidas das propriedades dielétricas

Sobre as propriedades do dielétrico, o isolamento de um transformador é composto de espaçamentos preenchidos com óleo isolante. Sendo aplicada tensão de teste no enrolamento de alta tensão, a corrente flui na isolação principal e é medida no instrumento de teste. Essa corrente é medida na ordem de [nA] e [pA]. As propriedades medidas são a condutividade da celulose e do óleo, além do efeito de polarização interfacial. A polarização interfacial ocorre se dois materiais com diferente condutividade e permissividade (óleo e papel) estão dentro de um dielétrico. Assim, os íons em óleo viajam para o elétrodo oposto e forma uma nuvem de carga que pode ser medida externamente como um efeito de polarização. A polarização e a condutividade são afetadas pela geometria do isolamento e sua composição. A medida do isolamento de um transformador consiste na medida da superposição de vários efeitos, tais como as propriedades do papel sozinho e do óleo isolante, mostradas na Figura 11.

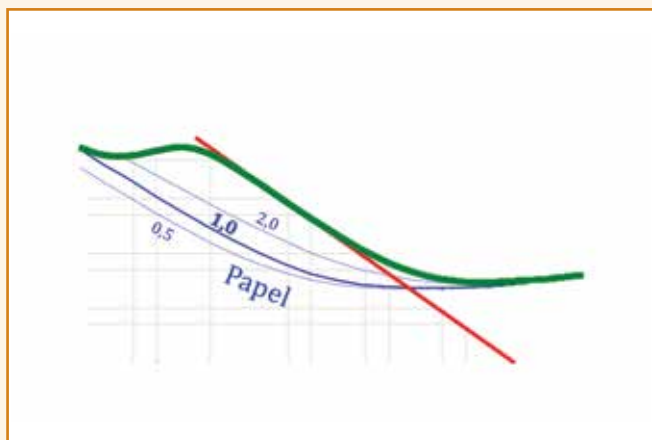


Figura 11 – Fator de dissipação do papel e do óleo e a sobreposição dos efeitos na resposta global (óleo + papel).

A análise das propriedades dielétricas é dada com a combinação da polarização interfacial no isolamento óleo e papel no transformador de potência, combinando suas características. A resposta dielétrica de isolamento pode ser registrada no domínio do tempo ou no domínio frequência. Uma vez no domínio do tempo tem-se o registro da medida de carga e descarga das correntes pelo isolamento. Este procedimento é conhecido como Corrente de Polarização e Despolarização (Polarization and Depolarization Currents – PDC). As medidas no domínio da frequência são obtidas pelas medições de tangente delta, com uma faixa de frequência maior, especialmente em baixas frequências. Este procedimento é chamado de Espectroscopia no Domínio da Frequência (Frequency Domain Spectroscopy – FDS). A combinação dessas duas técnicas reduz drasticamente a duração do teste comparado com as técnicas existentes.

Análise das medidas no isolamento e determinação da umidade

A umidade influencia fortemente grandezas como correntes de polarização e despolarização, capacitância e fator de dissipação. O fator de dissipação com variação de frequência mostra uma forma de curva típica em formato de “S”. Com o aumento do teor de umidade, da temperatura ou com o envelhecimento, a curva aumenta para frequências mais elevadas.

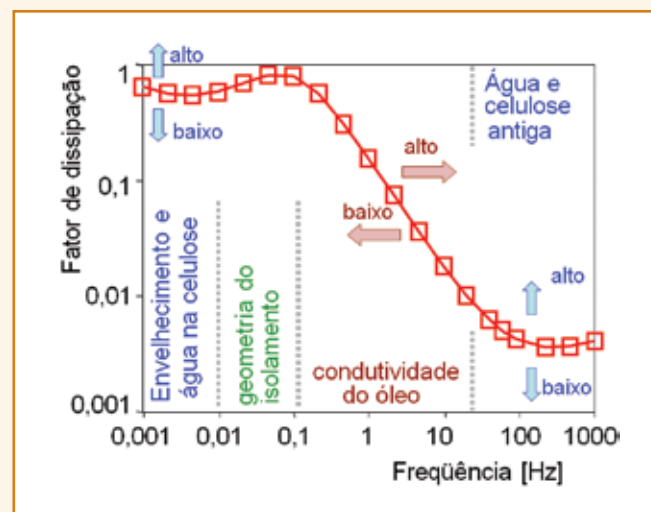
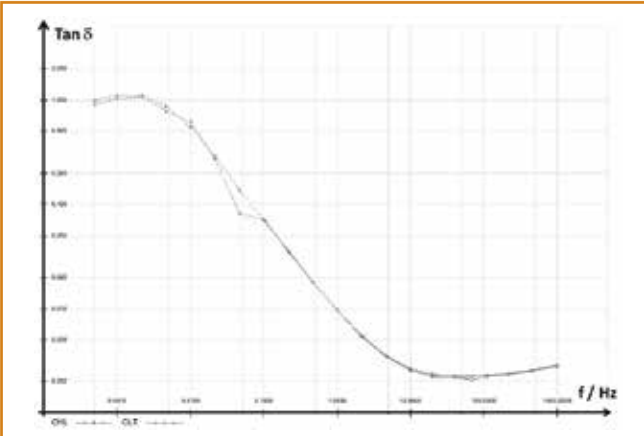


Figura 12 – Interpretação para os dados de domínio da frequência com a discriminação entre as influências de vários fenômenos físicos.

A seguir estão os resultados do teste em transformador WEG 230-69-13,8 KV, fabricado em 1981 e reformado em 2010. A Tabela 2 mostra os resultados na frequência de 60 Hz extraídos do teste de PDC+FDS mostrado na Figura 13. A Figura 14 mostra a unidade testada.

TABELA 2 – RESULTADO DE TESTE EM TRANSFORMADOR DE 230 KV (60 Hz)

Teste realizado	Fator de dissipação	Capacitância	Umidade
AT – BT (CHL)	0,210%	2,4681 nF	1,2%
BT– massa (CLT)	0,226%	4,6884 nF	1,3%

**Figura 13 – Resultados do teste em transformador 230-69-13.8 KV sob teste.**

Referências

- ALMEIDA, A. T. L.; PAULINO M. E. C. *Manutenção de transformadores de potência. Curso de Especialização em Manutenção de Sistemas Elétricos – Unifei*, 2012.
- MILASCH, M. *Manutenção de transformadores em líquido isolante*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

**Figura 14 – Transformador 230-69-13.8 KV sob teste.**

- GT A2.05 – *Guia de manutenção para transformadores de potência*. Cigre Brasil – Grupo de Trabalho A2.05, 2013.

* MARCELO EDUARDO DE CARVALHO PAULINO é engenheiro eletricista e especialista em manutenção de sistemas elétricos pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Atualmente, é gerente técnico da Adimarco | mecpaulino@yahoo.com.br.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em
www.asetoreletrico.com.br
 Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail
redacao@atitudeeditorial.com.br