

Capítulo VI

Avaliação do isolamento em transformadores de potência

Por Marcelo Paulino*

Qualquer máquina ou equipamento elétrico deverá suportar campos elétricos, onde determinada parte de sua estrutura deverá ter uma resistividade muito alta, assegurando uma oposição à passagem de corrente elétrica de condução. O elemento que promove tal condição é chamado de dielétrico, sendo chamado de isolante o material que o constitui.

A finalidade do dielétrico na indústria elétrica é realizar o isolamento entre os elementos condutores do equipamento elétrico, além de modificar o valor do campo elétrico existente em determinado local.

Portanto, os sistemas de isolamento constituem um dos principais componentes de um equipamento elétrico. Na sua composição são utilizados diferentes tipos de materiais isolantes que são submetidos a diversos tipos de solicitações dielétricas e térmicas ao longo de sua vida útil. Tais solicitações podem resultar em falhas dos componentes deste isolamento, resultando em desligamentos e prejuízos. Pode-se afirmar que a vida útil de um equipamento elétrico qualquer é considerada como a do próprio sistema de isolamento. A falha da isolação implica na falha do equipamento.

Conforme descrito no Capítulo 1, um sistema de isolamento de equipamentos, como utilizado principalmente em transformadores, tanto de potência e transformadores de instrumentos, é

composto principalmente de papel-óleo. Portanto, este trabalho abordará preferencialmente as características deste tipo de isolamento.

Este artigo descreverá as principais características de um sistema de isolamento, suas propriedades básicas e os tipos de testes e ensaios comumente executados. Os testes apontados serão apresentados e discutidos nos próximos capítulos.

Características dos sistemas de isolamento

Classificação dos materiais dielétricos

A classificação dos materiais dielétricos pode ser apresentada como:

- a)** Gases (ar, anidrido carbônico, hidrogênio, gases raros, hexafluoreto de enxofre SF₆);
- b)** Líquidos (óleos minerais, óleos sintéticos, óleos vegetais);
- c)** Sólidos (resinas, PVC, polietileno PE, papel Kraft, porcelana, vidro);
- d)** Vácuo;
- e)** Compostos ou Híbridos (sistemas papel-óleo, PE-óleo).

Propriedades dos dielétricos

As principais propriedades dos meios dielétricos são apresentadas a seguir:

Permissividade ou constante dielétrica

Dado um campo elétrico aplicado nas extremidades de um material dielétrico, a permissividade elétrica é determinada pela capacidade deste material polarizar-se, cancelando parcialmente o campo elétrico dentro do material. A permissividade ou constante dielétrica (ϵ) também pode ser descrita como a facilidade que o material dielétrico permite o estabelecimento de linhas de campo em seu interior.

A permissividade ou constante dielétrica para o vácuo (ϵ_0) é dada por:

$$\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} [F/m]$$

Assim, para um outro meio qualquer, pode-se definir a permissividade relativa (ϵ_r) por meio de:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

A capacitância de um capacitor de área A e distância entre placas d para um dielétrico qualquer, é dada por:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

Assim podemos designar, em função da capacitância, a permissividade relativa de um material, definida pela razão mostrada a seguir, em que C é a capacitância entre duas placas paralelas separadas pelo material isolante e C_0 é a capacitância das mesmas placas paralelas separadas por vácuo, desprezando-se o efeito de borda.

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

Normalmente, ϵ_r não é um parâmetro fixo, mas depende da temperatura, da frequência, bem como da estrutura molecular do material.

Polarização

A maior parte dos elétrons nos materiais isolantes não está livre para se movimentar. Quando um campo elétrico é aplicado, as forças eletrostáticas resultantes criam um nível de polarização, direcionando as cargas e formando dipolos. Os tipos de polarização são descritos a seguir.

O primeiro tipo de polarização é caracterizado por polarizações eletrônica e iônica que ocorrem praticamente instantaneamente sob a ação de um campo elétrico e sem

dissipação de energia. Caracteriza-se por um deslocamento elástico de íons ou elétrons ligados ao núcleo de um átomo.

A polarização dipolar difere da eletrônica e da iônica com relação ao movimento térmico das partículas. As moléculas dipolares, que se encontram em movimento térmico desorganizado inicialmente, orientam-se parcialmente pela ação do campo, causando o efeito da polarização.

A polarização estrutural aparece apenas em corpos amorfos e em sólidos cristalinos polares (por exemplo, vidro), onde um corpo amorfo é parcialmente constituído de partículas de íons. Ela se estabelece pela orientação de estruturas complexas de material, devido à ação de um campo externo, causando um deslocamento de íons e dipolos.

Corrente de fuga

Nos isolantes sólidos, mesmo caracterizados por uma resistividade muito grande, possuem elétrons livres devido, entre outras causas, a impurezas e forças internas no material, proporcionando uma pequena corrente que atravessa o isolante. Entretanto, pela acumulação de poeira e umidade na superfície do material ou na fronteira entre dois materiais diferentes, forma-se um novo caminho para a passagem da corrente elétrica, chamada corrente superficial. Esses dois eventos caracterizam o aparecimento da corrente de fuga no isolamento.

Esse efeito pode ser representado, em termos de circuito elétrico, por um resistor em paralelo com um capacitor, como mostra a Figura 1. A quantificação da dificuldade de circulação da corrente de fuga pelo dielétrico é chamada de resistência de isolamento.

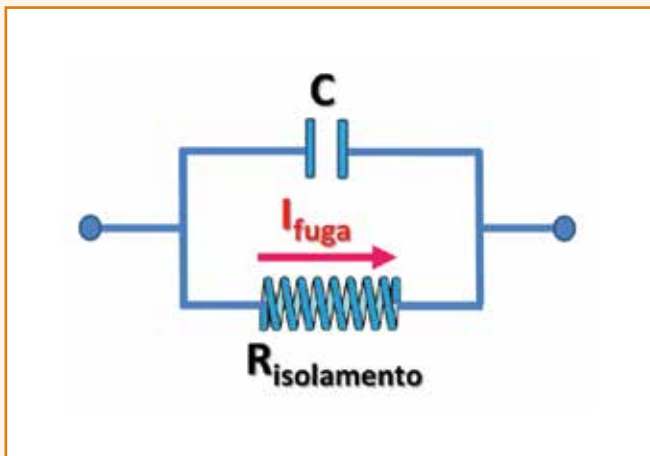


Figura 1 – Representação esquemática do dielétrico – corrente de fuga.

Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica é o máximo valor de campo elétrico que pode ser aplicado a um material dielétrico sem que este perca suas propriedades isolantes. De outra forma, pode-se afirmar que após um valor de tensão, designada por tensão de ruptura, o material isolante passa a conduzir corrente. Assim, define-se rigidez dielétrica como a capacidade de resistir à tensão sem que haja a citada descarga, conforme a distância entre os dois pontos de aplicação. Este valor é dado em V/m.

$$E_c = \frac{U_c}{d_c}$$

A rigidez dielétrica dos isolantes não é constante para cada material, pois depende fundamentalmente da espessura do isolante, da pureza do material, do tempo e método de aplicação da tensão, da frequência da tensão aplicada e do tipo de sollicitação ao qual o sistema dielétrico é submetido, da temperatura, da umidade, entre outros fatores ambientais.



Figura 2 – Cuba de medidor de rigidez dielétrica com eletrodos VDE.

Descargas parciais

Uma Descarga Parcial (DP) é caracterizada como uma descarga elétrica de pequena intensidade que ocorre em uma região de imperfeição de um meio dielétrico sujeita a um campo elétrico, onde o caminho formado pela descarga não une as duas extremidades dessa região de forma completa. A ocorrência de descarga parcial depende

da intensidade do campo aplicado nas extremidades desse espaço, além do tipo de tensão de teste aplicada (tensão alternada, tensão contínua, sinal transitório ou impulso).

A norma IEC 60270 faz referência à medida de descargas parciais em sistemas e equipamentos elétricos com tensões alternadas de até 400 Hz. Nesses equipamentos tem-se a ocorrência de avalanches de elétrons nos espaços vazios. Assim, descargas em dielétricos podem ocorrer somente em espaços gasosos ou fissuras nos materiais sólidos ou bolhas no dielétrico líquido. Portanto, descargas parciais são iniciadas geralmente se a intensidade do campo elétrico dentro do espaço vazio exceder a intensidade do campo do gás contido nesse espaço.

As descargas parciais podem ser classificadas de acordo com a natureza da sua origem. Podem ser:

- Descargas internas, que ocorrem nos espaços, geralmente vazios preenchidos com gás, presentes nos materiais sólidos e líquidos usados em sistemas de isolamento.
- Descargas superficiais, que ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico,

normalmente partindo do eletrodo para a superfície.

- Descargas parciais no ar ambiente geralmente são classificadas como descargas externas e frequentemente chamadas de descargas corona. No início do processo de indução da tensão, brilho e correntes de descargas podem aparecer. Elas ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos em partes com pequenos raios de curvatura.

Resistências de isolamento

Uma vez que o campo elétrico estabelecido não ultrapasse o valor da tensão de ruptura, o dielétrico impede a passagem da corrente elétrica. Este evento é dependente da natureza e características do dielétrico e de suas condições físicas.

Por não se tratar de um dielétrico perfeito, se aplicada uma tensão no isolante, ele será atravessado por uma corrente. O quociente entre a tensão U e a corrente I é chamada resistência de isolamento. Esta resistência não é constante, ou seja, os isolantes geralmente não obedecem à lei de Ohm.

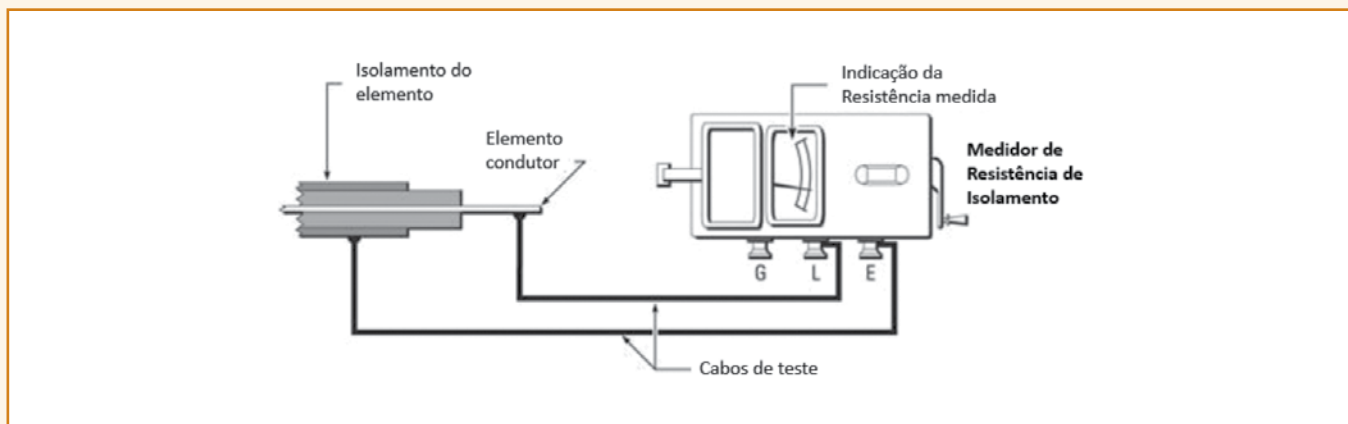


Figura 3 – Exemplo de medição de resistência de isolamento - esquema de conexão.

Perdas no sistema de isolamento

Nos dielétricos sujeitos a uma tensão contínua verifica-se uma perda por efeito Joule tal como nos condutores. A corrente de perdas, se bem que muito limitada, dá lugar a um certo aquecimento. Estas perdas não têm importância, a não ser quando dão lugar a um aquecimento, permitindo, por consequência, maior corrente e maiores perdas.

Nos dielétricos sujeitos a uma tensão alternada há, da mesma forma, a perda por efeito Joule, mas surge um outro fenómeno que origina perdas e que tem o nome de histerese dielétrica. A energia perdida é também transformada em calor. O nome deste fenómeno é dado pela analogia existente com a histerese magnética. A explicação física das perdas por histerese dielétrica é dada por consideração da falta de homogeneidade do dielétrico.

A avaliação é realizada pela medição da capacitância, do Fator de Dissipação ($\text{tg}\delta$) ou Fator de Potência ($\cos\phi$) obtidos com ponte Schering e ponte Doble.

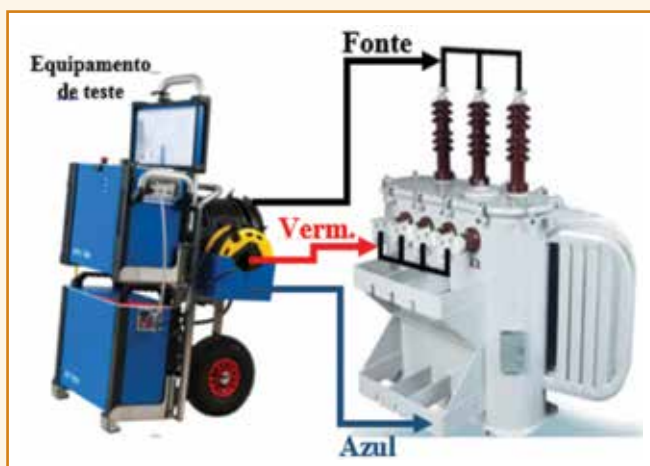


Figura 4 – Esquema de conexão para medições de Capacitância, do Fator de Dissipação ($\text{tg}\delta$).

Ensaio e avaliação do isolamento

A avaliação do sistema de isolamento pode ser realizada com ensaios elétricos básicos ou avançados, considerando o grau de complexidade da análise a ser realizada. Os ensaios têm por finalidade garantir as condições das características funcionais do isolamento dos transformadores de tal forma que possam entrar em operação segura todo o equipamento.

A escolha do teste a ser realizado depende de vários fatores como o local de realização, testes de aceitação em fábrica ou em campo, o tempo disponível para teste, importância do equipamento, condições operativas, dentre outros.

As características elétricas de um dielétrico podem ser comprovadas em termos práticos por meio de testes ou ensaios não destrutivos com aplicação de tensão contínua ou alternada. Dos testes e ensaios elétricos não destrutivos, temos:

- Resistência de isolamento com corrente contínua, também chamado de teste de absorção de corrente pelo dielétrico, com aplicação de corrente contínua, obtidos, normalmente com o medidor de alta resistência, expresso em $\text{M}\Omega$. O ensaio consiste em submeter o isolamento a uma tensão contínua, normalmente entre 500 V e 10.000 V, provocando circulação de uma pequena corrente elétrica, na ordem de microampères. Esta corrente depende da tensão aplicada, da capacitância do isolamento, da resistência total, das perdas superficiais, da umidade e da temperatura do material. Conforme já descrito, podemos afirmar que, para uma mesma tensão, quanto maior a corrente, menor a resistência.
- Manutenção em fluídos dielétricos, realizada pelo teste de rigidez dielétrica, com aplicação de corrente

alternada expresso em termos de tensão disruptiva e a análise cromatográfica dos gases dissolvidos nos óleos isolantes (cromatografia), que permite detectar eventuais faltas ou defeitos associados aos dielétricos, inclusive antes de um eventual dano do equipamento.

- Teste de perdas dielétricas expresso por meio dos valores de capacitância, do Fator de Dissipação ($\text{tg}\delta$) ou Fator de Potência ($\cos\phi$) obtidos com ponte Schering e ponte Doble, respectivamente, com aplicação de corrente alternada. A avaliação do isolamento é realizada pela análise dos componentes capacitiva e resistiva que flui pelo dielétrico.
- Análise de descargas parciais realizada com instrumentos convencionais analógicos, dependentes do conhecimento do testador, ou modernos sistemas digitais de medida de descargas parciais que torna possível e mais eficaz a discriminação entre os eventos, sejam descargas parciais ou ruídos. Capacita também o sistema de teste para identificação dos tipos de falhas e sua localização.
- Avaliação da umidade no isolamento papel-óleo por meio da espectroscopia do dielétrico no domínio do tempo e no domínio da frequência. Realizada pela medida da umidade e degradação do isolamento papel-óleo, identificando

a resposta do meio dielétrico mediante a aplicação dos testes de corrente de polarização e despolarização e espectroscopia no domínio da frequência.

Os próximos capítulos abordarão cada um dos testes descritos.

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: Ed. EDGARD BLUCHER, 1984.*
- 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 eletricitista 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.osetoelettrico.com.br

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail
redacao@atitudeeditorial.com.br