



Bucha de Medição para Redes Elétricas de Média Tensão

Eng. Paulo Roberto de Souza Pimentel
Eletropaulo Eletricidade de São Paulo S.A

Eng. Robin Robson Framil
Eletropaulo Eletricidade de São Paulo S.A

Tadayoshi Tchiba
MRL - Materials Research Laboratory

Renato Augusto Ribeiro
Eletropaulo Eletricidade de São Paulo S.A

Leandro Sabença Cesar
Eletropaulo Eletricidade de São Paulo S.A

Nilton Mendes
Eletropaulo Eletricidade de São Paulo S.A

RESUMO

O desenvolvimento de um dispositivo de by-pass dos transformadores de MT/BT para uso pela rede PLC deu origem a esse projeto em função das características elétricas e mecânicas do material utilizado como corpo do dispositivo - o UHMW (Ultra High Molecular Weight) - um material oriundo do desenvolvimento do Polietileno de Alta Densidade - PEAD. A geometria do dispositivo de by-pass da rede PLC foi aproveitada, introduzindo pequenas modificações, para transformá-la em uma bucha de medição de corrente e tensão AC. Como o valor da capacitância nesse caso não precisa ser grande, isto é, o valor da X_c – reatância capacitiva pode ser alta, podemos utilizar o próprio material da bucha como dielétrico para construir um capacitor agregando-o ao corpo da bucha como uma única peça, uma vez que sua rigidez dielétrica é extremamente alta – 90 kV/mm. Com esse valor de rigidez dielétrica, podemos construir um capacitor com dielétrico de pequena espessura – alguns milímetros. No caso do capacitor projetado, a espessura do dielétrico é de cerca de $5 \pm 0,1$ mm. Junto com o capacitor, é montado um sensor de corrente, que graças à pequena espessura do dielétrico, fica perto do cabo de alta tensão, maximizando o sinal induzido no sensor de corrente (TC).

PALAVRAS-CHAVE

Ângulo de perda dielétrica, capacitor de polietileno, descarga parcial, permissividade, tangente delta, UHMW.

1. INTRODUÇÃO

Utilizar o capacitor construído com UHMW ,utilizando-o como divisor capacitivo é uma ótima opção , uma vez que, capacitores construídos com polietileno são excelentes, devido ao baixo tangente (δ) e variação da capacitância com a temperatura ser extremamente baixa. Além disso, devido ao alto valor da isolamento dielétrica do UHMW , a sua utilização como capacitor para alta tensão o torna interessante, especialmente para medição, onde

não se exige alto valor da capacitância. Por exemplo, no caso de aplicação para PLC, não seria possível a sua utilização, devido ao valor da reatância capacitiva ser alta. Finalmente o UHMW, constituídos por moléculas de CH₄, é completamente apolar e, desta forma as chances de aquecimento interno são mínimos, mesmo utilizados em alta tensão.

2. COMO CONSTRUIR O CAPACITOR

2.1 CAPACITOR CERÂMICO

Na construção do capacitor, o valor do tangente (δ) final, é um parâmetro importantíssimo, pois disso depende o aquecimento ou não do capacitor, quando submetido a campo oscilante (AC). O valor do tangente(δ) depende da matéria-prima utilizada na construção do capacitor. No caso onde o dielétrico é construído com materiais cerâmicos (titanato de bário), o corpo do dielétrico é construído moldando o pó em prensa, e logo em seguida, sinterizado.

Os eletrodos são construídos a partir da deposição de filme espesso de prata / paládio sobre as faces da cerâmica sinterizada. Depositado o eletrodo, o conjunto passar por forno a 850 °C, para metalizar o filme espesso de prata/paládio. No processo de metalização a prata adere a cerâmica através da migração do paládio dentro da cerâmica, criando uma adesão extremamente forte do eletrodo à cerâmica, sem risco de criar defeitos a nível molecular. Sobre a prata assim depositada é soldado um terminal de latão, para permitir conexão externa com os cabos. O conjunto a seguir é mergulhado em epóxi ou silicone para garantir a isolamento externa contra efeito corona. Com isso, o valor da tangente (δ) do capacitor assim construído é extremamente baixo (cerca de 0,1%).

2.2 CAPACITOR DE UHMW

No caso do UHMW, não podemos utilizar o mesmo processo da construção do capacitor cerâmico. Além disso, o capacitor teria que fazer parte do corpo da bucha, formando um bloco único para garantir a sua utilização em tensões elevadas. Conseqüentemente o corpo do dielétrico do capacitor faz parte da bucha formado a partir da usinagem num torno de controle numérico, a partir de um cilindro maciço de UHMW.

A deposição da prata teria que ser feita a frio, complicando o processo uma vez que esse tipo de deposição tende a criar defeitos especialmente sobre a interface do plástico e a prata. Assim, o acabamento da superfície do plástico tem que ser a mais lisa possível, sem defeitos nenhum. Como a superfície do UHMW é extremamente compacta e de difícil aderência, a superfície onde será depositado o eletrodo precisa passar por um tratamento, de modo que o filme possa aderi-lo fortemente sem criar defeitos ou mau contato. Quanto a ilha de contato Ôhmico é obtido através da inserção de um anel de latão com fio soldado, junto com o filme de prata, permitindo com isso contato elétrico adequado e obtendo um capacitor, utilizando UHMW como dielétrico, com tangente(δ) menor que 0,1%. Esse tangente pode ser ainda melhorado, trabalhando melhor a superfície do dielétrico.

3. PRÉ-REQUISITOS ELÉTRICOS E MECÂNICOS

O capacitor para aplicações em alta tensão, necessariamente precisa de pré-requisitos importantes, a nível eletrônico e mecânico, quando utilizados como bucha.

Eletronicamente as características elétricas do material a ser utilizado como dielétrico é um dos principais requisitos no tocante ao valor da capacitância. Por exemplo, no caso de aplicação em PLC, o capacitor deve ter uma constante dielétrica alta (titanato de Bário), um fator de dissipação baixa e, finalmente ter uma rigidez dielétrica alta. No caso de aplicação em medição de tensão e corrente, a constante dielétrica pode ser baixa, mantendo alta rigidez dielétrica e baixo valor de fator de dissipação. Além disso, a variação da capacitância com a temperatura deve ser baixa (cerca de $\pm 10\%$). No caso do fator de dissipação, em aplicações em campo oscilante (AC) é mais importante ainda, uma vez que o tangente (δ) é responsável pelo aparecimento do efeito Joule, isto é, aquecimento da bucha.

4. TRATAMENTO TEÓRICO

O fator de potencia é importante para capacitor. E definida pela expressão:

$$PF = \cos(\theta) \quad (1)$$

Onde θ é o ângulo entre direção do fluxo da corrente através do capacitor e a tensão.

A reatância capacitiva, para o caso senoidal, é definida como sendo:

$$X_c = 1/\omega C \quad (2)$$

Onde $\omega = 2\pi f$ rad/sec, e f dada em Hertz (frequência).

É importante considerarmos perdas em um capacitor. Todos os dielétricos (exceto no vácuo), possuem dois tipos de perdas. A primeira é a perda devido ao fluxo de cargas através do dielétrico e a outra perda é devida ao movimento ou rotação dos átomos ou moléculas dentro de um campo elétrico alternado. Perdas dielétricas na água é a razão porque alimentos e líquidos tornam quentes em aparelhos de microonda.

Podemos descrever perdas dielétricas, considerando a permissividade, como sendo um número complexo, definida como:

$$\epsilon = \epsilon_l - j\epsilon_n = |\epsilon| \epsilon^{-j\delta} \quad (3)$$

Onde:

ϵ_l = capacitância AC

ϵ_n = fator de perda dielétrica

δ = ângulo de perda dielétrica

A capacitância C^* é um número complexo em aplicação ac. Esta tende a C , quando a perda tende a zero, isto é, definida como:

$$C^* = C - jC_n \quad (4)$$

A razão em termos definidos a capacitância complexa dessa forma é porque nos podemos utilizá-lo esse valor complexo em qualquer equação, definida para uma capacitância real em aplicações do tipo senoidal e, obtermos um valor correto de deslocamento de fase e perdas de potência, aplicando teorias e regras usuais de circuito elétrico.

A equação (3) expressa a permissividade de duas formas – uma real e outra imaginária em fase. A notação de magnitude e fase é raramente utilizada. A mais conhecida é a que a permissividade complexa definida por ϵ_l e $\tan(\delta)$, onde:

$$\tan(\delta) = \epsilon_n/\epsilon_l \quad (5)$$

Onde $\tan(\delta)$ é chamado tangente da perda ou fator de dissipação – FD.

A parte real da permissividade é definida como sendo:

$$\epsilon_l = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (6)$$

Onde ϵ_r é a constante dielétrica e ϵ_0 permissividade no vácuo.

Retomando as equações (1) e (2), nos casos onde a perda dielétrica é mínima, ϵ_n tende a zero e assim o atraso da corrente com relação a tensão tende a 90° . Se ϵ_n é maior que zero, então a corrente e a tensão estão em fase.

$$\cos(\theta) = \frac{\epsilon_n}{\sqrt{(\epsilon_n)^2 + (\epsilon_l)^2}} \quad (7)$$

Para um bom dielétrico, $\epsilon_l \gg \epsilon_n$, então resulta:
 $\cos(\theta) \approx \epsilon_n/\epsilon_l = \tan(\delta) \quad (8)$

Conseqüentemente o fator de potencia é freqüentemente chamado de tangente da perda ou fator de dissipação, apesar de que os dois são apenas próximos.

Vamos em seguida analisar teoricamente a importância do fator de dissipação, em termos de potência dissipada ou fluxo de potência através dos eletrodos do capacitor.

A potencia S e dada por:

$$S = VI = \frac{V^2}{-jX_C} = jV^2\omega C = jV^2\frac{\epsilon_0 A}{d} (\epsilon_l - j\epsilon_n) = V^2\frac{\omega A}{d} (\epsilon_r \epsilon_0)(j + DF) \quad (9)$$

Onde A = área do eletrodo e d distancia entre os eletrodos

Por analogia, podemos obter a mesma formula de fluxo de potencia aparente, através de um capacitor como sendo:

$$S = P + jQ = V^2\omega C(J + DF) \quad (10)$$

Exemplo:

Encontre a potencia real e a reativa, num capacitor de mica, com área A = 0,03m² e espessura de 0,001m, tensão 2000 volts, freqüência 1MHZ.

$$\epsilon_r = 5,4 \quad \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$$

O resultado do fluxo de potencia calculado resulta:

$$S = 36040j + 10,8$$

Temos duas parcelas: a parcela reativa de 36040 volt Ampere reativo e 10,8 Watts, potencia real, que transformado em efeito Joule (calor ou aquecimento). Assim a dissipação real de potência num capacitor é função da freqüência e do tangente (δ).

Outro resultado dessa introdução teórica, é o tangente(δ) que é também o fator de potência do capacitor.

5. ISOLADOR GALVÂNICO

O isolador galvânico é uma parte importante do conjunto, não só pelo aspecto de segurança como também devido a necessidade dos sinais de tensão e corrente da rede elétrica de alta tensão terem que ser transmitidos ao Centro de Operação do Sistema. A coleta dos dados e a transmissão são feitas através de uma UTR(Unidade Terminal remota), instalada junto a bucha de medição. Os dados coletados pelos sensores precisam ser eletricamente isolados da UTR. Assim, foi desenvolvido o isolador galvânico, alimentado pela própria fonte da UTR (27 Volts). A isolação dos sensores da remota é feita utilizando um acoplamento ótico linear, com condições de suportar sobre Na construção do capacitor, o valor do tangente (□) final, é um parâmetro importantíssimo, pois disso depende o aquecimento ou não do capacitor, quando submetido a campo oscilante (AC). O valor do tangente(δ) depende da

matéria-prima utilizada na construção do capacitor. No caso onde o dielétrico é construído com materiais cerâmicos (titanato de bário), o corpo do dielétrico é construído moldando o pó em prensa, e logo em seguida, sinterizado.

Os eletrodos são construídos a partir da deposição de filme espesso de prata / paládio sobre as faces da cerâmica sinterizada. Depositado o eletrodo, o conjunto passar por forno a 850°C, para metalizar o filme espesso de prata/paládio. No processo de metalização a prata adere a cerâmica através da migração do paládio dentro da cerâmica, criando uma adesão extremamente forte do eletrodo à cerâmica, sem risco de criar defeitos a nível molecular. Sobre a prata assim depositada é soldado um terminal de latão, para permitir conexão externa com os cabos. O conjunto a seguir é mergulhado em epóxi ou silicone para garantir a isolamento externa contra efeito corona. Com isso, o valor da tangente (δ) do capacitor assim construído é extremamente baixo (cerca de 0,1%) - tensão de até 3 kV. Para casar a tensão da remota com o nível do sinal dos sensores, foi ainda inserido um amplificador, de modo a poder ajustar os valores de tensão e corrente, vinda do divisor capacitivo e do TC. Esse ajuste permite aferir os níveis de sinais de corrente e tensão. Com esse ajuste a bucha, pode ser utilizado como medidores de KWH e além de controlar a qualidade de energia, detectar fraudes e outras funções.

6. CAPACITOR DE ALTA TENSÃO PROJETADO

Como fora dito, o capacitor utilizado para divisor capacitivo utiliza o próprio UHMW como dielétrico, uma vez que o capacitor para medidas de tensão não precisa ter alto valor de capacitância. Assim, o valor projetado para a capacitância está em torno de alguns pFs. O corpo da bucha possui um furo interno de 60 mm de diâmetro e comprimento de 180mm, onde é alojado o isolador galvânico. O conjunto todo é isolado do cabo de alta tensão, por um dielétrico de 5mm de espessura, com capacidade para suportar mais de 400 kV, e tem uma capacitância de 18 pF. Foi escolhida a espessura de 5mm para que o transformador de corrente fique o mais perto possível do cabo de alta tensão. Com essa geometria, o sinal de corrente, com valor superior a 600 Amperes, chega a cerca de 6 volts no TC, com amplificador com ganho 1 e a tensão, cerca de 3 volts, para uma tensão de 15 kV.

Os eletrodos do capacitor são de prata e construídos com tecnologia de filme espesso. Foi implementado os contatos elétrico do eletrodo, através de uma técnica engenhosa, de modo a não afetar o ângulo de perda elétrica (tangente (δ)) e ainda sem gerar descarga parcial. Utilizamos um anel de latão, com fio soldado, e mergulhado no filme espesso de prata. Com a tecnologia desenvolvida obtém-se um valor da tangente (δ) em torno de 0,0010, medida a 120 Hz, isto é, 0,1%. O valor da capacitância com eletrodo de 60mm de diâmetro é de 18,0 pF.

7. DIVISOR CAPACITIVO PARA TENSÕES ACIMA DE 15 KV

Estamos desenvolvendo buchas para tensões superiores a 30 kV. Este trabalho deverá demandar mais pesquisa, uma vez que para tensões superiores a 50 kV deveremos ter problemas de descargas parciais, por tratar de um capacitor de pequenas dimensões, porém com altíssima isolamento. Mas de antemão temos dados suficientes da viabilidade dessa idéia, e dessa forma, o próximo objetivo é fabricar divisores capacitivos que permitam monitorar tensões superiores a 50 kV.

7. TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC) E SATURAÇÃO

Junto com o capacitor foi instalada uma bobina de núcleo aberto (para garantir a não saturação). O TC utilizado é construído com chapas de silício grão orientado. O ideal era ter utilizado como núcleo magnético ligas de cobre e níquel, para melhorar a sensibilidade e saturação. Pretendemos fazê-lo num futuro próximo.

Os ensaios elétricos foram feitos no IEE - Instituto Elétrico e de Energia da USP e os resultados foram muito favoráveis.

8. CARACTERÍSTICAS DA BUCHA E DO MEDIDOR DE CORRENTE E TENSÃO

Capacitor:

Dielétrico: UHMW, com dimensão de 5x60mm.

Eletrodos: prata

Capacitância: 18 pF

Tensão máxima suportável pelo dielétrico : 400 kV

Bucha desenhada para até 30 kV (110x204 mm)

Montagem : pedestal ou removível através de varas de manobra.

Temperatura de operação: -20 °C a 80 °C

Proteção contra UV – feita por filme espesso de silicone

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Partial Discharge: Overview and Signal Generation – Steven A. Boggs – IEE Electrical Insulation Magazine – JUL/Augt 1990 – vol 6. no.4
- 2 - Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Equipment Gabe Paoletti and Alex Gorubev
- 3 - Solid State Tesla Coil Gary L. Johnson capítulo 3 December 10,2001