

Capítulo IV

Ensaio de resistência ôhmica de enrolamentos e avaliação do comutador sob carga

Tipos de falhas e defeitos em transformadores de potência

Por Marcelo Paulino*

Este capítulo apresenta os procedimentos de teste de resistência ôhmica e avaliação do OLTC (comutador sob carga) realizados com instrumentos convencionais e os procedimentos de teste utilizando o sistema de teste CPC100. Mostra o método da queda de tensão e o procedimento de teste avaliando o desempenho da comutação do OLTC.

Resistência ôhmica dos enrolamentos

Os procedimentos para a determinação de resistências ôhmicas estão entre os mais usuais. Consistem geralmente na determinação da resistência elétrica utilizando corrente contínua a uma determinada temperatura. O testador deverá avaliar o valor da resistência a ser medida para determinar qual método e/ou equipamentos serão utilizados.

O princípio utilizado por esses métodos consiste na medição da tensão entre os terminais do objeto sob teste e ao mesmo tempo a medida da corrente que passa pelo objeto. Efetua-se

assim o cálculo da resistência ôhmica por meio da lei de Ohm. Após a realização dos testes, além da correção da medida realizada para a temperatura de referência, o testador deve comparar os valores obtidos no teste com o histórico do objeto sob teste e os resultados de testes anteriores ou mesmos dados de fábrica. Essa comparação irá balizar a análise final do teste. Apresentaremos o método da queda de tensão, consagrado pelo uso e sugerido por diversas normas internacionais. Entretanto, outros métodos poderão ser utilizados, dependendo dos equipamentos de medida disponíveis para o testador, como método da ponte (Kelvin e Wheatstone) ou uso de equipamentos que promovem a automatização do processo de medida.

Método da queda de tensão

O método da queda de tensão, também chamado de método do voltímetro e amperímetro, consiste na medida da

resistência R percorrida pela corrente I e da tensão sobre a resistência sob ensaio V . Respectivamente, a corrente I e a tensão V são medidas com um amperímetro e um voltímetro.

Esquemas de montagem

Existem duas conexões a serem usadas por este método, mostradas nas Figuras 1 e 2:

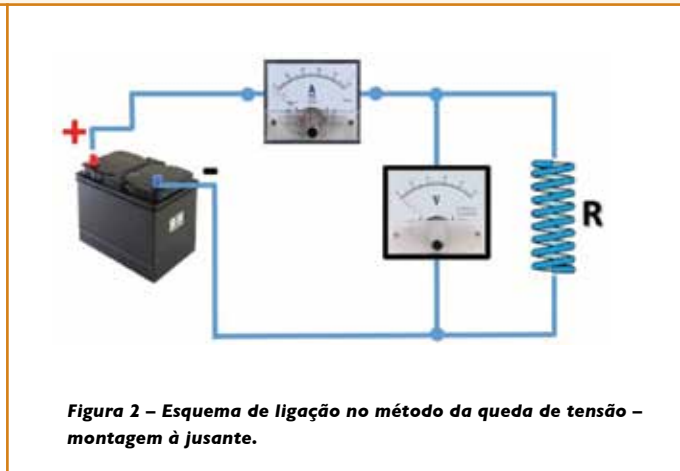
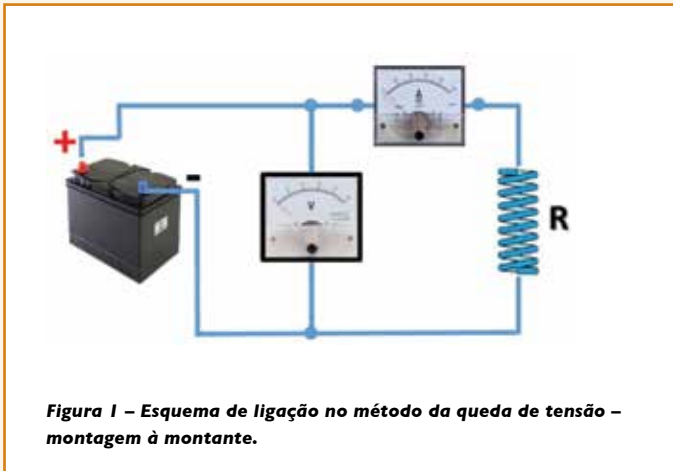
Sendo R_a a resistência interna do amperímetro e R_v a

resistência do voltímetro, temos as seguintes aplicações:

- A montagem à montante, Figura 1, deve ser usada para medir resistências $R \gg R_a$;
- A montagem à jusante, Figura 2, deve ser usada para medir resistências $R \ll R_v$.

Procedimento de teste

Depois de realizada a conexão de teste, o testador deve seguir o seguinte procedimento:



- a) Com a fonte de corrente contínua, o testador aplica uma tensão correspondente a uma corrente medida pelo amperímetro menor que 15% do valor nominal do objeto sob teste, isto é, a corrente que circula pela resistência a ser medida não deve ser superior a 15% de seu valor nominal;
- b) O tempo de aplicação da corrente de teste não deve ultrapassar 1 minuto;
- c) As indicações dos instrumentos devem estar estabilizadas para a realização das leituras desses instrumentos;
- d) As leituras dos valores medidos pelo voltímetro e pelo amperímetro devem ser realizadas simultaneamente;
- e) Utilizando a lei de Ohm, o testador deve calcular a resistência. Para a Figura 1 temos:

$$R = \frac{E}{I - (E/R_v)} \quad (1)$$

Em que:

E – resultado obtido com o voltímetro [V]

I – resultado obtido com o amperímetro [A]

R_v – Resistência interna do voltímetro [Ω]

- f) Utilizando-se a resistência variável, o testador deve efetuar de três a cinco leituras com valores de corrente diferentes. Deve-se então obter a média aritmética e desprezar os valores com diferenças maiores que 1% do valor médio;
- g) Dependendo dos componentes conectados durante o teste (fonte de corrente contínua, enrolamento sob teste), o acionamento da fonte de alimentação do circuito pode causar sobretensões importantes, podendo danificar os equipamentos de medida. Recomenda-se a desconexão do voltímetro antes do acionamento da fonte e a realização de um curto-circuito nos terminais do amperímetro.

Correção de temperatura

A resistência elétrica dos enrolamentos varia com a temperatura. Para que se tenha uma base comparativa, a resistência elétrica dos enrolamentos devem ser referidas a uma mesma temperatura. Isto pode ser executado pela expressão (106), ou seja:

$$R_{\theta_r} = R_{\theta_e} \cdot \frac{234,5 + \theta_r}{234,5 + \theta_e} \quad (2)$$

Em que:

- R_{θr} – resistência elétrica na temperatura de referência;
- R_{θe} – resistência elétrica na temperatura do ensaio;
- θ_r – temperatura de referência;
- θ_e – temperatura dos enrolamentos nas condições do ensaio.

Se o enrolamento for de alumínio, utilizar 225 ao invés de 234,5 na expressão (2).

Critérios de avaliação

As resistências obtidas devem ser comparadas com resultados anteriores ou com dados do fabricante, tendo-se o cuidado de utilizar as correções de temperatura a uma mesma base. Para transformadores, a temperatura de referência é normalmente 75 °C, para máquinas girantes (motores e geradores), a temperatura de referência é normalmente 40 °C.

Em caso de discordâncias maiores que 5%, devem ser pesquisadas a existência de anormalidades tais como: espiras em curto, número incorreto de espiras, dimensões incorretas do condutor e outros. Neste sentido, é importante que haja o histórico das medidas efetuadas.

Por outro lado, a principal causa de diferenças de medida de resistência ôhmica é o mau contato nos terminais, principalmente naqueles mal prensados. Observa-se que, muitas vezes, a resistência de contato pode apresentar valores significativos se comparada com a dos enrolamentos, principalmente do lado de baixa tensão.

Pelo exposto, é importante que haja o histórico das medidas efetuadas. O autor recomenda os seguintes valores para avaliação de resistência ôhmica de enrolamentos, para medidas na mesma base de temperatura, mostrados na Tabela 1.

Avaliação do comutador sob carga

As resistências do enrolamento são testadas no campo para se detectar perda de conexões, condutores

TABELA 1 – AVALIAÇÃO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA DE ENROLAMENTO

Diferença entre valor do ensaio e valor de referência	Avaliação
ΔR < 3%	Resultado aprovado
3% < ΔR < 5%	Ensaio deve ser repetido e resultado investigado
ΔR > 5%	Indicação de defeito ou falha

abertos e alta resistência de contato no comutador. Muitos transformadores são equipados com LTCs (Load Taps Changers) e outros dispositivos de manobra. Tais transformadores podem apresentar problemas extras associados a estes dispositivos como os oriundos do excessivo desgaste dos contatos fixos e móveis, sobrepercurso do mecanismo de mudança de taps, condensação de umidade no óleo destes mecanismos, entre outros.

O desgaste excessivo dos contatos pode ser atribuído à perda de pressão das molas (molas fracas) ou a um tempo de espera insuficiente durante o percurso. Problemas devido ao sobrepercurso do mecanismo de mudança de taps são, usualmente, devido a ajustes incorretos dos controladores de contatos. A condensação de umidade e carbonização deve-se a operação excessiva ou ausência de filtragem.

Outros problemas, como queima de fusíveis ou paradas do sistema motor, são devidos a curtos-circuitos nos circuitos de controle, travamento de origem mecânica, ou condições de subtensão no circuito de controle.

Este artigo mostra procedimentos para identificação de problemas em transformadores de potência utilizando medidas de resistência ôhmica e adicionalmente apresenta a medição da resistência dinâmica. Essa resistência dinâmica possibilita uma análise do transitório na operação da chave de comutação.

Testes do comutador sob carga (OLTC)

Para uma melhor compreensão das medidas de resistência, é necessário entender o método de operação da mudança de tap. Na maioria dos casos, a mudança de tap consiste de duas unidades, conforme mostrada na Figura 3.

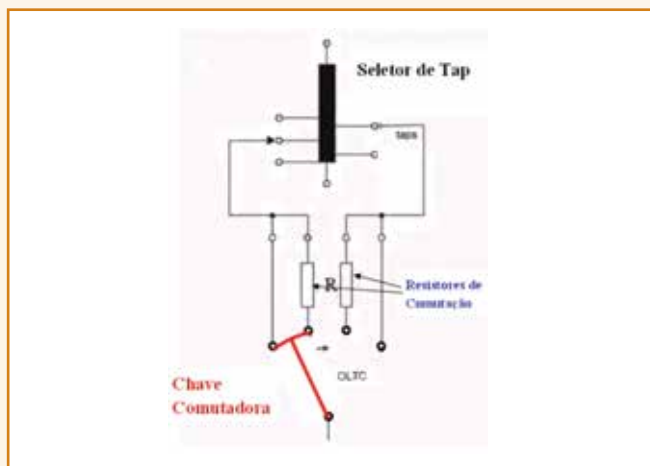


Figura 3 – Representação de um OLTC.

A primeira unidade é o seletor de tape que está localizado dentro do tanque do transformador e muda para o próximo tape (maior ou menor) sem condução de corrente. A segunda unidade é a chave de comutação, que muda sem nenhuma interrupção de um tape para o próximo enquanto conduz corrente de carga. As resistências de comutação R limitam a corrente de curto-circuito entre taps que poderiam, por outro lado, vir a ser muito alta devido à livre interrupção na mudança dos contatos. O processo de mudança entre dois tapes leva aproximadamente de 40 ms a 80 ms.

A conexão de teste é realizada na configuração a quatro fios, pois as resistências do enrolamento são muito pequenas. Uma fonte de corrente constante é usada para alimentar o enrolamento com corrente contínua. Uma tensão relativamente alta sem carga possibilita uma saturação rápida do núcleo e um valor final é alcançado apenas com variações menores. Consequentemente, na maioria das vezes, o tempo de carregamento por tap é claramente menor que 30 segundos.

Um grande número de medições pode ser executado eficientemente em pouco tempo. Até agora, somente a característica estática das resistências de contato são levadas em consideração no teste de manutenção. Com a medida da resistência dinâmica, o procedimento dinâmico de mudança da chave de comutação pode ser analisado.

Ensaio realizado com equipamento microprocessado

O CPC100 é usado para medir a resistência individual dos tapes de um comutador de transformador de potência e também checka a comutação da comutador sob carga (OLTC) sem interrupções. De uma fonte CC de corrente constante, o CPC100 injeta uma corrente no transformador de potência. Esta corrente é medida por um amperímetro também CC. Com esse valor de corrente e a tensão medida por um voltímetro 10VDC, a resistência do enrolamento é calculada.

No momento em que o tape é comutado, a entrada medida de corrente detecta o transitório da comutação, ou seja, um evento de curta duração registrando os dados da

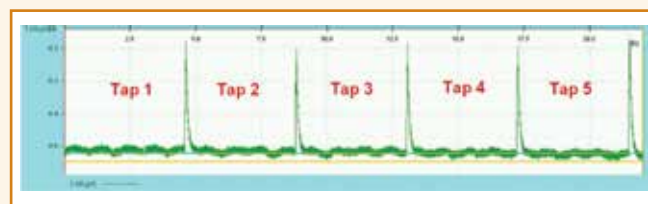


Figura 4 – Oscilografia da forma de onda da corrente que flui pela comutação.

forma de onda da corrente que flui pela comutação. Esta transição na comutação dos tapes é mostrada na Figura 4.

As características de um comutador trabalhando apropriadamente diferem de um equipamento com mau funcionamento, isto é, uma interrupção durante a comutação é indicada pela variação dos valores de ripple e do slope (inclinação) da forma de onda da corrente da comutação. A Figura 5 mostra uma corrente de comutação oscilografada indicando o ripple e o slope, cujos valores são indicados na tabela de resultados do CPC100.

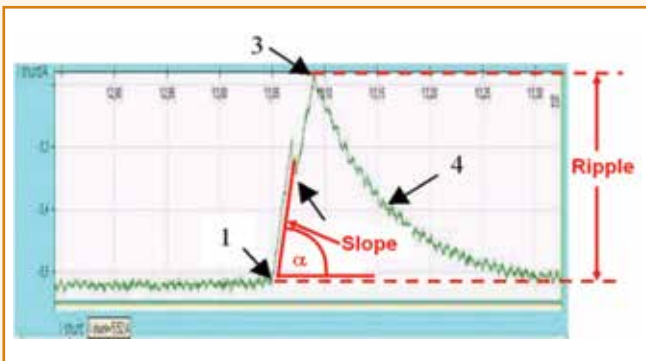


Figura 5 - Ripple e slope na forma de onda da corrente de mutação.

Para a medição da resistência dinâmica, a corrente de teste deve ser a mais baixa possível. Caso contrário, pequenas interrupções ou oscilações nos contatos da chave de comutação não são detectadas. Neste caso, o arco voltaico introduzido tem o efeito de reduzir a abertura dos contatos internamente.

Comparações com dados anteriores, os quais foram coletados quando o equipamento estava em condição (boa) conhecida, permitem uma análise eficiente. Um detector mede o pico do ripple e a inclinação (slope) da corrente medida, visto que estes critérios são importantes para uma comutação correta (sem bouncing ou outras pequenas interrupções).

Se o processo de comutação é interrompido, mesmo por um curto período de tempo, o ripple ($=I_{max} - I_{min}$) e a inclinação da variação da corrente (di/dt) aumentam. O valor para todos os tapes e particularmente os valores das três fases é comparado. Desvios importantes em relação ao valor médio indicam comutação com falha.

Procedimentos de teste

As conexões são realizadas utilizando-se o equipamento CPC100 da Omicron montam um circuito de medida a quatro fios, mostrado na Figura 6.

O procedimento de teste automático devolve para o

*I Test: 5.000A
T Meas.: 14.0° C
T ref.: 20.0° C
Results:*

Times	R meas.	Dev.	R ref.	Ripple	Slope	IDC	VDC
42.000 s	649.7mΩ	-0.17%	664.9mΩ	90.45%	-8.024mA/s	4.9203A	3.1965V
29.000 s	633.4mΩ	0.10%	648.3mΩ	1.01%	-173.3mA/s	4.9215A	3.1175V
31.000 s	622.6mΩ	-0.01%	637.2mΩ	0.92%	-170.5mA/s	4.9215A	3.0641V
31.000 s	613.2mΩ	-0.03%	627.6mΩ	0.92%	-151.6mA/s	4.9215A	3.0177V
28.000 s	614.6mΩ	-0.07%	629.0mΩ	0.86%	-143.5mA/s	4.9203A	3.0238V
33.000 s	610.9mΩ	0.04%	625.2mΩ	0.87%	-129.5mA/s	4.9191A	3.0049V
36.000 s	607.0mΩ	-0.01%	621.2mΩ	0.88%	-123.2mA/s	4.9179A	2.9849V
33.000 s	597.6mΩ	0.01%	611.7mΩ	0.80%	-113.1mA/s	4.9179A	2.9391V
47.000 s	594.0mΩ	0.14%	607.9mΩ	0.81%	-106.1mA/s	4.9179A	2.9210V
32.000 s	537.0mΩ	-0.05%	549.7mΩ	0.74%	-92.74mA/s	4.9227A	2.6436V
34.000 s	569.3mΩ	-0.03%	582.6mΩ	0.86%	-111.7mA/s	4.9191A	2.8002V
34.000 s	560.7mΩ	0.06%	573.9mΩ	0.82%	-84.09mA/s	4.9179A	2.7573V
34.000 s	568.8mΩ	-0.02%	582.2mΩ	0.80%	-85.78mA/s	4.9155A	2.7962V
35.000 s	568.9mΩ	-0.03%	582.3mΩ	0.76%	-82.80mA/s	4.9143A	2.7958V
42.000 s	555.9mΩ	0.08%	568.9mΩ	0.73%	-81.17mA/s	4.9143A	2.7317V
51.000 s	557.4mΩ	0.28%	570.6mΩ	0.76%	-68.81mA/s	4.9143A	2.7394V
46.000 s	554.2mΩ	0.10%	567.3mΩ	0.75%	-79.97mA/s	4.9131A	2.7230V
51.000 s	548.9mΩ	0.05%	561.8mΩ	0.74%	-70.01mA/s	4.9131A	2.6969V
40.000 s	526.6mΩ	-0.03%	538.9mΩ	0.78%	-70.50mA/s	4.9143A	2.5877V

Figura 7 – Relatório.

testador os resultados de resistência estática e dinâmica. A Figura 7 mostra um exemplo de relatório exportado para MS Word com a tabela de dados.

Da tabela de resultados podem ser feitos gráficos comparando a resistência ôhmica na subida e na descida dos tapes.

A Figura 8 mostra um exemplo dessa avaliação em

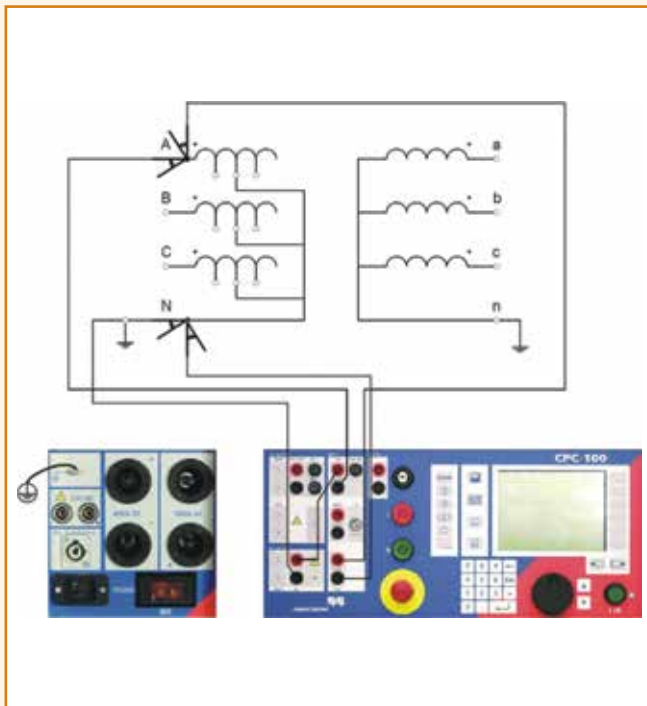


Figura 6 – Conexões para teste de OLTC de transformadores de potência. Medida da resistência de enrolamento e resistência dinâmica da comutação.



Figura 8 – Transformador de 220/110kV, fabricado em 1961.

um teste realizado em um transformador de 220/110 kV, fabricado em 1961.

O procedimento de teste automático devolve para o testador os resultados de resistência estática e dinâmica. A Figura 7 mostra um exemplo de relatório exportado para MS Word com a tabela de dados.

* 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.osetoreletrico.com.br

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