

Capítulo III

Comparações entre algoritmos para análise dos resultados de SFRA

Por Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino*

Os diferentes algoritmos para análise de resposta em frequência e comparação dos algoritmos ao padrão chinês para análises do FRA

Um problema da análise de resposta em frequência é a falta de procedimento padronizado internacional para que seja feita a comparação das análises dos resultados. Assim, o problema a ser resolvido é a interpretação das diferenças entre duas assinaturas do FRA. Uma mudança na função de transferência pode ser interpretada como uma deformação no enrolamento com relativa facilidade.

Entretanto, é complicado estimar o correspondente grau de deformação do enrolamento e identificar qual a extensão da variação das medidas do FRA é aceitável para operação do transformador sem falhas. As análises são feitas por pessoas capacitadas, porém, há o risco de serem julgadas de maneira subjetiva.

Por isso a necessidade de um algoritmo que permita a determinação qualitativa e quantitativa de duas assinaturas de FRA relacionadas com uma determinada faixa de frequência. A utilização de uma ferramenta que fornece uma referência numérica ajuda a equipe de teste na tomada de decisão, eliminando erros na análise do resultado. Assim, aumenta-se consideravelmente a confiabilidade do ensaio.

O artigo descreve diferentes algoritmos para análise de resposta em frequência: erro ou desvio entre duas assinaturas e fator de correlação cruzada. O desempenho desses algoritmos é verificado usando

um grupo de dados obtidos durante medidas para a investigação de sensibilidade do método do FRA para defeitos no enrolamento. Finalmente os algoritmos são comparados ao padrão chinês para análises do FRA.

Métodos matemáticos para análise

Para iniciarmos a discussão sobre os modelos matemáticos aplicados à análise de falha nos testes de resposta em frequência, definimos FT como função de transferência.

Desvio entre uma Função de Transferência (FT) de referência e uma Função de Transferência (FT) de teste.

O cálculo do desvio ou erro entre uma FT de referência e uma FT de teste é o método mais fácil de mostrar as diferenças. Chamaremos essa diferença de função erro representada por $\Delta_0(f)$.

$$\Delta_0(f) = |FT_{Re f}(f)| - |FT_{Test}(f)| \quad (1)$$

A desvantagem deste método é que a função erro é calculada de maneira não uniforme através da faixa de frequência.

É necessário realizar uma normalização da função erro para ficar independente da resposta da função erro aplicada às funções de transferências consideradas.

Uma possibilidade é padronizar o valor médio da FT de referência, $|FT_{Ref}(f)|$ como mostrado em (1). Com isto o peso da função erro é o mesmo em toda a faixa de frequência.

$$\Delta_1(f) = \frac{|FT_{Ref}(f)| - |FT_{Test}(f)|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |FT_{Ref,i}(f)|} \quad (2)$$

A esperança $E[\Delta_1(f)]$ descreve o erro relativo médio da FT de teste. Se a FT de teste e a FT de referência forem idênticas seu valor será zero. Também se $\Delta_0(f)$ for zero isto significará apenas ruído.

$$E[\Delta_1(f)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_{1,i}(f) \quad (3)$$

O desvio padrão é uma medida da variação do erro que significa a distribuição estatística dos valores da função erro, dada pela raiz quadrada positiva da variância.

$$\sigma[\Delta_1(f)] = \sqrt{Var(\Delta_1(f))} = E[(\Delta_1(f) - E[\Delta_1(f)])^2] \quad (4)$$

O desvio padrão é zero para uma diferença constante entre as funções de transferências.

Fator de correlação cruzada

O fator de correlação é a medida da similaridade entre duas curvas. No caso de variáveis discretas aleatórias é definida como o quociente entre a covariância (Cov) e o desvio padrão (σ) dessas variáveis.

$$\rho(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X) \cdot Var(Y)}} \quad (5)$$

O fator de correlação pode assumir valores apenas entre -1 e +1. Uma completa correlação linear positiva (negativa) de duas variáveis aleatórias é dada por um valor de +1(-1) e uma correlação não linear é dada pelo valor do fator de correlação igual a zero.

O fator descreve o nível de dependência linear entre duas variáveis aleatórias. Se elas são consideradas como dois vetores N-dimensionais, o fator de correlação pode ser interpretado como o co-seno do ângulo entre os dois vetores.

Veja um exemplo com duas funções de transferências, FT1 e FT2. Estas podem ser consideradas como uma lista de medidas lidas com N valores e, conseqüentemente, como valores aleatórios. Tal equação resulta em:

$$\rho(FT1, FT2) = \frac{\sum_{i=1}^N (FT1_i^*(f) \cdot FT2_i^*(f))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (FT1_i^*(f))^2 \cdot \sum_{i=1}^N (FT2_i^*(f))^2}} \quad (6)$$

$$TF1^*(f) = |TF1(f)| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |TF1_i(f)| \quad (7)$$

$$TF2^*(f) = |TF2(f)| - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |TF2_i(f)| \quad (8)$$

Padrão chinês de análise do FRA – norma DL/T911-2004

DL/T911-2004 é uma norma para análise da resposta em frequência usada na República Popular da China. Para maiores detalhes, o usuário pode visitar o site www.cepp.com.cn da empresa China Electric Power Publishing Co.

O algoritmo avalia a similaridade de duas respostas em frequência de enrolamentos de transformadores (duas assinaturas) pelo cálculo dos fatores RLF, RMF e RHF (ver Tabela 1 – Fatores de avaliação de enrolamentos de acordo com a norma DL/T911-2004).

Para entendimento básico do cálculo que envolve esse algoritmo, o cálculo dos fatores é mostrado a seguir.

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[X(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \right]^2 \quad (9)$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[Y(k) - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \right]^2 \quad (10)$$

$$LR_{xy} = \frac{D_x \times D_y}{\sqrt{D_x D_y}} \quad (11)$$

$$R_{xy} = \begin{cases} 10 & \text{se } 1 - LR_{xy} < 10^{-10} \\ -\lg(1 - LR_{xy}) & \text{em outros casos} \end{cases} \quad (12)$$

Em que X(k) e Y(k) são sequências comparáveis da resposta em frequência com comprimento N. O fator Rxy avalia em diferentes valores das escalas os fatores de avaliação do enrolamento, conforme os dados mostrados na Tabela 1.

Fator de avaliação do enrolamento	Escala de frequência
RLF	1 kHz 100 kHz
RMF	100 kHz 600 kHz
RHF	600 kHz 1 MHz

Tabela 1 – Fatores de avaliação de enrolamentos de acordo com a norma DL/T911-2004

Usando os fatores de avaliação do enrolamento apresentados, as condições de deformação do enrolamento do transformador são definidas na Tabela 2.

Grau de deformação do enrolamento	Fator de avaliação do enrolamento
Enrolamento normal (Normal winding)	RLF ≥ 2,0 E RMF ≥ 1,0 E RHF ≥ 0,6
Deformação leve (Slight deformation)	2,0 > RLF ≥ 1,0 OU 0,6 ≤ RMF < 1,0
Deformação óbvia (Obvious deformation)	1,0 > RLF ≥ 0,6 OU RMF < 0,6
Deformação severa (Severe deformation)	RLF < 0,6

Tabela 2 – Avaliação de enrolamentos de acordo com a norma DL/T911-2004

Medida de relação do número de espiras e função de transferência entre enrolamentos

O cálculo do desvio ou erro entre uma função de transferência de referência e uma função de transferência de teste em uma determinada frequência pode identificar diferenças importantes entre as condições dos enrolamentos testados.

O exemplo a seguir ilustra a situação de colapso do enrolamento, ou seja, curto-circuito entre espiras resultando na alteração da relação do número de espiras e consequente alteração da relação de transformação.

Da mesma forma que se identifica a relação do número de espiras em enrolamentos, pode-se realizar a mesma análise para identificar a diferença do número de espiras em tapes diferentes.

O ensaio foi realizado em um transformador Trafo 5MVA 34,5/13,8/6,9 kV, fabricado em 2006. A Figura 1 apresenta duas características de transferência, ambas da bobina H1-H0 para a bobina x1-x0.

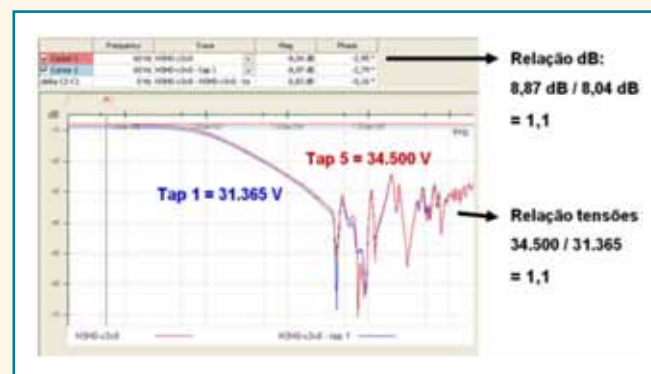


Figura 1 – Determinação da relação de espiras pela função de transferência

A primeira assinatura, de cor vermelha, foi realizada no tape 5 com tensão nominal de 34.000 [V]. A segunda assinatura foi medida no tape 1, com tensão nominal de 31.365 [V]. Comparando-se as tensões em dada posição de tape, tem-se:

$$\frac{V_{\text{tape 5}}}{V_{\text{tape 1}}} = \frac{34.000}{31.365} = 1,10 \quad (13)$$

A relação de tensão nesses tapes mostra uma diferença de 10%. Quando realizamos medidas pontuais utilizando os cursores da tela gráfica do software do equipamento de teste FRAnalyzer para a frequência de 60 Hz temos os valores em dB, para tape 5 de 8,87 dB e para tape 1 de 8,04 dB.

Da relação entre eles, obtemos:

$$\frac{\text{Tape 5}}{\text{Tape 1}} = \frac{8,87}{8,04} = 1,10 \quad (14)$$

Esse valor mostra a capacidade do procedimento adotado em determinar a relação de espiras quando ocorre uma alteração, seja determinada por mudanças de tape, seja identificando diferenças de determinado número de espiras devido à falha no enrolamento.

Identificação de curto-circuito e mudança de posição de enrolamento

Para este ensaio foi utilizado um transformador didático de distribuição monofásico de 7,97 kV para 240 V, de 10 kVA da Trael Transformadores. A Figura 2 mostra as conexões realizadas no transformador sob teste.



Figura 2 – Conexões do ensaio de função de transferência em transformador monofásico

A Figura 3 mostra as assinaturas da função de transferência de H1 para X1. O traço em vermelho indica uma situação de enrolamento normal.

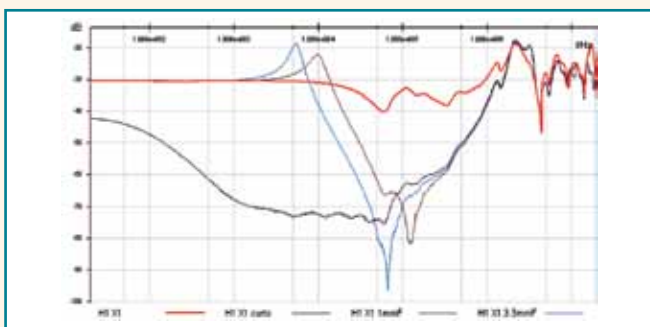


Figura 3 – Ensaio de função de transferência de H1 para X1

São também indicadas três situações de defeito. Com X1 em curto para massa e uma simulação de mudança na posição do enrolamento inserindo capacitores entre X1 e a massa. Para uma capacitância de 1 μ F, tem-se um pico de desvio em 10 kHz e um afundamento em 125 kHz na função de transferência. Inserindo um capacitor de 3,3 μ F entre X1 e a massa tem-se um pico de desvio em 5,5 kHz e um afundamento em 65 kHz na função de transferência.

Enrolamento de baixa tensão com curto-circuito para massa

Para a situação de curto-circuito para massa do enrolamento de baixa tensão, é realizada a análise com correlação cruzada e comparados ao padrão chinês DL/T911-2004.

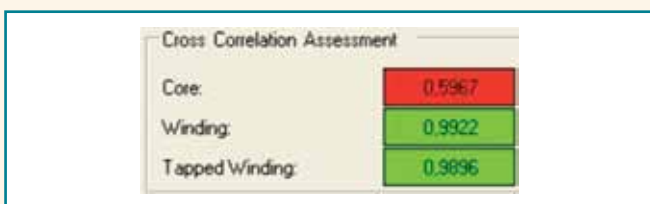


Figura 4 – Resultado da avaliação com correlação cruzada para curto-circuito para massa

Low Frequency	1 kHz - 100 kHz	0,19
Medium Frequency	100 kHz - 600 kHz	0,15
High Frequency	600 kHz - 1 MHz	2

Figura 5 – Avaliações com a norma DL/T911-2004 para curto-circuito para massa

A correlação cruzada indica defeito para o núcleo, ou seja, para massa com o índice CORE igual a 0,5967. Este índice se refere ao intervalo de ocorrência em baixas frequências, relativo a defeitos para terra. Neste caso, a correlação, além de mostrar que ocorreu um defeito, ainda mostrou sua localização. A avaliação com a norma chinesa mostra uma avaliação semelhante indicando deformação severa (Severe deformation) com RLF igual a 0,19. Observa-se que ela aponta a ocorrência de defeito, mas não indica o local da ocorrência.

Enrolamento de baixa tensão com 1 μ F para massa

Para a situação de inserção de um capacitor de 1 μ F entre o enrolamento e a massa, é realizada a análise com correlação cruzada e comparados ao padrão chinês DL/T911-2004.

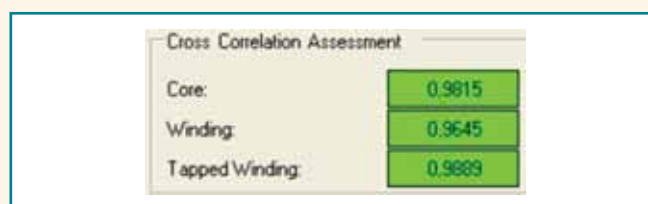


Figura 6 – Resultado da avaliação com correlação cruzada para capacitância de 1 μ F para massa

Low Frequency	1 kHz - 100 kHz	0,87
Medium Frequency	100 kHz - 600 kHz	0,09
High Frequency	600 kHz - 1 MHz	1,98

Figura 7 – Avaliação com a norma DL/T911-200 para capacitância de 1 μ F para massa

Neste caso a correlação cruzada não indica defeito, pois todos os valores correspondentes a todas as faixas de frequência mostram valores muito próximos a um. No entanto, os valores da norma chinesa indicam uma deformação óbvia (Obvious deformation).

Enrolamento de baixa tensão com 3,3 μ F para massa

Para a situação de inserção de um capacitor de 3,3 μ F entre o enrolamento e a massa, é realizada a análise com correlação cruzada e comparados ao padrão chinês DL/T911-2004.

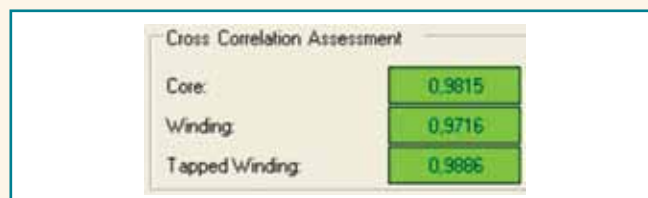


Figura 8 – Avaliações com correlação cruzada para capacitância de 3 μ F para massa

Low Frequency	1 kHz - 100 kHz	0,57
Medium Frequency	100 kHz - 600 kHz	0,01
High Frequency	600 kHz - 1 MHz	1,96

Figura 9 – Avaliações com a norma DL/T911-2004 para capacitância de 3 μ F para massa

Como no item anterior, a correlação cruzada não indica defeito, pois todos os valores correspondentes a todas as faixas de frequência mostram valores muito próximos a um. Entretanto, os valores da norma chinesa indicam uma deformação severa (Severe deformation) com RLF igual a 0,57. Observa-se que com o aumento da capacitância na simulação, indicando um aumento na falha, também é indicada pela análise com a norma chinesa.

Considerações sobre os métodos de análise

A interpretação das características do método da resposta em frequência pode ser subjetiva quando a comparação das assinaturas se dá somente pela forma gráfica.

A utilização de uma ferramenta que fornece uma referência numérica ajuda a equipe de teste na tomada de decisão, eliminando erros na análise do resultado. Assim, aumenta-se consideravelmente a confiabilidade do ensaio.

Os algoritmos apresentados são capazes de reconhecer mudanças de assinaturas de resposta em frequência, porém, elas apresentam diferentes sensibilidades para casos determinados.

Para os casos apresentados, a utilização de correlação cruzada mostra-se eficiente na localização do defeito para massa, mas não foi capaz de identificar deslocamentos da bobina.

A norma chinesa mostra-se uma boa tentativa para apoiar as avaliações de ensaios de resposta em frequência, mas atualmente não podemos assegurar sua plena utilização sem a análise do testador. Uma possível solução seria a integração de vários algoritmos.

* **MARCELO EDUARDO DE CARVALHO PAULINO** é engenheiro eletricista e especialista em manutenção de sistemas elétricos. É instrutor certificado pela Omicron Electronics, membro do CE B5 do Cigré-Brasil e gerente técnico da Adimarco | marcelo@adimarco.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@atitudeeditorial.com.br