

Capítulo I

Introdução à análise de resposta em frequência

Por Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino*

Os transformadores são constituídos por uma complexa rede de resistências, capacitância e indutâncias internas. A injeção de um sinal senoidal em uma larga escala de frequência resulta em assinaturas que, quando comparadas, podem mostrar alterações nessa rede RLC, que podem estar relacionadas a faltas ou defeitos. Este artigo faz uma introdução sobre a análise de resposta em frequência, mostrando definições e conceitos básicos.

Introdução

Análise de Resposta em Frequência, geralmente conhecida na indústria como FRA, do inglês Frequency Response Analyses, é uma técnica de teste de diagnóstico poderosa utilizada no estudo e análise de sistemas lineares. O termo se aplica, de maneira geral, a qualquer análise de desempenho de componentes elétricos, sistemas, circuitos, equipamentos, para obter respostas quanto à excitação em várias componentes de frequência. É muito empregada na engenharia de materiais e na eletrônica para avaliar a qualidade dos componentes e circuitos.

Esta técnica consiste em apresentar o comportamento do sistema analisado segundo a aplicação de sinais elétricos em uma ampla faixa de frequências. Sua aplicação é dada pelo estudo da variação com a frequência do quociente entre dois fasores, em amplitude e fase. Na variação da amplitude e da fase com a frequência, estarão presentes a diferença de amplitude e o atraso de fase devido à configuração dos circuitos R-L-C que compõem a estrutura do elemento testado.

Os transformadores são equipamentos essenciais em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. O principal interesse das medições de resposta em frequência em transformadores é detectar deformações nos enrolamentos e no núcleo de um transformador resultante das forças eletromagnéticas

ocasionadas por falhas no sistema em que o transformador está conectado, falhas no comutador sob carga, falhas de sincronização, de transporte, descarga atmosférica ou falta dentro do transformador, que podem gerar altas correntes circulantes nas bobinas e/ou uma alta tensão sobre estas. Conseqüentemente, são provocados danos estruturais, deformações nas bobinas e/ou de isolamento do equipamento, fechando-se curto-circuito entre espiras, entre bobinas ou destas para a carcaça (ponto de terra).

A deformação do enrolamento pode eventualmente resultar em uma falha no isolamento entre espiras, resultando, finalmente, em espiras “curto-circuitadas”. Ou seja, uma deformação ocorrida pelos motivos expostos pode não ser detectada imediatamente, nem produzir efeitos evidenciados por técnicas convencionais de testes elétricos ou por análise dos gases dissolvidos. No entanto, certamente poderá evoluir para um defeito, causando a imediata indisponibilidade do transformador, aumentando a probabilidade de falha total.

Além do diagnóstico de falhas depois de um evento, por exemplo, de curto-circuito, também há interesse crescente na detecção da integridade enrolamento, do grau de deformação, antes de um eventual defeito. Isto é realizado durante interrupções planejadas, ou seja, as avaliações das condições do transformador determinando a confiabilidade esperada

do transformador seriam realizadas dentro de um programa de manutenção preventiva.

Outra importante aplicação para medições de análise de resposta em frequência é verificar a integridade mecânica de um transformador depois de transporte. Isto significa proporcionar um meio confiável de confirmar que o núcleo e a estrutura do enrolamento não sofreram quaisquer danos mecânicos, apesar de sustentar choques durante o transporte. Danos de transporte também podem ocorrer se os procedimentos forem inadequados, podendo conduzir ao movimento do enrolamento e núcleo.

Definições

Com a finalidade de iniciar o estudo das aplicações da análise de resposta em frequência, é preciso definir algumas expressões.

A. Análise de Resposta em Frequência

Quaisquer medições dependentes de frequência (para altas frequências, por exemplo, MHz) das respostas elétricas (funções de transferência) de enrolamentos de transformadores com aplicação de sinais com o objetivo principal de detecção de deformação do enrolamento por meio dos efeitos das alterações resultantes em sua estrutura (distribuições de capacitâncias ou indutâncias).

B. Método de Varredura de Frequência

Consiste na medida direta de uma resposta de frequência por

meio da injeção de um sinal de frequência variável. Este sinal é injetado em um terminal de entrada e medida a resposta no terminal de saída.

C. Método de Impulso de Tensão

Consiste na medida indireta de uma resposta de frequência realizada pela injeção de um sinal de impulso de uma forma particular em um terminal de entrada e medida a resposta no terminal de saída. As medidas, realizadas no domínio do tempo, são transformadas para o domínio de frequência.

D. Amplitude da Análise de Resposta em Frequência

A amplitude da resposta relativa ao sinal injetado, que determina a função transferência de tensão, geralmente expresso em dB, é calculada como:

$$A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (1)$$

Em que:

- $A(\text{dB})$: amplitude em [dB]

- V_{out} : tensão de entrada

- V_{in} : tensão de saída

E. Fase da Análise de Resposta em Frequência

Trata-se da mudança de ângulo de fase da resposta relativa ao sinal injetado.

F. Impedância Terminal (Função impedância)

Consiste na representação gráfica da impedância própria de uma bobina, apresentando a relação entre o sinal de tensão de entrada e o sinal de corrente de entrada em função da frequência, obtendo-se a função impedância $U_i/I_i(f)$ e função admitância $I_i/U_i(f)$.

G. Frequência de Ressonância

Circuito RLC qualquer com uma fonte de tensão senoidal representado na Figura 1.

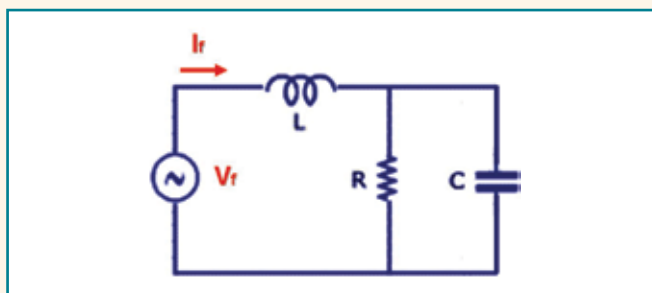


Figura 1 – Exemplo de Circuito RLC

Sendo V_f e I_f a tensão e corrente, respectivamente, injetada pela fonte. Têm-se:

$$I_f = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_f}{R + j(X_L - X_C)} \quad (2)$$

Em que $X_L = \omega L$ e $X_C = 1/\omega C$. A corrente no circuito é máxima quando se verifica a igualdade $X_L = X_C$, isto é, quando

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (3)$$

$$\omega = \omega_R = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (4)$$

sendo ω_R designada por frequência de ressonância.

Ainda na frequência de ressonância, verifica-se que:

$$Z = R + j(X_L - X_C) = R \quad (5)$$

O que implica defasagem nula entre tensão e corrente.

Vale ressaltar que a corrente e a potência dissipada no circuito são máximas para os valores de R , C e L na frequência de ressonância. E para essas condições a impedância é mínima.

Medida da função de transferência

Este método está baseado na suposição que qualquer deformação mecânica pode ser associada a uma mudança das impedâncias do circuito equivalente e que essas mudanças podem ser detectadas por uma função de transferência.

Consiste em medir a função de transferência, também conhecida como resposta em frequência, e a impedância terminal dos enrolamentos. Essas medidas podem ser usadas como um método de diagnóstico para detecção de defeitos elétricos e mecânicos do transformador em cima de uma larga escala de

frequências. Para tal, é realizada a comparação da função de transferência obtida com as assinaturas de referência. Diferenças podem indicar dano ao transformador, o qual pode ser investigado usando outras técnicas ou um exame interno.

O circuito equivalente de um transformador é complexo e composto de resistências, indutâncias e capacitâncias provenientes dos enrolamentos, assim como capacitâncias parasitas entre espiras, entre bobinas e destas para o tanque. Este circuito possui características únicas de resposta em frequência para cada transformador, funcionando como uma impressão digital. Qualquer tipo de dano na sua estrutura interna, tanto na parte ativa (enrolamentos e núcleo) como na parte passiva (estrutura, suportes, tanque etc.), afeta diretamente os parâmetros deste circuito equivalente, alterando sensivelmente a resposta em frequência deste circuito, o qual comparado à sua resposta original pode claramente evidenciar a falha. A Figura 2 mostra uma representação dos enrolamentos em torno do núcleo em um transformador.

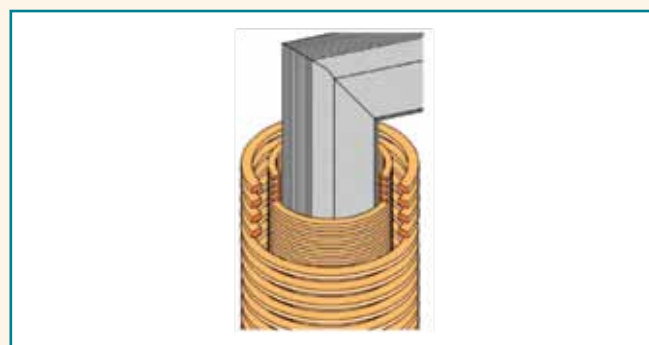


Figura 2 – Estrutura dos enrolamentos em torno do núcleo do transformador

A Figura 3 exibe uma representação da estrutura dos enrolamentos dentro do transformador. A reunião da parte ativa (enrolamentos) e as partes aterradas (núcleo e tanque do transformador) formam uma complexa rede RLC.

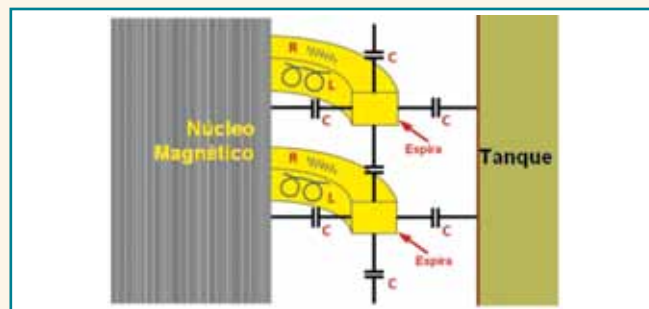


Figura 3 – Representação do circuito RLC interna no transformador

Em essência, o método consiste na aplicação de um sinal senoidal de baixa tensão, por exemplo, 1 V, variando a frequência do sinal aplicado, de 10 Hz a 20 MHz. Em outro terminal, são medidos amplitude e ângulo do sinal da resposta correspondente ao sinal de aplicado, sendo este mantido no mesmo nível para cada frequência de teste, obtendo resultados precisos e produzindo repetibilidade do ensaio. A Figura 4 traz a representação das medidas da função de transferência em um transformador. Este é tratado como quadripolo e são realizadas as medidas das tensões e correntes de entrada.

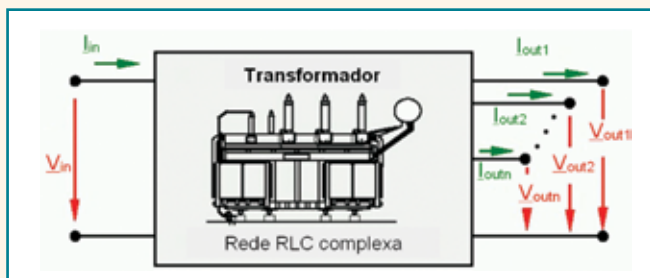


Figura 4 – Representação de medida da função de transferência

Os resultados obtidos são apresentados em forma gráfica, segundo as medidas dos sinais de tensão e corrente de entrada e saída. As representações gráficas das funções amplitude e fase da resposta em frequência, em escala logarítmica, designam-se por diagramas de Bode de amplitude e de fase. Nos diagramas de Bode de amplitude, o eixo das frequências (horizontal) representa-se em escala logarítmica, ao passo que na escala vertical, representa-se a função $20 \log_{10}$ (amplitude), ao invés de a amplitude apenas, cuja unidade se designa por decibel (dB).

Tem-se como resultado, tanto para amplitude, quanto para fase, a função transferência de tensão, apresentando a relação entre o valor do sinal de tensão de saída e o sinal de tensão de entrada em função da frequência, ou seja, $U_o/U_i (f)$. A Figura 5 evidencia a obtenção da função de transferência.

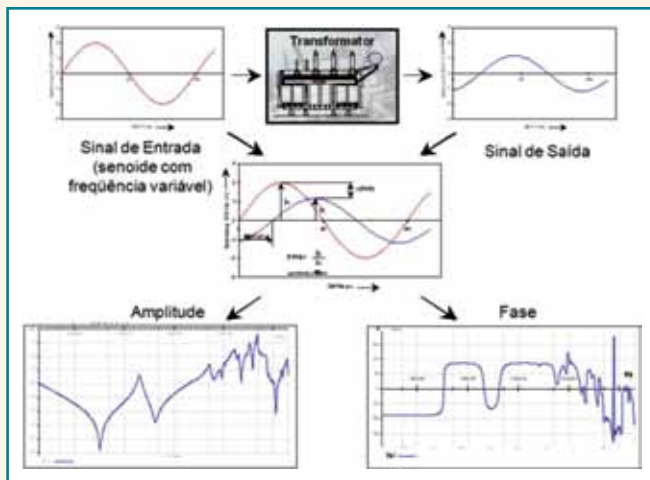


Figura 5 – Obtenção da função de transferência

A função de transferência é representada no domínio da frequência e é denotada pelo transformada de Fourier $H(j\omega)$, em que $(j\omega)$ denota a presença de uma função dependente da frequência, em que $\omega = 2\pi f$.

A transformada de Fourier mostrando a função de transferência entre a entrada e saída é dada pela equação 6:

$$H(j\omega) = \frac{V_{Saída}(j\omega)}{V_{Entrada}(j\omega)} \quad (6)$$

Quando uma função de transferência é reduzida à sua forma mais simples, é gerada uma relação de dois polinômios. As características principais, por exemplo, a ressonância de uma função de transferência ocorre nas raízes dos polinômios. As raízes

do numerador são chamadas “zero” e as raízes do denominador são os “polos”. Os zeros produzem um aumento no ganho, quando os polos causam a atenuação. O objetivo de Análise de Resposta em Frequência é medir o modelo da impedância do elemento sob teste. Quando é realizada a medida da função de transferência $H(j\omega)$, não é medida a impedância do elemento sob teste, ou seja, obtém-se a relação das tensões de entrada e saída e não a impedância $Z(j\omega)$ deste elemento.

A verdadeira impedância $Z(j\omega)$ é dada pela rede de RLC medida e é obtida com a medida da tensão e da corrente de entrada. A maioria dos instrumentos de medida e arranjos de ensaio não fornece a medida da impedância, eles o calculam em função de uma impedância de referência. Quando o instrumento utilizado não é capaz de medir a impedância, utiliza-se o recurso de substituir uma corrente pela tensão de saída. Os arranjos de teste são baseados no circuito apresentado pela Figura 6, em que onde V_{fonte} é o sinal injetado e $V_{entrada}$ e $V_{saída}$ são as medidas da tensão de referência e de teste. Z_{fonte} é a impedância interna do gerador de sinais ou do analisador de redes e $Z(j\omega)$ é a impedância do enrolamento. Uma impedância Z_{fonte} é definida como 50Ω e incorporada em $H(j\omega)$.

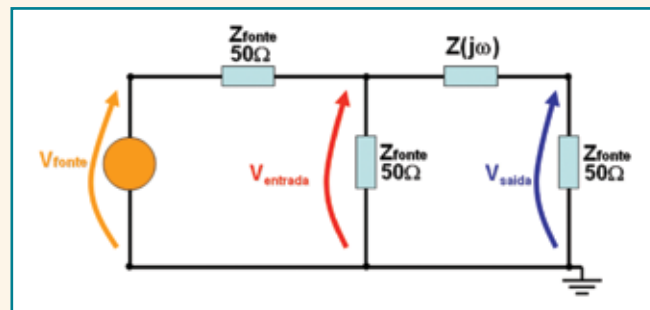


Figura 6 – Circuito básico para teste

A Figura 7 mostra a montagem do circuito convencional de teste. Nela é representado um gerador de sinais responsável pela injeção do sinal senoidal, um oscilógrafo responsável pela medida dos sinais de entrada (CH1) e de saída (CH2). Adicionalmente, mostra que todo o processo pode ser automatizado com o uso de um computador com sistema microprocessado e software dedicado.

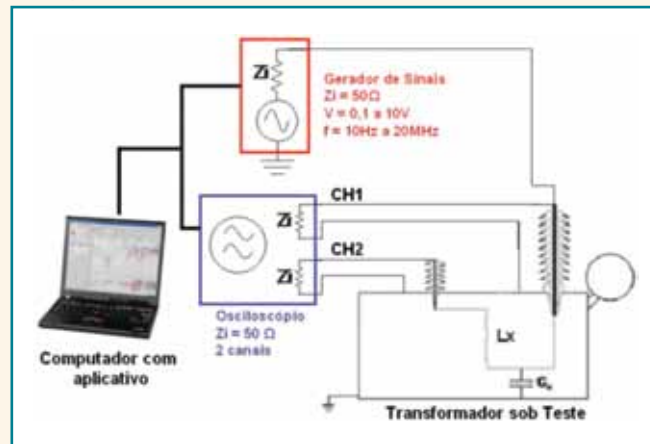


Figura 7 – Circuito convencional de teste

A equação 8 mostra o relacionamento de $Z(j\omega)$ a $H(j\omega)$.

$$H(j\omega) = \frac{V_{Saída}(j\omega)}{V_{Entrada}(j\omega)} = \frac{50}{Z(j\omega) + 50} \quad (6)$$

$$Z(j\omega) = \frac{50}{H(j\omega)} - 50 \quad (7)$$

A medida da amplitude da relação de tensões ou da função transferência de tensão é dada por:

$$A(dB) = 20 \cdot \log_{10}(H(j\omega)) \quad (8)$$

$$A(dB) = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{V_{Saída}}{V_{Entrada}}\right) \quad (9)$$

E a relação das fases:

$$A(\theta) = \tan^{-1}(H(j\omega)) \quad (10)$$

$$A(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{V_{Saída}}{V_{Entrada}}\right) \quad (11)$$

Avaliação dos resultados

A avaliação dos resultados é baseada em comparações de diferentes representações gráficas dos elementos testados. As regras para especificar essas faixas e escalas de frequência para transformadores para tamanhos extragrande, grande e médios de transformadores de potência (PT) e transformadores de distribuição (DT) são mostradas na Figura 8.

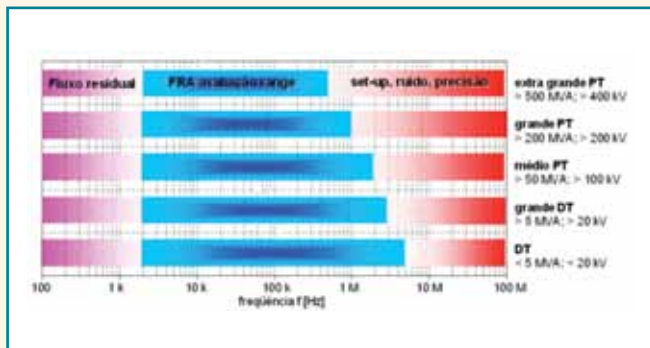


Figura 8 – Faixas de frequência para tamanhos de transformadores

A experiência tem mostrado que esta comparação pode ser realizada em três faixas distintas de frequências:

- Frequência baixa < 2 kHz: estão relacionados com ocorrências no núcleo de transformador e circuitos magnéticos. A avaliação nesta faixa de frequência tem que levar em consideração o magnetismo residual.
- Frequência média de 2 kHz a cerca de 1 MHz: a análise nesta faixa tem que levar em conta as modificações na geometria, a abertura e os curtos-circuitos nos enrolamentos.
- Frequências altas acima de 1 MHz: a análise nesta faixa está relacionada às alterações das conexões, às buchas, às conexões entre enrolamentos, aos comutadores e outros.

As Figuras 9 e 10 mostram exemplos de comparação entre assinaturas.

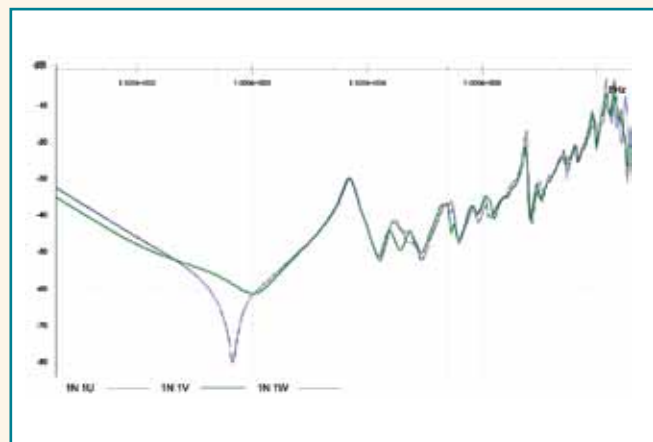


Figura 9 – Curto-circuito entre espiras

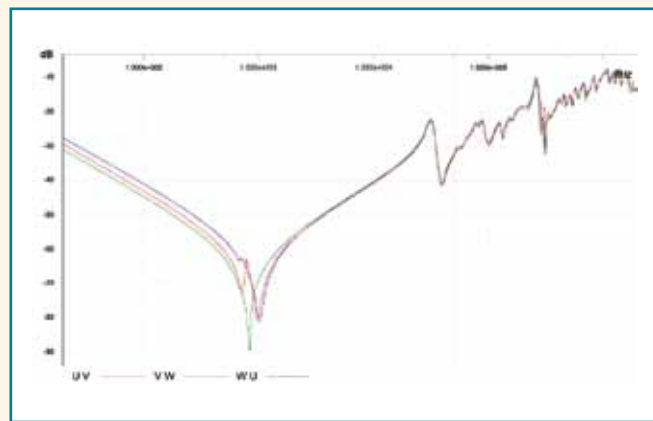


Figura 10 – Dano no núcleo devido ao transporte

* MARCELO EDUARDO DE CARVALHO PAULINO é engenheiro eletricitista 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