

Oliveira, L. M. R. e Cardoso, A. J. M.: "Parameters determination for the coupled electromagnetic transformer model, with particular reference to winding faults studies", 8º Congresso Luso Espanhol de Engenharia Electrotécnica (8 CLEEE), Vol. III, pp 6.333 6.338, Vilamoura, Portugal, 3-5 Julho, 2003.

Parameters determination for the coupled electromagnetic transformer model, with particular reference to winding faults studies

L. M. R. Oliveira ⁽¹⁾ A. J. Marques Cardoso ⁽²⁾

⁽¹⁾ Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve
Campus da Penha, P – 8000-117 Faro, Portugal
E-mail: lolivei@ualg.pt

⁽²⁾ Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Pólo II - Pinhal de Marrocos, P – 3030-290 Coimbra, Portugal
E-mail: ajmcardoso@ieee.org

Abstract

In the past few years, a considerable research effort has been devoted to the development of transformer digital models in order to simulate its behaviour under transient and abnormal operating conditions. Although many three-phase transformer models have been presented in the literature, there is a surprisingly lack of studies regarding the incorporation of winding faults. This paper presents a coupled electromagnetic transformer model for the study of winding inter-turn short-circuits. Particular attention will be given to the model parameters determination, for both healthy and faulty operating conditions. Experimental and simulation test results are presented in the paper, demonstrating the adequacy of the model as well as the methodologies for the parameters determination.

Palavras-chave: Transformadores; Modelação e Simulação; Avarias nos Enrolamentos; Determinação de Parâmetros.

1. Introdução

A modelação e simulação de transformadores de potência tem merecido a atenção de inúmeros investigadores, que pretendem obter uma representação precisa do seu funcionamento numa larga variedade de fenómenos que ocorrem em sistemas eléctricos de energia, sendo portanto vasta a literatura publicada neste domínio.

Relativamente ao tipo de aplicação, os modelos destinam-se, em elevada percentagem, ao estudo da ocorrência de fenómenos transitórios nas redes eléctricas (sobrecorrentes de ligação, comutação assíncrona de seccionadores, perturbações de origem atmosférica ou geomagnética, ferroressonância, etc.). Verifica-se, todavia, que existe uma escassez de trabalhos relativos ao estudo de modelação e simulação do funcionamento do transformador na ocorrência de avarias, particularmente no que se refere a falhas relativas a curtos-circuitos entre espiras. Para este tipo de estudos, torna-se necessário adoptar um modelo que permita manipular as ligações dos enrolamentos.

O modelo acoplado electromagneticamente baseia-se na análise simultânea e conjugada dos circuitos eléctrico e magnético equivalentes. O sistema magnético do transformador não é convertido para o seu dual eléctrico equivalente, permitindo definir e simular o funcionamento do transformador no domínio magnético, de modo a que as relações

causa-efeito possam ser investigadas de forma conveniente [1]. Este tipo de modelo, além de tomar em consideração a assimetria e não linearidade do núcleo magnético, possibilita também modificar, através de simples reformulações das equações do circuito eléctrico equivalente, o número de enrolamentos e as suas respectivas ligações, revelando-se a escolha natural para o estudo de avarias nos enrolamentos de transformadores.

2. Modelo acoplado electromagneticamente

O principal problema na modelação do sistema electromagnético de um transformador trifásico consiste em relacionar, de forma apropriada, as correntes nos enrolamentos com os fluxos no circuito magnético. Os fluxos encadeados totais, λ_t , estão relacionados com as correntes nos enrolamentos, \mathbf{I} , através da matriz de indutâncias, não-linear, \mathbf{L} :

$$\lambda_t = \mathbf{L} \times \mathbf{I} \quad (1)$$

Por outro lado, as relações entre as correntes e as tensões nos enrolamentos podem ser expressas, genericamente, na seguinte forma:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R} \times \mathbf{I} + \frac{d}{dt} \lambda_t \quad (2)$$

sendo \mathbf{R} a matriz diagonal das resistências dos enrolamentos.

O circuito magnético equivalente divide o sistema magnético em segmentos de densidade de fluxo aproximadamente uniforme, representados pelas permeâncias a escuro (não lineares) na Fig. 1(a). Esta divisão do circuito magnético é particularmente importante na análise de situações onde segmentos do núcleo possuem diferentes níveis de saturação. As permeâncias homopolares são também tomadas em consideração (P_{01} , P_{02} e P_{03} , na Fig. 1(a)). A análise do circuito magnético equivalente da Fig. 1(a) permite determinar a matriz de indutâncias que relaciona as correntes com os fluxos. Por sua vez, o circuito eléctrico equivalente, Fig. 1(b), estabelece as ligações dos enrolamentos, implícita em (2).

A estratégia para inserir as avarias no modelo consiste em dividir o enrolamento em falta em dois subenrolamentos, correspondentes às parcelas com e sem defeito. De facto, a ocorrência de um curto-circuito entre espiras, no enrolamento primário do transformador, representa uma situação análoga à do funcionamento de um autotransformador [2], cujo enrolamento primário corresponde ao enrolamento total da fase em defeito e cujo enrolamento secundário corresponde apenas à parcela do enrolamento em curto-circuito (Fig. 2(a)). Se a avaria ocorre no enrolamento secundário, as espiras em curto-circuito actuam como uma carga adicional (Fig. 2(b)). A resistência R_{sh} representa a impedância do defeito. O circuito equivalente da avaria é depois introduzido nos circuitos magnético e eléctrico equivalentes, conforme ilustrado na Fig. 3(a) e na Fig. 3(b), respectivamente [3] [4].

Para a validação experimental do modelo foi utilizado um transformador trifásico de três colunas, 6 kVA de potência nominal e quatro enrolamentos por coluna, com tensões nominais de 220/220/127/127 V. De forma a possibilitar a investigação da ocorrência de curtos-circuitos entre espiras, dois dos enrolamentos do transformador, por coluna, com classes de tensão distintas, são dotados de sete tomadas intermédias, conforme representado na Fig. 4, permitindo introduzir diferentes percentagens relativas ao número de espiras em curto-circuito e em diferentes posições dos enrolamentos.

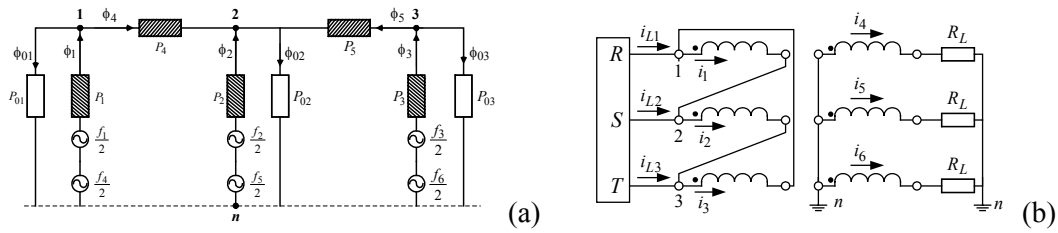


Fig. 1: Circuitos magnético (a) e eléctrico (b) equivalentes, para um transformador trifásico de três colunas e dois enrolamentos por coluna (ligação *Dyn5*).

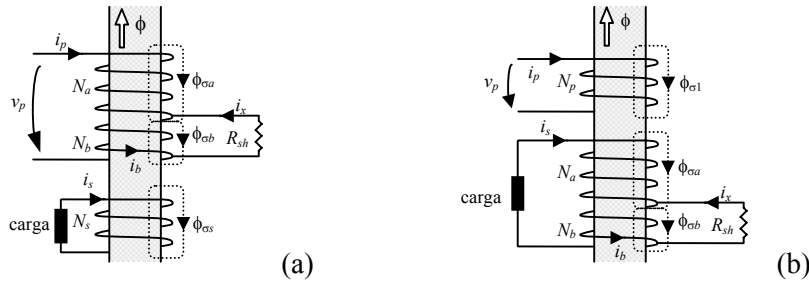


Fig. 2: Circuitos equivalentes para o caso da ocorrência de uma avaria no: (a) enrolamento primário; (b) enrolamento secundário.

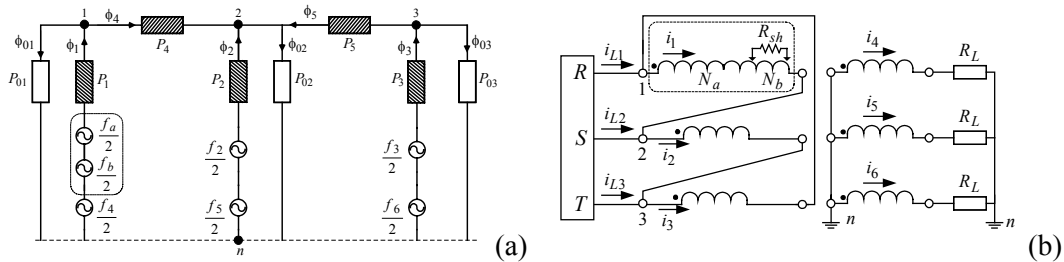


Fig. 3: Circuitos magnético (a) e eléctrico (b) equivalentes, para o caso de uma avaria no enrolamento primário (fase *R*).

3. Determinação de parâmetros

A precisão dos resultados de simulação depende fortemente da determinação de parâmetros. Estes podem ser classificados de acordo com a sua natureza linear ou não-linear.

3.1 Parâmetros lineares

As resistências dos enrolamentos e as indutâncias de fugas podem ser classificadas como parâmetros lineares. Para a sua determinação efectuou-se o ensaio em curto-circuito trifásico convencional. No entanto, a distribuição da indutância de curto-circuito nas indutâncias de fugas associadas a cada enrolamento é problemática, pois a tradicional divisão equitativa (em p.u.) poderá não constituir uma boa aproximação [5], sendo necessário investigar a validade da metodologia. Para o efeito efectuaram-se diversos ensaios monofásicos, utilizando, para cada um deles, dois enrolamentos com o mesmo número de espiras, ligados em oposição-série. Com esta abordagem, o fluxo comum aos dois enrolamentos é nulo. Os resultados obtidos permitem concluir que, para o transformador em estudo, a divisão equitativa da indutância de curto-circuito (em p.u.) pelos dois enrolamentos constitui uma boa aproximação.

De forma a manter um compromisso entre a complexidade e a precisão do modelo, optou-se por agrupar as componentes das perdas no ferro numa resistência linear, colocada

aos terminais dos enrolamentos alimentados. As resistências que modelam as perdas no ferro foram obtidas, por fase, através das perdas do ensaio em vazio trifásico convencional. No entanto, os resultados não devem ser directamente utilizados, pois a assimetria do circuito magnético influencia o desfasamento da corrente em relação ao fluxo, desvirtuando as leituras dos wattímetros, conforme demonstrado em [3]. As perdas medidas referentes à coluna central são as correctas, pois a assimetria do circuito magnético não influencia o desfasamento da corrente. Para determinar as resistências equivalentes de perdas no ferro referentes às colunas laterais efectuou-se a média das potências medidas para cada uma das colunas, distribuindo-as equitativamente por estas.

Para o caso do transformador trifásico de 3 colunas, também as permeâncias homopolares se podem considerar como parâmetros lineares, pois os fluxos homopolares fecham-se predominantemente pelo ar. O cálculo exacto das permeâncias homopolares é difícil, devido ao trajecto irregular seguido por cada fluxo homopolar. De maneira a permitir determinar estas permeâncias com a maior exactidão possível foi efectuado um ensaio homopolar, com os enrolamentos ligados em série, Fig. 5. A ligação do wattímetro foi efectuada de maneira a não ter em consideração as perdas nos enrolamentos e os valores de tensão foram medidos aos terminais dos enrolamentos em vazio, de forma a que os fluxos de fugas não influenciem os resultados.

3.2 Parâmetros não lineares: permeâncias do núcleo ferromagnético

As permeâncias do relativas ao material ferromagnético foram calculadas através da expressão tradicional: $P = \mu \cdot A_{fe} / l$, onde l , A_{fe} e μ representam o comprimento médio, a secção efectiva e permeabilidade do segmento do circuito magnético em consideração.

Para o cálculo da permeabilidade é necessário obter a característica $B-H$ do material ferromagnético. Para determinar a verdadeira curva $B-H$ do material ferromagnético torna-se necessário que todos os segmentos do circuito magnético tenham, de forma razoavelmente aproximada, o mesmo nível de saturação, ou seja o mesmo valor de fluxo magnético (pois as secções dos segmentos do circuito magnético são idênticas). Para o efeito, efectuaram-se as ligações dos enrolamentos ilustradas na Fig. 6(a). Com estas ligações dos enrolamentos, o fluxo na coluna central será aproximadamente nulo e os fluxos nas colunas laterais e nas travessas serão aproximadamente iguais e uniformes, para qualquer nível de saturação. As formas de onda da tensão e corrente resultantes foram depois adquiridas digitalmente, para um elevado nível de saturação, a partir das quais o ciclo de histerese do material foi obtido, Fig. 6(b). A curva de magnetização ideal, ou seja, a curva que se obteria se o material não possuísse perdas, foi depois determinada através da linha média do ciclo de histerese, Fig. 6(c). Para se obter a permeabilidade do material para qualquer valor de saturação, a curva ideal $B-H$ foi aproximada a uma função polinomial de 10ª ordem, Fig. 6(c).

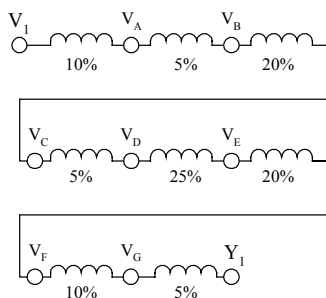


Fig. 4: Tomadas num enrolamento de 220 V.

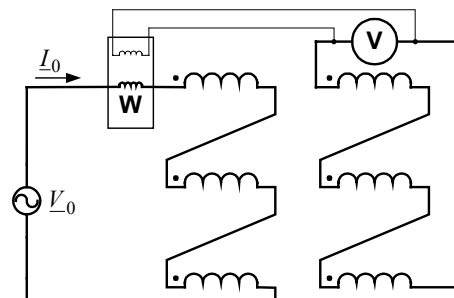


Fig. 5: Esquema para o ensaio homopolar.

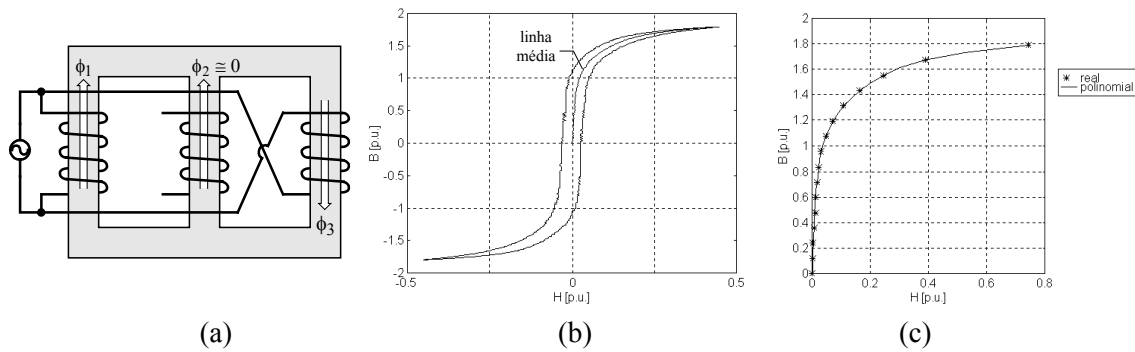


Fig. 6: (a) Esquema de ligações para obtenção de uma distribuição de fluxos uniforme no circuito magnético; (b) ciclo de histerese e linha média da característica $B-H$; (c) característica real do material ferromagnético e sua aproximação através de uma função polinomial.

3.3 Determinação dos parâmetros do modelo na ocorrência de avarias

Os únicos parâmetros adicionais necessários para introduzir as avarias no modelo, em relação ao caso de funcionamento normal do transformador, são o número de espiras em curto-circuito, as resistências e as indutâncias de fugas associadas a cada subenrolamento. A resistência dos subenrolamentos considerou-se aproximadamente proporcional ao seu número de espiras.

A localização do defeito ao longo de um enrolamento poderá afectar as indutâncias de fugas associadas a cada subenrolamento. No entanto, através de diversos ensaios experimentais, Fig. 7(a), verificou-se que não existem variações significativas das indutâncias de fugas com a localização do defeito, para o mesmo grau de severidade da avaria. Assim, as grandezas mensuráveis aos terminais do transformador não fornecem qualquer informação relativa à zona onde ocorre o defeito, razão pela qual se considerou que as indutâncias de fugas são independentes da localização das espiras em curto-circuito ao longo do enrolamento. Por outro lado, através da conjugação de resultados experimentais e da análise matemática do circuito eléctrico equivalente de um autotransformador, concluiu-se que as indutâncias de fugas referentes a cada subenrolamento variam proporcionalmente com o número de espiras deste, em relação à indutância de fugas da totalidade do enrolamento em defeito [3]. Como exemplo, ilustra-se na Fig. 7(b) os resultados obtidos quando se alimenta o enrolamento com N_1 espiras e se curto-circuita o subenrolamento b , para diversos valores de N_b . A impedância de curto-circuito resultante, Z_{1xcc} , pode determinar-se a partir da impedância de curto-circuito trifásica, $Z_{cc(3\Phi)}$, obtida para o caso do funcionamento normal do transformador [3]:

$$Z_{1xcc} = (N_1 - N_b) / N_b \times Z_{cc(3\Phi)} / 2 \quad (3)$$

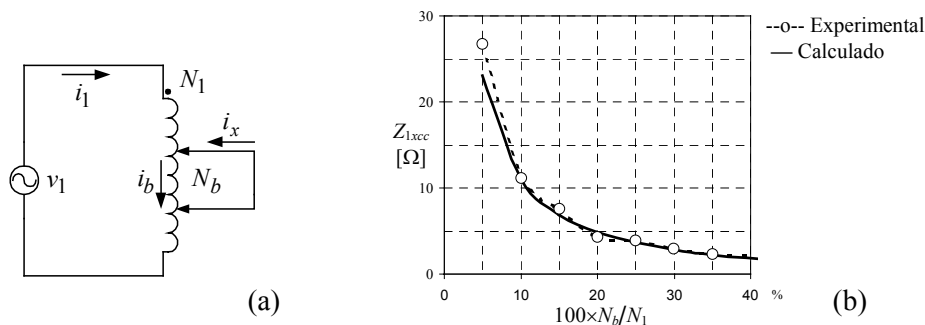


Fig. 7: (a) Ensaio em curto-circuito do autotransformador; (b) variação da impedância de curto-circuito, Z_{1xcc} , em função do número de espiras em curto-circuito.

4. Validação do modelo

Foram efectuados diversos ensaios laboratoriais, bem como as correspondentes simulações computacionais para várias ligações dos enrolamentos, em condições de funcionamento normal e em condições de avaria [3] [4]. Na Fig. 8(a) são ilustradas as formas de onda das correntes de alimentação do transformador, obtidas no ensaio com carga resistiva equilibrada, para a ligação *Dyn5* e 10% de espiras em curto-circuito no enrolamento primário da fase *R*. Os correspondentes resultados obtidos através da simulação computacional são ilustrados na Fig. 8(b), os quais se encontram em razoável concordância com os resultados experimentais.

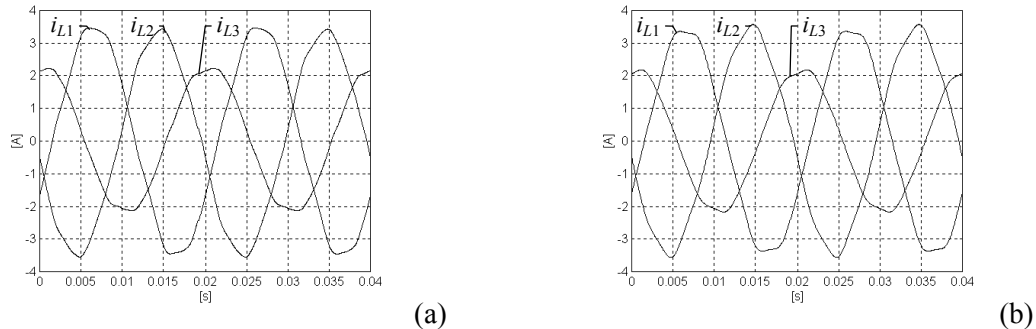


Fig. 8: Formas de onda das correntes de alimentação, obtidas no ensaio com carga resistiva equilibrada, para a ligação *Dyn5* e 10% de espiras em curto-circuito no enrolamento primário da fase *R*: (a) resultados experimentais; (b) resultados de simulação.

5. Conclusões

Este artigo descreve o desenvolvimento e implementação de um modelo computacional para simular o funcionamento de um transformador trifásico na ocorrência de curtos-circuitos entre espiras. Foram propostas metodologias para a determinação dos parâmetros do modelo. Os resultados obtidos através da simulação computacional, para diferentes ligações dos enrolamentos e para diversos graus de severidade da avaria, substanciam a validade das aproximações efectuadas, pois estes encontram-se, globalmente, em relativa concordância com os resultados experimentais.

Referências

- [1] R. Yakamini, H. Bronzeado, *Transformer inrush calculations using a coupled electromagnetic model*, IEE Proc. Sci. Meas. Technol., vol. 141, No. 6, pp. 491-498, November 1994.
- [2] S. A. Stigant, A. C. Franklin, *The J&P transformer book*, 10th Edition, Newnes-Butterworths, 1973, London.
- [3] L. M. R. Oliveira, *Desenvolvimento e implementação de um modelo computacional para o estudo de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos – Abordagem a um novo método de diagnóstico*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal, 2001.
- [4] L. M. R. Oliveira, A. J. M. Cardoso, *A coupled electromagnetic transformer model for the analysis of winding inter-turn short-circuits*, Record of the 2001 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, pp. 367-372, Grado, Italy, September 1-3, 2001.
- [5] M. Elleuch, M. Poloujadoff, *Three phase, three limb transformer model for switching transient calculations. Part I: Parameter definition and identification*, Acta Technica Csav, No. 1, pp. 100-117, 1988.