

Cardoso, A. J. M.; Oliveira, L. M. R.; Gameiro, N. S. e Veloso, P. M. M. G.: "Diagnóstico de avarias em transformadores trifásicos", *Anais da Engenharia e Tecnologia Electrotécnica*, No. 6, pp. 9-12, Março 1998.

DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

A. J. Marques Cardoso, Luís M. R. Oliveira, Natália S. Gameiro, Pedro M. M. G. Veloso

Sumário

Neste trabalho é apresentado um método de diagnóstico da ocorrência de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos, baseado na aplicação da Transformada Complexa Espacial (Vector de Park) da corrente eléctrica do primário e do secundário.

Incluem-se diversos resultados experimentais, obtidos através da utilização de um transformador especialmente concebido para o efeito, os quais demonstram as potencialidades do método proposto para o diagnóstico da ocorrência de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos em serviço.

1 Introdução

Tradicionalmente dominado por monopólios regionais ou nacionais, particularmente na Europa e nos EUA, o mercado de produção e distribuição de energia eléctrica tem vindo a sofrer, nos últimos anos, profundas alterações, face à crescente liberalização registada neste sector.

Nesta conjuntura, as empresas de produção e distribuição de energia eléctrica vêem-se confrontadas com a necessidade de garantir elevados padrões de fiabilidade e da qualidade do serviço prestado, bem assim como de reduzir os correspondentes custos, por forma a tornarem-se competitivas.

Constituindo os transformadores um dos componentes vitais dos sistemas de produção e distribuição de energia eléctrica, representando o respectivo mercado mundial um valor estimado de 11.85 biliões de dólares, a preços de 1995 [1], não admira, pois, que sobre eles recaiam grandes preocupações relativamente à sua manutenção e, conseqüentemente, ao desenvolvimento de métodos capazes de fornecerem um diagnóstico completo e viável do seu estado de funcionamento. Para o efeito, torna-se porém indispensável possuir um conhecimento detalhado acerca das avarias susceptíveis de ocorrerem nos transformadores, bem como dos mecanismos específicos que lhe estão subjacentes.

Resultante da necessidade sentida neste domínio, diversos estudos estatísticos tem sido desenvolvidos, de entre os quais se destacam os trabalhos da responsabilidade da CIGRE [2] e do IEEE [3]. Muito embora estes estudos se encontrem alicerçados em dados com características distintas, nomeadamente no respeitante ao tipo de aplicações de que provêm, torna-se ainda assim possível comparar alguns resultados que deles emergem.

Assim, tomando apenas os transformadores sem dis-

Abstract

This paper introduces a non-invasive approach for diagnosing winding faults in three-phase transformers, which is based on the on-line monitoring of the primary and secondary current Park's Vector.

Experimental results, obtained by using a special fault producing test rig, demonstrate the effectiveness of the proposed technique, for detecting inter-turn winding faults in operating three-phase transformers.

positivos de regulação de tensão em carga, não considerados nos estudos publicados pelo IEEE, conclui-se que predominam as avarias relativas aos enrolamentos, as quais representam, segundo os trabalhos de ambas as entidades, aproximadamente 30% do número total registado. Refira-se, ainda, que são as avarias relativas aos enrolamentos aquelas a que se encontram associados os maiores períodos de indisponibilidade dos transformadores.

Relativamente à identificação das principais causas da ocorrência de avarias, ambos os trabalhos referem os defeitos associados ao processo de fabrico dos diversos componentes bem como a manutenção inadequada, muito embora esta última assumida no estudo da CIGRE uma importância menos acentuada. A instalação em condições deficientes, bem como a execução imprópria dos testes de pré-arranque, constituem ainda outras das causas identificadas.

Como corolário, e à semelhança do que se verifica em relação a outro tipo de equipamentos, designadamente nos motores de indução trifásicos [4], poder-se-á também aqui afirmar que, para além da instalação e utilização correcta dos transformadores, áreas onde a normalização poderá desempenhar um papel relevante, a melhoria substancial da sua fiabilidade implica ainda o desenvolvimento de métodos de diagnóstico capazes não só de contribuir para um mais eficaz controlo de qualidade e dessa forma atenuar os defeitos de fabrico, mas também de proporcionar a implementação de estratégias de manutenção adequadas.

Vários métodos têm sido desenvolvidos com o propósito de fornecerem um diagnóstico completo e fiável a respeito da ocorrência de avarias em transformadores trifásicos. Métodos tais como os baseados na análise dos gases dissolvidos no óleo, na detecção eléctrica e/ou acústica de descargas parciais, ou ainda na análise termográfica, têm sido largamente uti-

lizados. Outros há, tais como os baseados na análise das vibrações, ou ainda do fluxo magnético de fugas, que são igualmente referidos na extensa bibliografia publicada neste domínio. De índole diferente dos métodos anteriormente referidos, distinguem-se também as estratégias de diagnóstico, não aplicáveis em serviço, baseadas na análise da resposta a impulsos de tensão (particularmente através da análise da função de transferência) ou ainda na análise da corrente de excitação.

Na sequência dos trabalhos anteriormente desenvolvidos, relativos à aplicação da Transformada Complexa Espacial (Vector de Park) no diagnóstico da ocorrência de avarias em motores de indução trifásicos, equipamentos de electrónica de potência, ou ainda em sistemas eléctricos de accionamento a velocidade variável [5], foi, mais recentemente, utilizada aquela estratégia também no domínio do diagnóstico da ocorrência de avarias em transformadores trifásicos.

Neste trabalho são apresentados diversos resultados experimentais, obtidos no âmbito do diagnóstico da ocorrência de curto-circuitos entre espiras nos enrolamentos de um transformador trifásico, relativos à aplicação do método baseado na monitorização da Transformada Complexa Espacial (Vector de Park) da corrente eléctrica do primário e do secundário.

2 Ensaios Laboratoriais

Na realização dos testes experimentais foi utilizado um transformador trifásico com três colunas, de 6 kVA, 220/127 V, dotado de dois enrolamentos por fase no primário e no secundário, dos quais, um de cada, dispõe de sete tomadas intermédias, conforme representado na Fig. 1, para o caso de uma das fases. Deste modo, torna-se assim possível a introdução de diferentes percentagens relativas ao número de espiras em curto-circuito e em diferentes posições dos enrolamentos.

O transformador foi inicialmente testado, na ausência de avarias, sob várias condições de carga e para diferentes tipos de ligação dos seus enrolamentos, de modo a caracterizar convenientemente a figura padrão correspondente ao Vector de Park da corrente eléctrica quer do primário quer do secundário.

Posteriormente, foram introduzidas diferentes percentagens relativas ao número de espiras em curto-circuito, procedendo-se à análise da representação correspondente ao Vector de Park da corrente eléctrica do primário e do secundário do transformador, em função da severidade da avaria e da sua localização. Para cada um dos ensaios de curto-circuitos realizados, foi utilizada uma resistência, cujo valor foi sucessivamente ajustado de modo a proporcionar um efeito suficientemente forte para ser facilmente visualizado, garantindo contudo, que não era ultrapassado o valor da corrente nominal do enrolamento, de

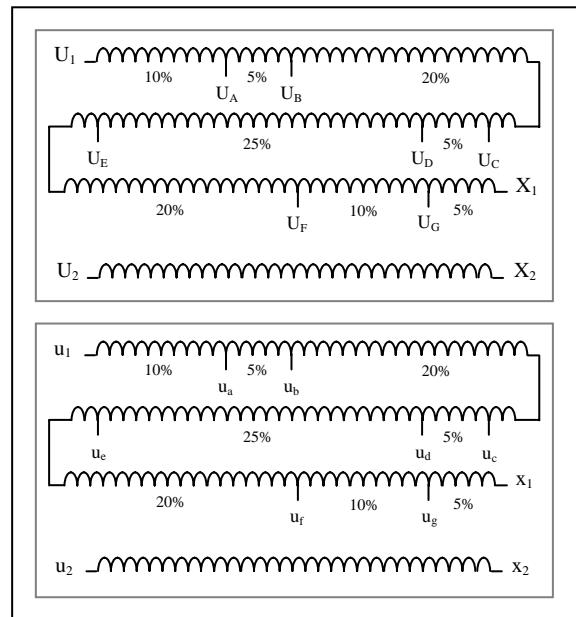


Fig. 1 - Representação correspondente aos enrolamentos do primário e do secundário, para uma das fases do transformador em estudo, com indicação das tomadas intermédias.

modo a proteger o transformador de uma avaria efectiva.

Na Fig. 2 encontra-se ilustrada a representação correspondente ao Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação do transformador utilizado nos ensaios laboratoriais, referente ao funcionamento normal, com uma carga resistiva equilibrada e para o caso da ligação Yy_6 dos seus enrolamentos. Esta representação assume uma forma ligeiramente diferente da representação circular característica de uma situação ideal, devido, entre outros, ao facto da corrente eléctrica correspondente à fase S do primário apresentar uma amplitude inferior à das fases R e T , decorrente da maior indutância do enrolamento da coluna central do transformador [6].

Para as mesmas condições de carga e de ligação dos enrolamentos do transformador, anteriormente referidas, a ocorrência de curto-circuitos entre espiras no enrolamento primário manifesta-se através da deformação da representação do Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação correspondente ao funcionamento normal, dando origem ao aparecimento de uma representação elíptica cuja elipticidade aumenta com a severidade da avaria (Fig. 2 e Fig. 3) e cuja orientação do eixo maior se encontra associada à fase em defeito (Fig. 4).

Com efeito, a ocorrência de um curto-circuito entre espiras, no enrolamento primário do transformador, representa uma situação análoga à do funcionamento de um auto-transformador [7], cujo enrolamento primário corresponde ao enrolamento total da fase em defeito e cujo enrolamento secundário corresponde apenas à parcela do enrolamento em curto-circuito, assumindo a resistência auxiliar de curto-circuito o

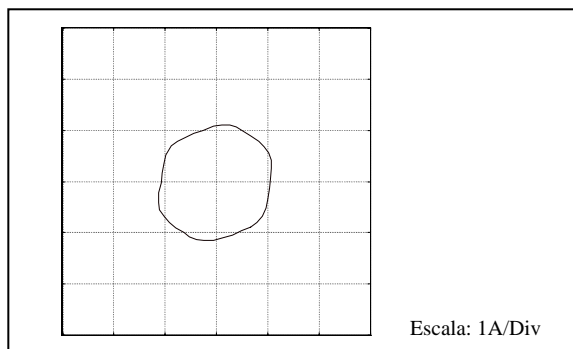


Fig. 2 - Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação do transformador em funcionamento normal.

papel de carga do referido auto-transformador. Deste modo, se explica o aumento da amplitude da corrente na fase que contém o curto-circuito e a sua dependência, quer da percentagem de espiras em curto-circuito, quer do valor da resistência auxiliar.

Relativamente à ocorrência de curto-circuitos entre espiras no enrolamento secundário do transformador, as manifestações observadas na representação correspondente ao Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação apresentam-se idênticas àquelas anteriormente registadas a respeito da ocorrência de curto-circuitos entre espiras no enrolamento primário, salvaguardadas quer a igualdade de condições de carga, quer de ligação dos enrolamentos do transformador.

Com efeito, a ocorrência de um curto-circuito entre espiras no enrolamento secundário do transformador, actua agora como uma carga adicional, ordinária, aplicada à fase em defeito [7]. Assim sendo, verificar-se-á, uma vez mais, um aumento da amplitude da corrente eléctrica na correspondente fase do primário, dependente também, quer da percentagem de espiras em curto-circuito, quer do valor da resistência auxiliar.

Para o mesmo grau de severidade da avaria, a representação correspondente ao Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação do transformador não

evidencia alterações significativas com a variação da posição do curto-circuito ao longo de um mesmo enrolamento.

Ensaio efectuados para diferentes tipos de ligação dos enrolamentos do transformador conduzem à obtenção de conclusões similares às anteriormente referidas, muito embora, por exemplo, para os casos das ligações do enrolamento primário em estrela ($Yy6$) e em triângulo ($Dy5$), as representações do Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação do transformador, correspondentes à ocorrência de curto-circuitos entre espiras, se apresentem globalmente desfasadas entre si de um ângulo de aproximadamente 30° [8].

Apesar da representação correspondente ao Vector de Park da corrente eléctrica no secundário do transformador não proporcionar qualquer indicação relativamente à ocorrência de curto-circuitos entre espiras dos enrolamentos primário e secundário, revela-se, no entanto, bastante eficaz na discriminação de situações envolvendo desequilíbrios na carga do transformador.

3 Conclusões

O trabalho desenvolvido demonstrou ser possível diagnosticar a ocorrência de curto-circuitos entre espiras dos enrolamentos de transformadores trifásicos em serviço, através da monitorização da Transformada Complexa Espacial (Vector de Park) da corrente eléctrica do primário e do secundário.

Com o objectivo, porém, de aprofundar algumas das questões suscitadas no âmbito da realização deste trabalho preliminar, encontram-se em desenvolvimento estudos relativos à modelização e correspondente simulação computacional do funcionamento de transformadores trifásicos, quando afectados pela ocorrência de avarias nos respectivos enrolamentos. Paralelamente, decorrem também estudos complementares, de natureza experimental, respeitantes ao refinamento do método proposto, com o objectivo de

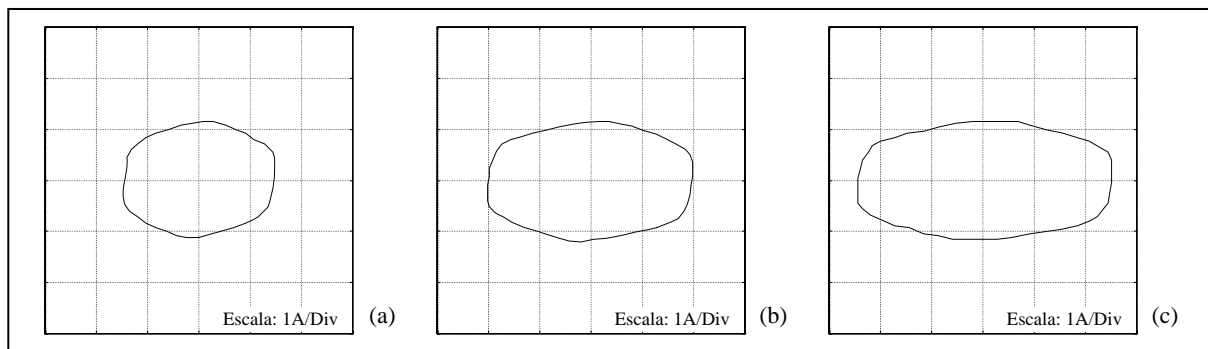


Fig. 3 - Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação do transformador, correspondente aos seguintes casos de funcionamento: (a) 5% de espiras em curto-circuito na fase R (U_A-U_B); (b) 10% de espiras em curto-circuito na fase R (U_1-U_A); (c) 15% de espiras em curto-circuito na fase R (U_1-U_B).

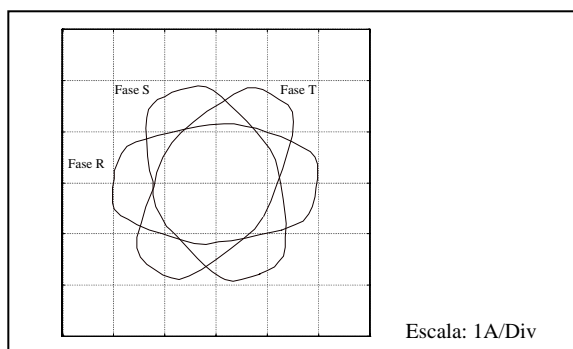


Fig. 4 - Representação comparativa do Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação do transformador, para o mesmo grau de severidade da avaria (10 % de espiras em curto-circuito) mas localizada em fases distintas.

proporcionar um diagnóstico o mais completo e fiável possível em relação à ocorrência de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos sujeitos a regimes de funcionamento desequilibrados, quer na carga quer na alimentação, ou ainda sob a influência de equipamentos de electrónica de potência.

Agradecimento

Os autores manifestam o seu agradecimento ao Eng.º Sérgio Cruz pela colaboração prestada, quer na fase de projecto do transformador utilizado, quer no acompanhamento dos respectivos ensaios laboratoriais.

Informação sobre os autores



António João Marques Cardoso nasceu em Coimbra em 1962. Licenciado e Doutorado em Engenharia Electrotécnica pela FCTUC em 1985 e 1995, respectivamente, é actualmente Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Electrotécnica da FCTUC e Director do Laboratório de Máquinas Eléctricas.



Luís Manuel Ramos de Oliveira nasceu em Coimbra em 1970. Licenciado em Engenharia Electrotécnica pela FCTUC em 1995, desempenha actualmente as funções de Equiparado a Assistente do 1º Triénio na EST-UAlg.



Natália dos Santos Gameiro nasceu em França em 1973. Licenciada em Engenharia Electrotécnica pela FCTUC em 1997, desempenha actualmente as funções de Equiparada a Assistente do 1º Triénio na ESTG-IPL.



Pedro Manuel Meco Girão Veloso nasceu em Coimbra em 1974. Licenciado em Engenharia Electrotécnica pela FCTUC em 1997, encontra-se actualmente a realizar um estágio profissional na EMEF.

Referências

- [1] Aubertin, S., "Opportunity knocks", International Power Generation, vol. 20, n.º 2, pp. 47-48, March 1997.
- [2] CIGRE/SC 12/WG 05, "An international survey on failures in large power transformers in service", Electra, n.º 88, pp. 21-48, May 1983.
- [3] IEEE Standard 493-1990, "IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems", chapter 3, 1990.
- [4] Cardoso, A. J. M., "Diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos", Coimbra, Coimbra Editora, 1991.
- [5] Cardoso, A. J. M., "The Park's Vector Approach: A general tool for diagnostics of electrical machines, power electronics and adjustable speed drives", Record of the 1997 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Carry-le-Rouet, France, pp. 261-269, September 1-3, 1997.
- [6] Oliveira, L. M. R., "Simulação do funcionamento de um transformador em ambiente PSPICE", Trabalho desenvolvido no âmbito da disciplina de Manutenção de Sistemas Electrónico-Mecânicos do Mestrado em Sistemas e Automação, DEE/FCTUC, Coimbra, 1996.
- [7] Stigant, S. A., Franklin, A. C., "The J & P Transformer Book", 10th Edition, London, Newnes-Butterworths, 1973.
- [8] Gameiro, N. S., Veloso, P. M. M. G., "Diagnóstico de avarias em transformadores trifásicos", Projecto de Licenciatura (Dissertação), DEE/FCTUC, Coimbra, 1997.