

Oliveira, L. M. R. e Cardoso, A. J. M.: "Diagnóstico de avarias de transformadores trifásicos em serviço através da análise do Vector de Park das correntes de excitação em carga", Livro de Comunicações do 7º Congresso Nacional de Manutenção, pp. 853-866, Viseu, Portugal, 10-12 Abril de 2002.

# DIAGNÓSTICO DE AVARIAS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EM SERVIÇO ATRAVÉS DA ANÁLISE DO VECTOR DE PARK DAS CORRENTES DE EXCITAÇÃO EM CARGA

Luís M. R. Oliveira<sup>(1) (2)</sup>      A. J. Marques Cardoso<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Pólo II - Pinhal de Marrocos, 3030-290 Coimbra  
Tel.: 239 796232, Fax: 239 796247, E-mail: ajmcardoso@ieec.org

<sup>(2)</sup> Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve  
Campus da Penha, 8000-117 Faro  
Tel.: 289 800100, Fax: 289 823539, E-mail: lolivei@ualg.pt

## 1. Introdução

Devido ao seu custo e importância estratégica, os transformadores de potência constituem um componente vital dos sistemas de produção, transmissão e distribuição de energia eléctrica. A sua fiabilidade constitui assim um factor crucial no funcionamento dos sistemas eléctricos de energia. Não admira, pois, que sobre estes equipamentos recaiam grandes preocupações relativamente à sua manutenção e, conseqüentemente, ao desenvolvimento de métodos capazes de fornecerem um diagnóstico completo e fiável 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 [1]. Resultante da necessidade sentida neste domínio, diversos estudos estatísticos de fiabilidade tem sido desenvolvidos, de entre os quais se destacam os trabalhos da responsabilidade da CIGRE [2] e do IEEE [3]. Da análise destes estudos conclui-se que predominam as avarias relativas aos enrolamentos, as quais representam cerca de 30% do número total registado (Fig.1). Refira-se, ainda, que são as avarias relativas aos enrolamentos aquelas a que se encontram associados os maiores períodos de indisponibilidade dos transformadores (Fig. 1). No que diz respeito às presumíveis causas da ocorrência de avarias, salientam-se os defeitos associados ao processo de fabrico bem como a manutenção inadequada. 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 correcta instalação e utilização dos transformadores, áreas

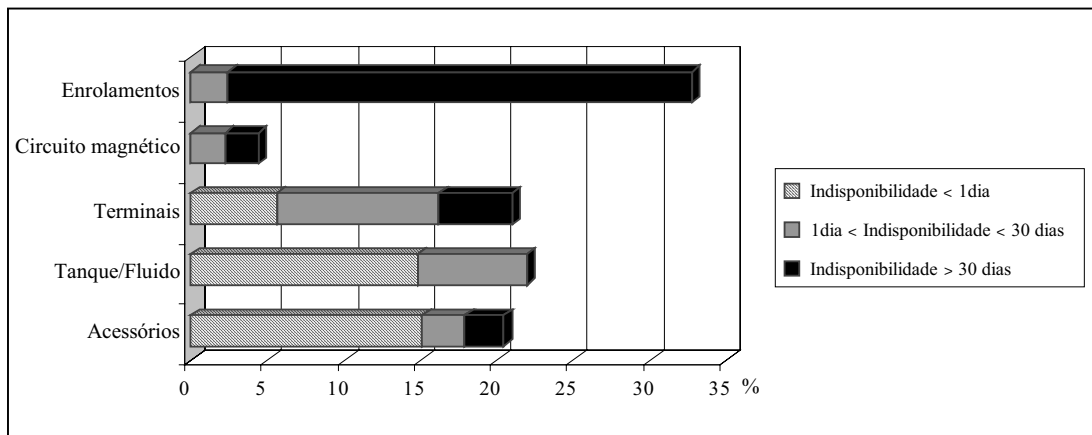


Fig. 1: Distribuição típica das avarias e correspondente período de indisponibilidade, para transformadores de subestações [2].

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 contribuírem para um mais eficaz controlo de qualidade e dessa forma atenuar os defeitos de fabrico, mas também de proporcionarem a implementação de estratégias de manutenção adequadas [1], [5].

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 utilizados. 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 do grau de polimerização.

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 [6], foi, posteriormente, utilizada aquela estratégia também no domínio do diagnóstico da ocorrência de espiras em curto-circuito nos enrolamentos de transformadores trifásicos [1], [5]. A estratégia então desenvolvida, que consistia, basicamente, na análise da representação do Vector de Park das

correntes de alimentação do transformador, revelou-se particularmente atractiva, devido não só à facilidade de interpretação dos dados, mas também ao seu carácter não invasivo, o que possibilita a sua implementação sem a interrupção do serviço do transformador. Nestes estudos preliminares, de natureza experimental, foram, no entanto, encontradas algumas dificuldades, quer no que concerne à aplicação da estratégia propriamente dita, designadamente no que diz respeito à obtenção de um diagnóstico fiável para o caso do transformador alimentar cargas trifásicas desequilibradas, quer no que se refere às limitações relativas ao transformador utilizado, tais como a salvaguarda da sua integridade física, bem como a impossibilidade de se introduzir um número arbitrário de espiras em curto-circuito. O aprofundamento do conhecimento neste domínio, que se reveste de primordial importância para o refinamento do método de diagnóstico proposto, implica assim uma análise mais detalhada sobre o funcionamento do transformador aquando da ocorrência de avarias, nomeadamente através da simulação computacional destes fenómenos.

Neste trabalho é apresentada uma nova estratégia, a qual consiste na análise da representação do Vector de Park das correntes de excitação em carga, as quais são praticamente independentes do regime de funcionamento do transformador. Incluem-se diversos resultados experimentais e de simulação computacional, os quais demonstram as potencialidades do método proposto para o diagnóstico da ocorrência de avarias nos enrolamentos de transformadores trifásicos em serviço.

## **2. Simulação experimental de ocorrência de espiras em curto-circuito**

A avaria nos enrolamentos do transformador para a qual é mais difícil providenciar protecção, é aquela que, inicialmente, envolve apenas um curto-circuito entre duas espiras. Com a deterioração do isolamento dos enrolamentos vai surgir um arco eléctrico entre as espiras, o que implica uma impedância de falha elevada e, conseqüentemente, uma corrente de defeito reduzida. A avaria vai então expandir-se, envolvendo sucessivamente um maior número de espiras, ou de camadas, aumentando a corrente e diminuindo a impedância de falha [7]. Um curto-circuito entre duas espiras poderá então resultar, inicialmente, numa corrente de entrada do enrolamento menor que a corrente de activação dos circuitos de protecção do transformador. De facto, o transformador só é desligado automaticamente da rede quando a avaria se expandiu a uma porção considerável do enrolamento afectado [8].

A ocorrência de um curto-circuito entre espiras, no enrolamento primário do

transformador, representa uma situação análoga à do funcionamento de um autotransformador [9], 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)).

Os ensaios experimentais foram efectuados recorrendo a 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. 3, permitindo introduzir diferentes percentagens relativas ao número de espiras em curto-circuito e em diferentes posições dos enrolamentos.

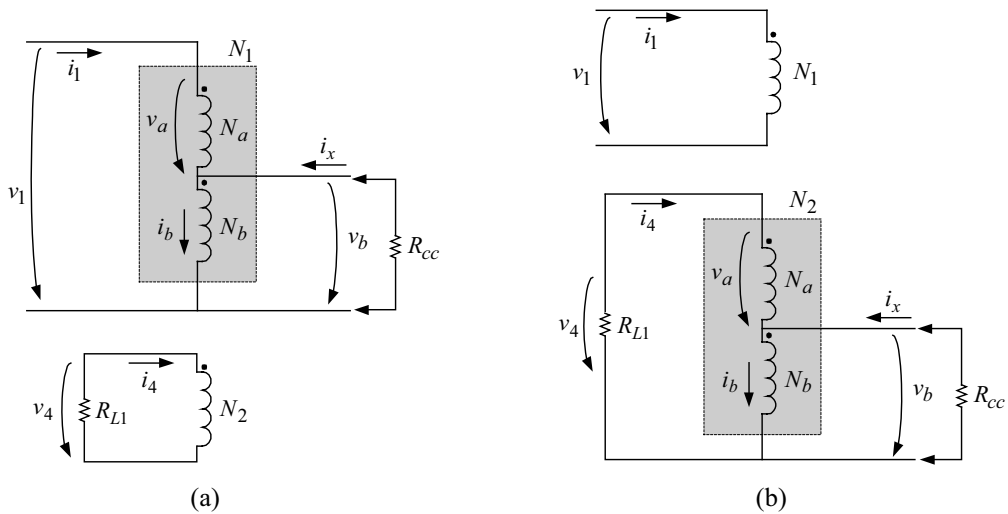


Fig. 2: Ocorrência de espiras em curto-circuito: (a) no enrolamento primário; (b) no enrolamento secundário.

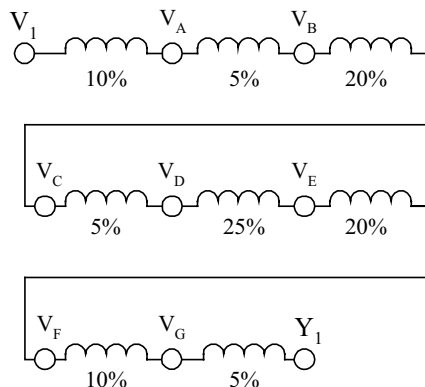


Fig. 3: Tomadas num enrolamento de 220 V.

Na realização dos ensaios experimentais utilizou-se uma resistência auxiliar,  $R_{cc}$ , para simular, de forma aproximada, a impedância de falha entre as espiras em defeito, que possui características predominantemente resistivas [10]. O valor da resistência 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 forma a proteger o transformador em estudo de uma avaria efectiva.

### 3. Modelação de espiras em curto-circuito [11, 12]

Para a simulação computacional do funcionamento do transformador foi utilizado um modelo acoplado electromagneticamente, o qual se baseia na análise combinada dos circuitos magnético e eléctrico equivalentes. O primeiro destes (Fig. 4) divide o sistema magnético em segmentos de densidade de fluxo aproximadamente uniforme, permitindo determinar a matriz de indutâncias que relaciona as correntes com os fluxos:

$$\lambda_t = L \cdot i \quad (1)$$

O circuito eléctrico equivalente (Fig. 5) estabelece as ligações eléctricas dos enrolamentos:

$$v = R \cdot i + \frac{d}{dt} \lambda_t \quad (2)$$

O modelo acoplado electromagneticamente do transformador obtém-se assim através da conjugação de (1) e (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, resultando na combinação dos circuitos equivalentes das Fig. 2, Fig. 4 e Fig. 5.

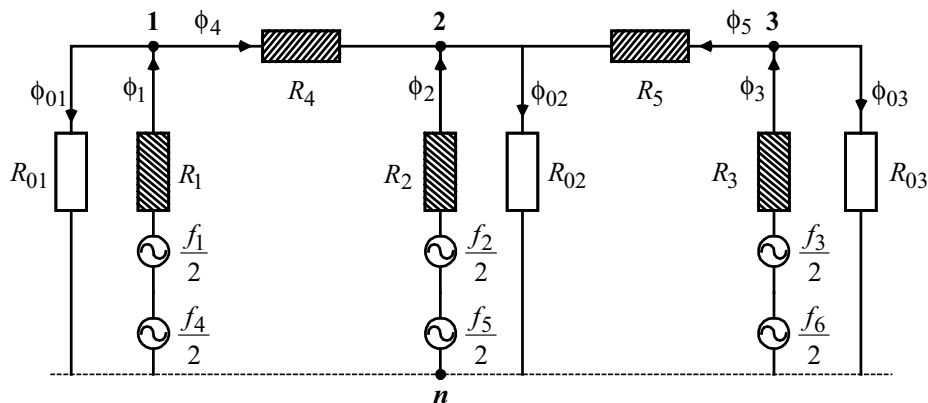


Fig. 4: Circuito magnético equivalente, assumindo simetria vertical do núcleo.

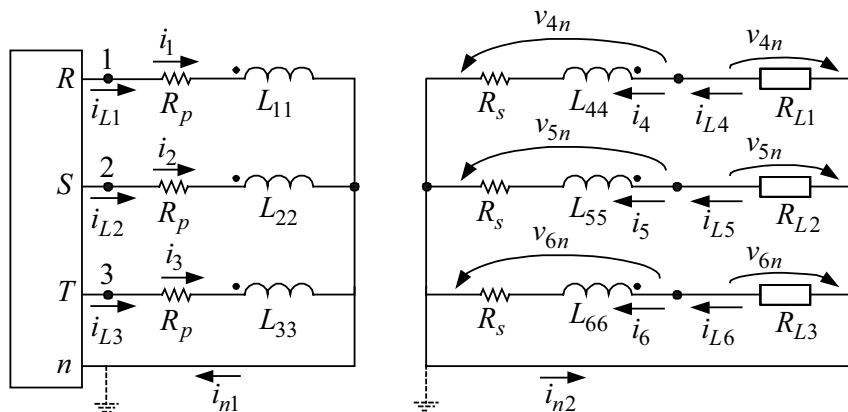


Fig. 5: Circuito eléctrico equivalente da ligação  $Ynyn0$ .

#### 4. Diagnóstico de avarias através do Vector de Park

Na Fig. 6 encontram-se ilustradas as representações correspondentes ao Vector de Park da corrente eléctrica de alimentação do transformador utilizado nos ensaios laboratoriais, referente ao funcionamento com ligação  $Ynyn0$  dos seus enrolamentos e carga resistiva equilibrada, para diversos valores do número de espiras em curto-circuito no lado primário e para diferentes localizações da fase em defeito. Verifica-se que a presença da avaria dá origem ao aparecimento de uma representação elíptica, cuja excentricidade aumenta com o grau de severidade da avaria e cuja orientação do eixo maior se encontra associada à fase em defeito.

Relativamente à ocorrência de curtos-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 curtos-circuitos entre espiras no enrolamento primário, salvaguardadas quer a igualdade de condições de carga, quer a ligação dos enrolamentos do transformador [1].

A representação do Vector de Park da corrente eléctrica no secundário do transformador não proporciona qualquer indicação relativamente à ocorrência de curtos-circuitos entre espiras dos enrolamentos primário e secundário, apesar de se revelar bastante eficaz na discriminação de situações envolvendo desequilíbrios na carga do transformador [1].

Este método de diagnóstico apresenta-se assim bastante atractivo, devido não só ao seu carácter não invasivo, mas também à facilidade de interpretação dos dados. No entanto, dado que a representação do Vector de Park da corrente de alimentação do transformador depende

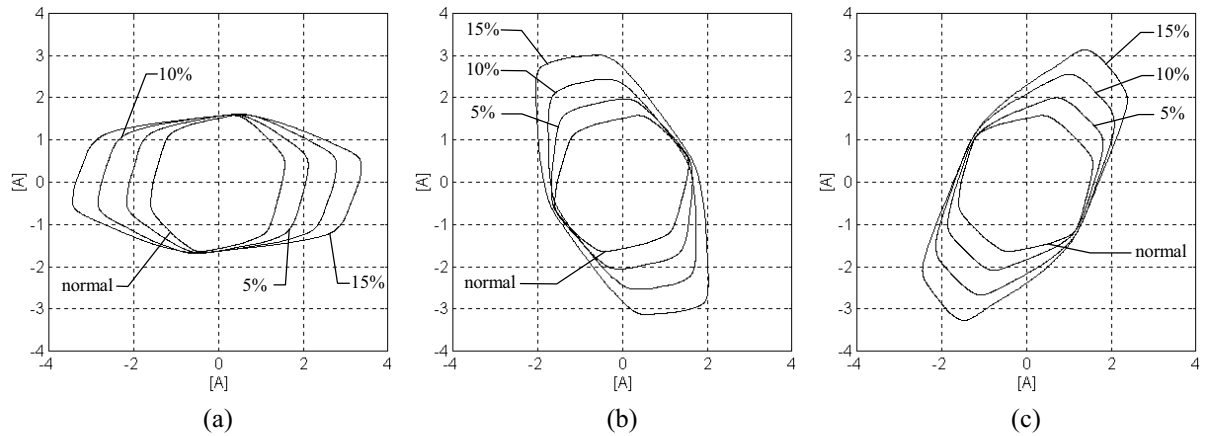


Fig. 6: Representações do Vector de Park da corrente no enrolamento primário, obtidas, experimentalmente, no ensaio com carga resistiva equilibrada, com ligação  $Ynyn0$ , para diferentes percentagens de espiras em curto-circuito no lado primário e para diferentes localizações na fase em defeito: (a) fase  $R$ ; (b) fase  $S$ ; (c) fase  $T$ .

das suas condições de carga, surgem algumas dificuldades na aplicação do método de diagnóstico, nomeadamente aquando da existência de cargas desequilibradas. Para exemplificar, considere-se o caso onde o transformador, com ligação  $Ynyn0$ , alimenta uma carga trifásica desequilibrada com  $R_{L1}=330 \Omega$ ,  $R_{L2}=91.4 \Omega$  e  $R_{L3}=92.2 \Omega$ . Adicionalmente, considere-se uma avaria com 5% de espiras em curto-circuito no enrolamento primário da fase  $R$ . As correspondentes representações do Vector de Park das correntes nos enrolamentos primário e secundário são apresentadas na Fig. 7(a). Verifica-se que não é possível identificar a avaria através da representação do Vector de Park da corrente no enrolamento primário, sendo necessário recorrer à representação do Vector de Park da corrente no enrolamento secundário para reconhecer que o transformador opera com um regime de carga desequilibrado. Consequentemente, o diagnóstico do transformador, apesar de possível, envolveria um elevado grau de complexidade, pois seria necessário comparar as representações do Vector de Park referentes à corrente no enrolamento primário e no enrolamento secundário.

Com o propósito de anular esta limitação, foi desenvolvida uma nova metodologia, baseada na representação do Vector de Park das correntes de excitação em carga. Estas correntes são obtidas somando as correntes nos enrolamentos primários com as respectivas correntes nos enrolamentos secundários, referidas ao lado primário, resultando, para o caso da ligação  $Ynyn0$  (Fig. 5):

$$i_{exc1} = i_{L1} + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_{L4} \quad (3a)$$



$$i_{exc2} = i_{L2} + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_{L5} \quad (3b)$$

$$i_{exc3} = i_{L3} + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_{L6} \quad (3c)$$

A correspondente representação do Vector de Park das correntes de excitação<sup>(1)</sup> é ilustrada na Fig. 7(b), a qual apresenta, uma vez mais, uma forma aproximadamente elíptica. Com esta metodologia, para além do regime de carga do transformador não influenciar, de forma significativa, as correntes de excitação, o diagnóstico torna-se também mais preciso, pois a representação do Vector de Park destas correntes realça a severidade do defeito.

Este facto é ainda mais evidente nas representações do Vector de Park das correntes de excitação da Fig. 8, referentes às condições de funcionamento apresentadas na Fig. 6. Na Fig. 9 são ilustrados os respectivos resultados de simulação computacional, que se encontram em razoável concordância com os resultados experimentais.

Globalmente, os resultados de simulação obtidos, nas mais diversas condições de funcionamento do transformador, possuem uma razoável concordância com os resultados experimentais. Este facto permite utilizar o modelo como uma ferramenta fiável para o estudo de fenómenos de difícil, ou mesmo impossível, implementação experimental. Como exemplo

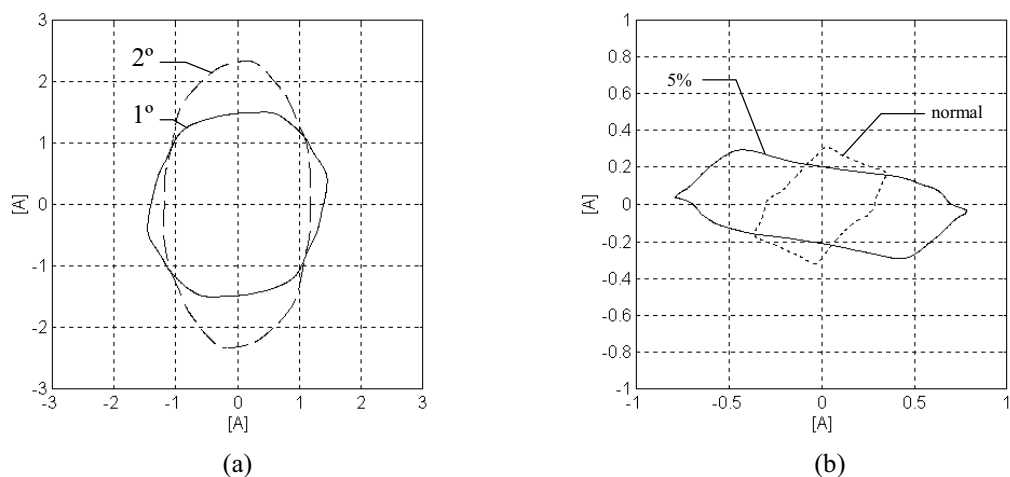


Fig. 7: Representações do Vector de Park: (a) das correntes no enrolamento primário (1º) e das correntes no enrolamento secundário (2º); (b) das correntes de excitação, obtidas no ensaio experimental com carga resistiva desequilibrada, para a ligação  $Ynyn0$  e 5% de espiras em curto-circuito no enrolamento primário da fase R.

<sup>(1)</sup> Devido à existência da avaria, estas correntes não são, obviamente, as correntes de excitação obtidas no ensaio em vazio, pois, na realidade existem duas forças magnetomotrizes distintas no enrolamento em defeito. Apesar disso, estas correntes continuarão, por facilidade de linguagem, a ser designadas por correntes de excitação.

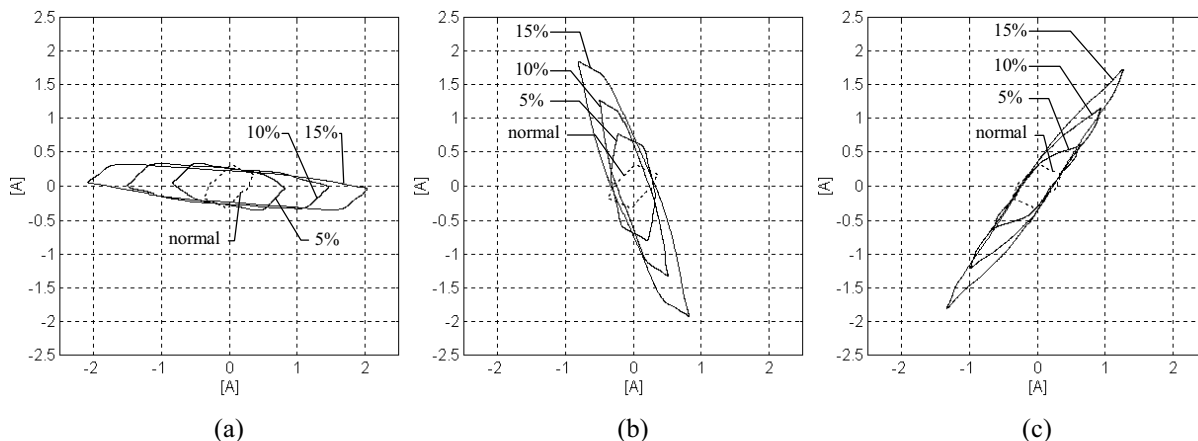


Fig. 8: Representações do Vector de Park da corrente de excitação, obtidas por via experimental, no ensaio com carga resistiva equilibrada, com ligação  $Y_{\eta}yn0$ , para diversas percentagens de espiras em curto-circuito no lado primário e para diferentes localizações na fase em defeito: (a) fase R; (b) fase S; (c) fase T.

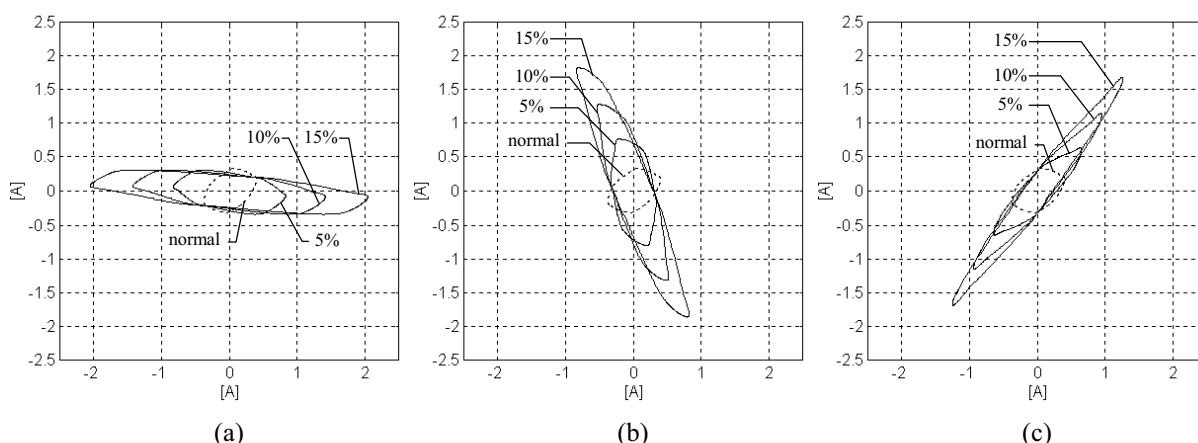


Fig. 9: Representações do Vector de Park da corrente de excitação, obtidas por via computacional, no ensaio com carga resistiva equilibrada, com ligação  $Y_{\eta}yn0$ , para diversas percentagens de espiras em curto-circuito no lado primário e para diferentes localizações na fase em defeito: (a) fase R; (b) fase S; (c) fase T.

considere-se, hipoteticamente, o caso de um curto-circuito entre duas espiras (0,9%) no enrolamento primário da fase R, quando o transformador, com ligações em  $Y_{\eta}yn0$ , opera aproximadamente com 80% da sua carga nominal (equilibrada). A representação do Vector de Park das correntes de excitação em carga (Fig.10) permite diagnosticar facilmente a avaria.

Quando o transformador possui os seus enrolamentos ligados em triângulo o cálculo das correntes de excitação não pode ser efectuado directamente. De facto, em ambiente industrial, o acesso aos condutores que formam a ligação em triângulo dos enrolamentos é usualmente difícil. Assim, as grandezas mensuráveis aos terminais do transformador serão as correntes de linha. No entanto, desprezando a componente homopolar que circula no interior do triângulo,

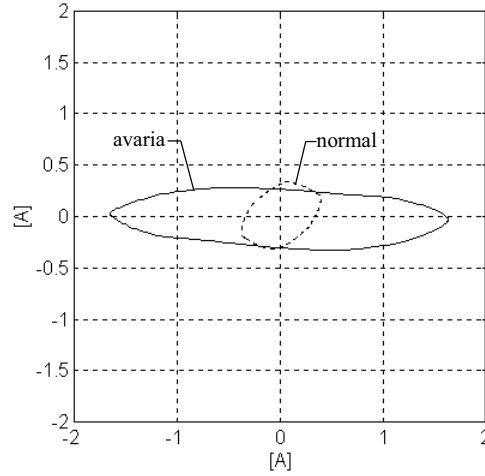


Fig. 10: Representação do Vector de Park da corrente de excitação em carga, obtida, por via computacional, no ensaio com carga resistiva equilibrada, para a ligação  $Y_{nyn0}$  e 2 espiras (0,9%) em curto-circuito no enrolamento primário da fase R.

as correntes de fase podem ser determinadas a partir das correntes de linha. Por outro lado, a componente homopolar das correntes de fase não influencia a correspondente representação do Vector de Park, pelo que a estrutura de base do método de diagnóstico não é afectada. Para o caso de uma ligação  $Dyn5$  (Fig. 11(a)), as correntes de excitação, referidas ao lado primário, podem ser expressas como:

$$i_{exc1} = \frac{1}{3}(i_{L1} - i_{L2}) + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_{L4} \quad (4a)$$

$$i_{exc2} = \frac{1}{3}(i_{L2} - i_{L3}) + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_{L5} \quad (4b)$$

$$i_{exc3} = \frac{1}{3}(i_{L3} - i_{L1}) + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_{L6} \quad (4c)$$

Para o caso da ligação  $Ynzn5$  (Fig. 11(b)), as correntes de excitação, referidas ao lado primário, podem ser calculadas utilizando uma metodologia semelhante, resultando:

$$i_{exc1} = i_{L1} + \frac{N_2}{N_1} \cdot (i_{L6} - i_{L4}) \quad (5a)$$

$$i_{exc2} = i_{L2} + \frac{N_2}{N_1} \cdot (i_{L4} - i_{L5}) \quad (5b)$$

$$i_{exc3} = i_{L3} + \frac{N_2}{N_1} \cdot (i_{L5} - i_{L6}) \quad (5c)$$

Torna-se assim possível aplicar o método de diagnóstico baseado na representação do Vector de Park das correntes de excitação em carga para as ligações mais comuns dos enrolamentos de transformadores trifásicos.

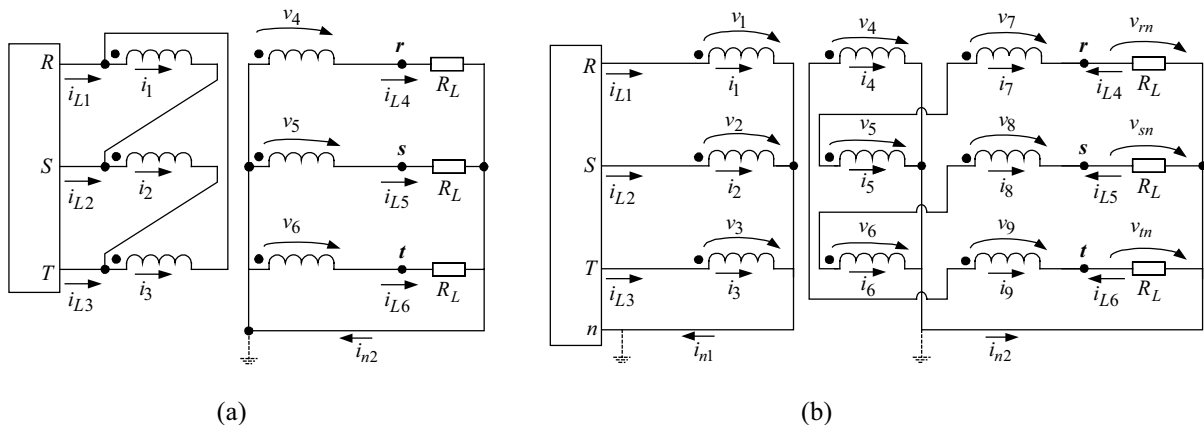


Fig. 11: Ligação dos enrolamentos: (a) *Dyn5*; (b) *Yzn5*.

## 5. Conclusões

O trabalho desenvolvido demonstrou ser possível diagnosticar a ocorrência de curtos-circuitos entre espiras dos enrolamentos de transformadores trifásicos em serviço, através da monitorização da Transformada Complexa Espacial (Vector de Park) das correntes de excitação em carga, as quais são praticamente independentes do regime de funcionamento do transformador. Estas correntes são obtidas somando as correntes nos enrolamentos primários com as respectivas correntes nos enrolamentos secundários, referidas ao lado primário, tendo em atenção as características próprias de cada tipo de ligação dos enrolamentos do transformador.

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

## Agradecimento

Os autores manifestam o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido, no âmbito deste trabalho, através do Projecto N° POSI/EEI/14151/98, bem como a colaboração prestada pelo Mestre Sérgio Cruz no desenvolvimento do método de diagnóstico.

## Referências

- [1] 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.
- [2] CIGRE/SC 12/WG 05: "An international survey on failures in large power transformers in service", *Electra*, No. 88, pp. 21-48, 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 Editora, 1991.
- [5] Cardoso, A. J. M. and Oliveira, L. M. R.: "Condition monitoring and diagnostics of power transformers"; *International Journal of COMADEM*, Vol. 2, Nº 3, pp. 5-11, July 1999.
- [6] 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, 1997.
- [7] Barkan, P.; Damsky, B. L.; Ettlinger, L. F. and Kotski, E. J.: "Overpressure phenomena in distribution transformers with low impedance faults: experiment and theory", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-95, No. 1, pp. 37-48, January/February 1976.
- [8] IEEE Standard C37.91-2000: "*IEEE guide for protective relay applications to power transformers*", IEEE, 2000.
- [9] Stigant, S. A. and Franklin, A. C.: "*The J&P Transformer Book*", 10<sup>th</sup> Edition, London, Newnes-Butterworths, 1973.
- [10] Lunsford, J. M. and Tobin, T. J.: "Detection of and protection for internal low-current winding faults in overhead distribution transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PWRD-12, No. 3, pp. 1241-1249, July 1997.
- [11] Oliveira, L. M. R. and Cardoso, A. J. M.: "Three-phase, three-limb, steady-state transformer model: The case of a *Yzn* connection"; Proceedings of the IASTED International Conference, "Power and Energy Systems", pp. 491-472, Marbella, Spain, September 2000.
- [12] Oliveira, L. M. R. and Cardoso, A. J. M.: "A coupled electromagnetic transformer model for the analysis of winding inter-turn short-circuits"; Record of the IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (IEEE SDEMPED'01), pp. 367-372, Grado, Italy, September 2001.