

DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR ELETROMAGNÉTICO DE 3 PARA 5 FASES

GIANCARLO SOUZA, LUÍS A. PEREIRA, SÉRGIO HAFFNER

*Departamento de Engenharia Elétrica, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 103, CEP 90035-190, Porto Alegre, RS*

E-mails: gian.souza@gmail.com, lpereira@ufrgs.br, slhaffner@gmail.com

Abstract— The paper addresses the development and tests of an electromagnetic device to convert a three-phase system into a five-phase system, being several known configurations assessed which use different types of connection. A prototype is presented which was designed and built considering aspects such as the secondary voltage balance under load, material utilization rate, and the easiness to connect the windings. In addition, a model based on resistances, self and mutual inductances is presented, which were calculated considering magnetic paths through the air surrounding the coils, as well paths through the magnetic core. The model was implemented on the package Micro-Cap and the performance of the device concerning voltage balance was evaluated assuming a resistive load on the secondary side. Further, the performance under fault (opening of one phase) on the secondary side was also evaluated. The secondary voltages also showed an acceptable unbalance level when feeding a five-phase machine working with an open phase. The simulation results were compared with corresponding test results and a very good agreement was observed, as the voltage on the secondary side remained within an acceptable range. The practical and theoretical results prove that the device performs well and is adequate for the designed purpose.

Keywords— five-phase transformer, electromagnetic phase converter, high-phase electromagnetic device, voltage balance under load.

Resumo— O artigo aborda o desenvolvimento e testes de um conversor eletromagnético de 3 para 5 fases, sendo avaliadas configurações conhecidas com vários tipos de ligações. É apresentado o projeto e construção de um protótipo considerando aspectos como equilíbrio de tensão nos secundários sob carga, aproveitamento do material dos enrolamentos e do núcleo, assim como a facilidade de conexão dos enrolamentos. É também apresentado um modelo baseado em resistências e indutâncias próprias e mútuas, para as quais caminhos de fluxo magnético através do núcleo de aço silício e também através do ar em torno dos enrolamentos foram considerados. O modelo desenvolvido foi implementado no software Micro-Cap, tendo sido avaliado o equilíbrio nas tensões de saída do conversor sob carga resistiva, além de avaliar seu comportamento diante de falhas (abertura) de uma das fases da carga dos secundários. Utilizando um motor de indução pentafásico como carga no secundário, as tensões nos secundários também apresentaram níveis aceitáveis de desequilíbrio, mesmo na operação sob falha em uma das fases da carga e independente da conexão dos enrolamentos primários. Os resultados das simulações foram comparados com os ensaios realizados no protótipo, tendo sido observada uma boa concordância entre ambos, mantendo as tensões nos secundários dentro de níveis aceitáveis de desequilíbrio. Os resultados práticos e teóricos mostram a adequação e boa performance do dispositivo para o que ele foi proposto.

Palavras-chave— transformador pentafásico, conversor eletromagnético de fases, equilíbrio de tensão sob carga.

1 Introdução

Sistemas multifásicos, com mais de 3 fases, são estudados há várias décadas (Iqbal *et al.*, 2010; Tiwari *et al.*, 1992). O emprego desses sistemas em máquinas, por exemplo, melhora o aproveitamento do material ativo (enrolamento e núcleo) e, por possuir mais do que 3 fases, são inerentemente tolerantes a falhas, mesmo considerando um menor desempenho sob carga (Mohammad and Fletcher, 2010; Parsa, 2005). Uma vez que normalmente apenas a rede trifásica está disponível, torna-se necessário desenvolver sistemas de transformação estática de fases para obter o fornecimento de múltiplas fases (Iqbal *et al.*, 2010), caso se deseje acionar equipamentos com mais de 3 fases diretamente da rede. Além disso, uma aplicação também interessante é no ensaio de máquinas multifásicas a fim de avaliar seu desempenho, onde é necessária uma alimentação senoidal (Krause, 1986).

Este artigo aborda a construção e testes de um protótipo de conversor eletromagnético de 3 para 5 fases, o qual consiste basicamente de uma estrutura semelhante a de um transformador convencional, porém com conexões diferentes entre os vários enrolamentos, conforme descrito na Seção 2. Os ensaios foram realizados com carga resistiva e com um motor de indução

pentafásico. É avaliado o equilíbrio das tensões e correntes na saída do conversor sob carga e, principalmente, diante de falhas (abertura) de uma das fases da carga dos secundários. Também é desenvolvido um modelo para simulações, sendo seus resultados confrontados com os ensaios do protótipo.

2 Conversor Eletromagnético de Fases

A ideia de um sistema passivo de conversão multifases tem origem nos anos 50, onde a teoria geral da transformação de m fases para n fases através do uso de transformadores foi apresentada (Parton, 1952; Parton and Chant, 1971). Trabalhos mais recentes utilizam a mesma ideia para desenvolver um conversor de 3 para 5 fases (El-kahel *et al.*, 1995-1996; Iqbal *et al.*, 2010) ou de 3 para 7 fases (El-kahel *et al.*, 1995-1996; Moinoddin *et al.*, 2012), porém nestes trabalhos não há a preocupação com o equilíbrio de tensão quando da ocorrência de faltas, onde apenas 4 das 5 fases continuam conectadas a carga.

A escolha da conexão primária e secundária interfere no equilíbrio de tensão e corrente, dependendo da construção adotada para o transformador e define a quantidade de enrolamentos e seus respectivos valores de tensão.

No que se segue são apresentadas algumas das topologias possíveis, com o intuito de descrever as possibilidades de escolha para o desenvolvimento do projeto do protótipo. Nestas topologias é utilizada a soma fasorial de tensões produzidas pelos enrolamentos de saída do transformador. Baseada na ligação Scott, que permite a conversão de 3 para 2 fases ou vice-versa, uma das topologias é proposta utilizando apenas 2 transformadores monofásicos (Abdel-Khalik *et al.*, 2013). A Fig. 1 mostra o diagrama fasorial dos enrolamentos secundários para obter uma saída com 5 fases.

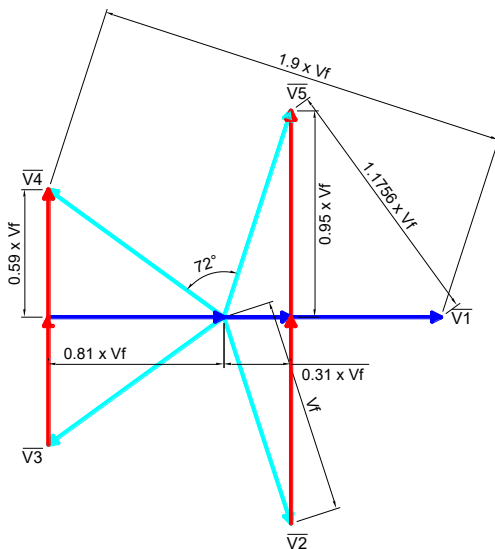


Figura 1. Diagrama fasorial dos secundários dos 2 transformadores

Os fasores azuis claro representam as tensões obtidas pela soma fasorial de 2 bobinas, oriundos de cada um dos 2 transformadores. Uma única tensão de fase ($\bar{V}_1$) é gerada pela relação direta de espiras do primário para com o secundário de um dos transformadores e não depende de uma soma fasorial. As cores azul escuro e vermelho representam as tensões geradas nos secundários dos 2 transformadores, com os ângulos de 0° e 90° , respectivamente, gerados pela ligação dos enrolamentos primários, que é alimentada pelo sistema trifásico convencional.

Outra topologia propõe a utilização de um transformador trifásico ou 3 transformadores monofásicos (Iqbal *et al.*, 2010). A Fig. 2 ilustra o diagrama fasorial dos enrolamentos secundários em zig-zag.

As cores azul escuro, vermelho e magenta, representam as fases do sistema trifásico de 0° , 120° e 240° , respectivamente. Os fasores azuis claro representam as tensões de fase (V_f) obtidas pela soma fasorial de 2 bobinas secundárias adjacentes, ou seja, que não estão na mesma fase. Uma única tensão de fase ($\bar{V}_1$) é gerada pela relação direta de espiras do primário para com o secundário.

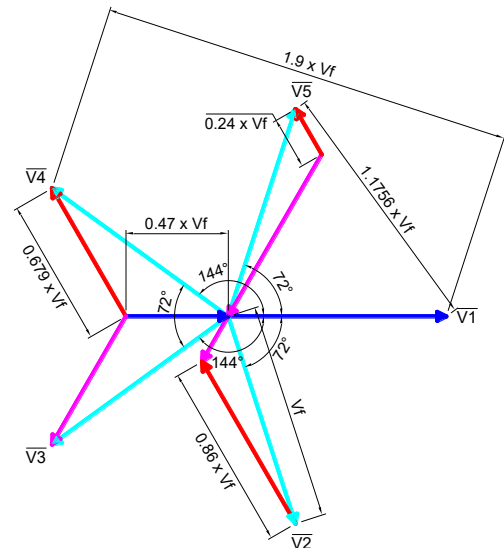


Figura 2. Diagrama fasorial dos secundários em zig-zag

Com o intuito de equilibrar as correntes de fase do primário, eliminando as correntes de sequência zero, é necessário modificar a obtenção da tensão secundária ($\bar{V}_1$), adicionando mais 2 enrolamentos de compensação em cada uma das colunas (El-kahel *et al.*, 1995). A Fig. 3 apresenta as conexões dos enrolamentos secundários em zig-zag com os 2 enrolamentos de compensação e a Fig. 4 mostra o diagrama fasorial correspondente.

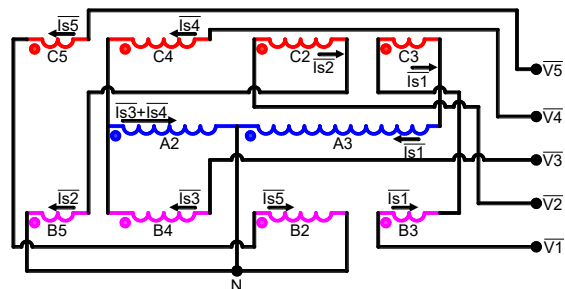


Figura 3. Conexão dos enrolamentos secundários em zig-zag

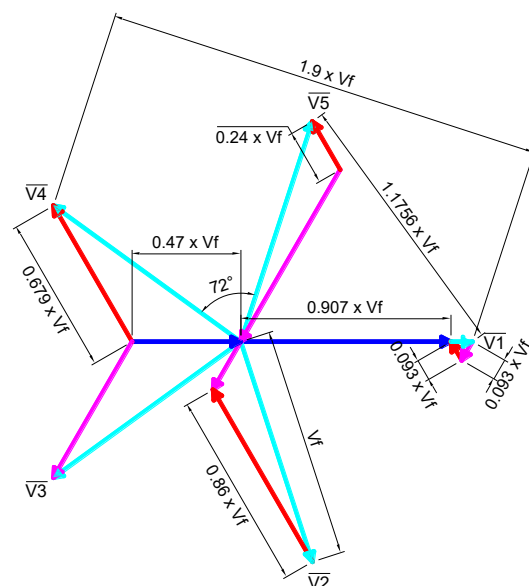


Figura 4. Diagrama fasorial modificado em zig-zag

Para a topologia apresentada na Fig. 4, ocorre o equilíbrio de tensão (linha e fase) e de corrente (linha e fase), tanto no primário como no secundário, com cargas equilibradas ou não, para as seguintes conexões: primário em delta ou estrela com secundário em zig-zag ou delta (El-kahel *et al.*, 1995).

Considerando as topologias encontradas, decidiu-se pela construção utilizando um transformador de 3 colunas com enrolamentos de compensação (El-kahel *et al.*, 1995), que além de oferecer o equilíbrio de tensão e corrente pretendidos, permite a análise entre cada uma das possíveis conexões e, principalmente, possibilita o acréscimo de uma ligação zig-zag ao primário do conversor.

3 Protótipo do Conversor

Tendo em vista a utilização do protótipo do conversor para alimentar cargas diversas, incluindo máquinas elétricas, em especial, um motor de indução pentafásico com potência de 5,5 kW e com tensão de fase de 220 V, foi projetado um transformador com potência de 10 kVA, frequência de 60 Hz, com tensão de linha primária de 220/254/380 V (estrela, delta ou zig-zag) e tensão de fase secundária de 220 V em zig-zag. O transformador foi montado em um núcleo de 3 colunas, conforme já descrito anteriormente.

A Tabela 1 apresenta os valores da relação de espiras dos enrolamentos secundários do protótipo calculado relacionado à tensão nominal de fase do secundário. Os enrolamentos representados por A1, B1 e C1, descritos no decorrer deste artigo, possuem magnitude de 254 V e definem as tensões de fase do enrolamento primário conectados em delta. Os nomes dos enrolamentos descritos na Tabela 1 correspondem aos ilustrados na Fig. 3.

Tabela 1. Relação de Espiras do Protótipo.

Coluna	Relação de espiras do secundário em zig-zag				
Vermelho	C2: 0,859	C3: 0,094	C4: 0,678	C5: 0,242	
Azul	A2: 0,47		A3: 0,906		
Magenta	B2: 0,859	B3: 0,094	B4: 0,678	B5: 0,242	

Considerando o valor da tensão por espira do protótipo, as magnitudes das tensões nos secundários são: 220,06 V para $\overline{V1}$; 220,5 V para $\overline{V2}$ e $\overline{V5}$ e de 219,92 V para $\overline{V3}$ e $\overline{V4}$. Os desvios entre estes valores e a tensão nominal de 220 V são desprezíveis e estão dentro dos limites de $\pm 0,5\%$ prescrito na norma (ABNT NBR 5356-11, 2016) para os ensaios de relação de tensão.

Baseado em circuitos indutivos acoplados magneticamente, representados por indutâncias mútuas entre os indutores, foi desenvolvido um modelo para o protótipo do conversor, considerando para cada um dos 13 enrolamentos presentes nas três colunas do transformador o surgimento de 12 indutâncias mútuas, totalizando 156 acoplamentos entre os enrolamentos, ou 78 acoplamentos quando considerada a repetição das indutâncias mútuas entre os mesmos enrolamentos. Para o modelo, foram calculadas as indutâncias próprias de todos os 10 enrolamentos secundários e também dos 3 enrolamentos que compõem o primário

do transformador, as resistências ôhmicas dos mesmos, assim como as indutâncias mútuas entre todos os enrolamentos, além de incluir as indutâncias de dispersão no ar.

Os métodos clássicos para o cálculo da dispersão no ar (Martignoni, 1991; Ries, 2007), são de difícil aplicação neste caso, visto que não ocorre a simetria na construção das bobinas de cada uma das colunas do transformador como em um transformador trifásico convencional. A quantidade de espiras e de enrolamentos diferentes entre cada uma das colunas do transformador e sua distribuição ao longo da janela também prejudica a aplicação dos cálculos clássicos de dispersão. Assim, foram feitas simplificações para o cálculo da distribuição dos fluxos, uma vez que é considerada corrente em apenas um enrolamento de cada vez. Também são consideradas regiões fictícias para a dispersão no ar, uma vez que o cálculo das indutâncias de dispersão seria inviável se considerada corrente simultânea em todos os enrolamentos existentes do transformador.

Para o referido cálculo da indutância de dispersão, foi adotado que em cada bobina existem 2 áreas às quais são percorridas pelo fluxo disperso gerado tanto pelos enrolamentos do primário, como pelos enrolamentos secundários. A Fig. 5 mostra a vista superior de uma das bobinas e apresenta as áreas adotadas para a dispersão do fluxo quando considerada corrente em um dos enrolamentos do primário.

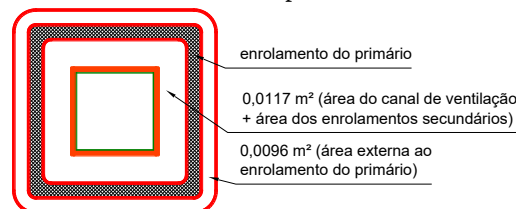


Figura 5. Área do fluxo disperso para corrente no primário

A Fig. 6 apresenta as áreas adotadas para a dispersão do fluxo quando considerada corrente em um dos enrolamentos secundários.

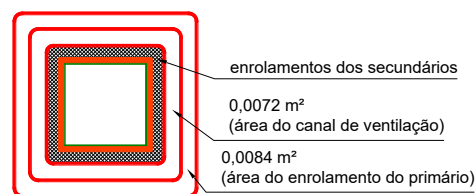


Figura 6. Área do fluxo disperso para corrente no secundário

Uma vez definidos os caminhos e as áreas para a distribuição dos fluxos magnéticos, foram calculados os fluxos para cada uma das 3 colunas do transformador e também para o fluxo disperso pelo ar, existindo sempre 3 caminhos fechados, conforme ilustrado na Fig. 7. Ela exemplifica o modelo utilizado para o cálculo dos fluxos em cada uma das 3 colunas (la, lc, lf) do transformador e também pelo ar (lk), quando considerada corrente em apenas um dos enrolamentos da coluna B de cada vez. Os símbolos ($\cdot$ e $\times$), visualizados em cada enrolamento da Fig. 7, representam respecti-

vamente a saída e a entrada da corrente no plano, considerando as ligações entre os enrolamentos do transformador.

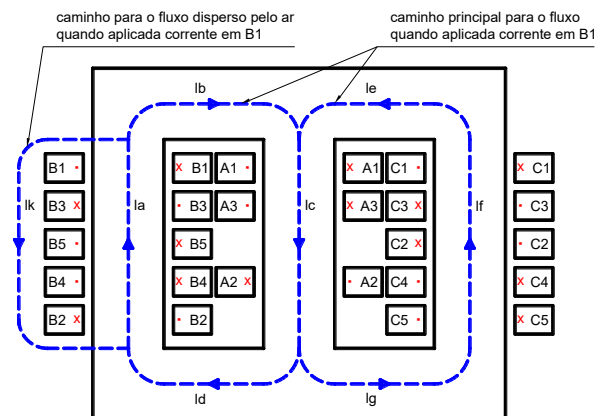


Figura 7. Fluxos com corrente nos enrolamentos da coluna B

Utilizando os caminhos adotados para o fluxo magnético, foram calculados os fluxos em cada caminho, considerando corrente em apenas um dos enrolamentos de cada vez. Com os valores dos fluxos de cada coluna foram calculadas as indutâncias próprias e mútuas, além das indutâncias de dispersão pelo ar. Com os comprimentos médios e a seção dos fios utilizados nos enrolamentos foram calculadas as resistências. A Tabela 2 apresenta os valores calculados das indutâncias próprias e as indutâncias de dispersão de cada enrolamento, assim como os valores das resistências ôhmicas.

Tabela 2. Indutâncias próprias, de dispersão e resistências.

Enrolamento	A1	A2	A3
Indutância Própria (H)	1,146	0,190	0,706
Indut. Dispersão (H)	$1,87 \times 10^{-3}$	$2,27 \times 10^{-4}$	$8,46 \times 10^{-4}$
Resistência à 130 °C (Ω)	0,491	0,097	0,394
Enrolamento	B1 e C1	B2 e C2	B3 e C3
Indutância Própria (H)	0,837	0,464	0,005
Indut. Dispersão (H)	$2,34 \times 10^{-3}$	$9,49 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-5}$
Resistência à 130 °C (Ω)	0,494	0,356	0,039
Enrolamento	B4 e C4	B5 e C5	
Indutância Própria (H)	0,289	0,037	
Indut. Dispersão (H)	$5,91 \times 10^{-4}$	$7,51 \times 10^{-5}$	
Resistência à 130 °C (Ω)	0,296	0,106	

Os valores das indutâncias mútuas entre cada um dos enrolamentos podem ser representados através do acoplamento magnético entre as indutâncias, sendo este valor compreendido entre 0 e 1, sendo 0 para nenhum acoplamento e 1 para máximo acoplamento magnético. De posse dos valores das indutâncias próprias e suas respectivas indutâncias mútuas entre os demais enrolamentos, foram calculados todos os 58 acoplamentos magnéticos.

Com todos os valores calculados, montou-se o circuito elétrico no software Micro-Cap e realizou-se as simulações computacionais com carga resistiva para a comparação com os ensaios do protótipo. A fim de limitar o escopo não são apresentados resultados relativos à simulação com o motor de indução, uma vez que seria necessário também considerar o seu modelo de circuito.

4 Simulações e Ensaios do Conversor

Foram realizados ensaios com carga resistiva e também com um motor de indução pentafásico. Na simulação e ensaio do conversor com carga resistiva foi avaliado o desvio entre os valores obtidos da simulação e do ensaio e, principalmente, o equilíbrio de tensão em cada fase do secundário diante da abertura de uma das fases da carga. Para tal, cada fase da carga foi composta por 5 resistências em paralelo, sendo 2 resistências de 80 Ω e 3 resistências de 500 Ω , totalizando uma resistência equivalente de 32,26 Ω , limitada à corrente de 6,2 A e, portanto, a uma tensão de 200 V. A carga foi conectada em estrela com o neutro flutuante, sendo cada fase da carga conectada a uma das saídas do transformador. Em virtude da limitação de corrente dos resistores utilizados, no decorrer dos ensaios a tensão aplicada ao primário do transformador sofreu alterações visando não ultrapassar a corrente máxima da carga. A Fig. 8 mostra os valores das tensões nos secundários alimentado os resistores obtidos através do ensaio e da simulação e apresenta o desvio para cada secundário.

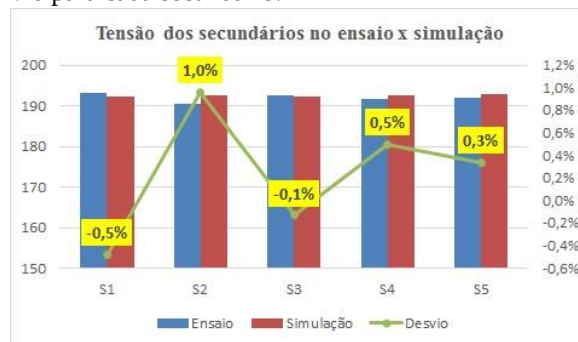


Figura 8. Tensão dos secundários no ensaio x simulação

Da mesma forma, a Fig. 9 apresenta os valores das correntes nos secundários alimentado os resistores obtidos através do ensaio e da simulação e apresenta o desvio para cada secundário.

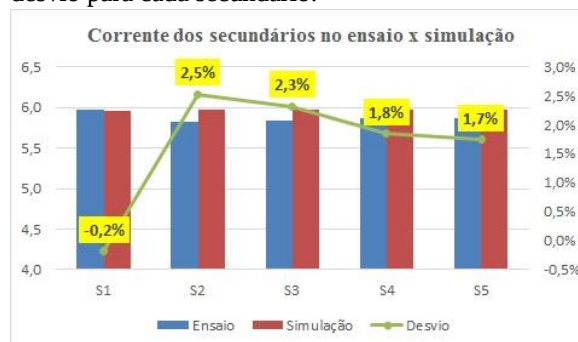


Figura 9. Corrente dos secundários no ensaio x simulação

Considerando as aproximações realizadas na determinação do modelo para simulação, assim como os valores calculados das indutâncias próprias, mútuas e de dispersão, bem como as variações das resistências ôhmicas provocadas pela variação da temperatura no decorrer dos ensaios, tanto da carga como dos enrolamentos do transformador, pode-se concluir que os valores encontrados na simulação estão muito próximos dos obtidos nos ensaios com o protótipo.

Para avaliar o equilíbrio de tensão dos secundários foi utilizado o fator de desequilíbrio de tensão estabelecido pela norma (NEMA MG-1, 2014), que define o fator como sendo a relação entre o máximo desvio da tensão média e a tensão média, dado em percentual, e com valor máximo de 2%. A Fig. 10 apresenta as tensões nos secundários para as 3 conexões do primário (delta, estrela e zig-zag) quando conectado às resistências. Esta figura também apresenta o fator de desequilíbrio de tensão para cada conexão.

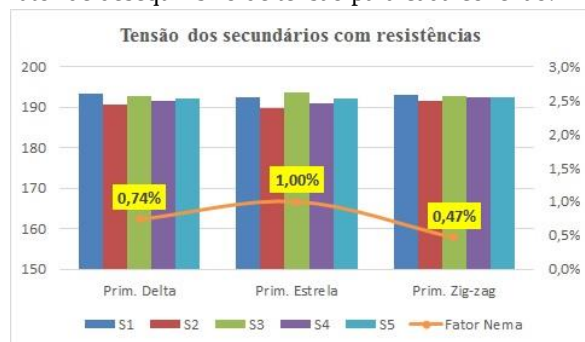


Figura 10. Tensão dos secundários com resistências

Mesmo considerando a oscilação e o desequilíbrio da tensão na alimentação do primário do transformador, que utiliza a rede da concessionária ao invés de um gerador dedicado, e independente da conexão primária, as tensões no secundário do conversor podem ser consideradas equilibradas. Elas apresentam um fator de desequilíbrio de tensão dentro do limite estabelecido pela norma (NEMA MG-1, 2014).

Com o intuito de avaliar o conversor diante das possíveis falhas nas fases da carga, foram provocadas aberturas em cada uma das fases da carga. A Fig. 11 mostra as tensões nos secundários para as 3 conexões do primário quando conectado às resistências e o fator de desequilíbrio de tensão para cada conexão, porém com a fase 4 aberta.

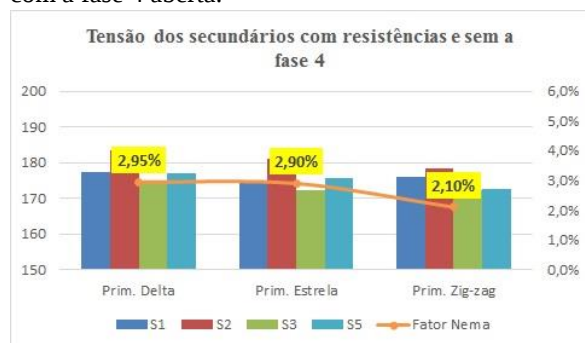


Figura 11. Tensão dos secundários com resistências e sem a fase 4

Nota-se que ao abrir uma das fases da carga, neste exemplo a fase 4, provocando uma falha na alimentação da mesma, o fator de desequilíbrio das 4 tensões ainda conectadas à carga é superior ao recomendado para as todas as conexões primárias. Nesta situação, pode-se afirmar que as tensões estão desequilibradas. De forma geral para as falhas nas outras fases, o desequilíbrio de tensão apresenta índices superiores ao valor de 2% determinado e pode-se considerar as tensões secundárias desequilibradas, quando alimenta cargas

puramente resistivas e que estejam com apenas 4 das 5 fases conectadas a carga.

Os mesmos ensaios foram realizados com o conversor alimentando um motor de indução pentafásico de 5,5 kW. Ao eixo do motor foi acoplado um gerador de corrente contínua alimentando uma resistência equivalente de 16 Ω , valor este determinado para que a corrente no motor pentafásico durante as aberturas (falhas) das fases não ultrapassasse demasiadamente o valor nominal de 7 A por fase. O gerador, com excitação independente, foi ajustado para gerar uma tensão máxima de 190 volts, garantindo assim a segurança dos resistores utilizados como carga.

A Fig. 12 apresenta as tensões nos secundários para as 3 conexões do primário (delta, estrela e zig-zag) quando conectado ao motor sob carga. Também é mostrado o fator de desequilíbrio de tensão para cada conexão.

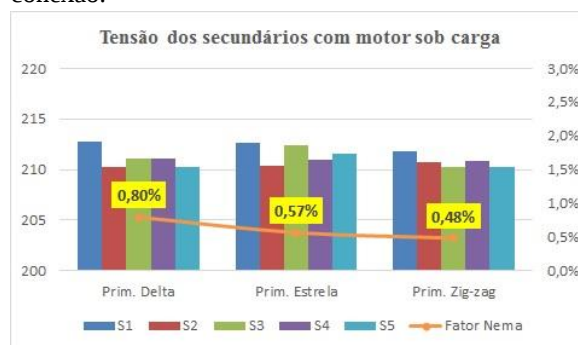


Figura 12. Tensão dos secundários com motor sob carga

Da mesma forma que com a carga resistiva, o conversor disponibiliza tensões secundárias equilibradas quando alimenta o motor sob carga, apresentando um fator de desequilíbrio de tensão dentro do limite considerado satisfatório.

Quando se abre uma das fases conectadas ao motor, pode-se observar o comportamento do conversor quanto ao equilíbrio de tensão durante as falhas. A Fig. 13 mostra as tensões nos secundários para as 3 conexões do primário quando conectado ao motor sob carga e o fator de desequilíbrio de tensão para cada conexão, porém com a fase 4 aberta.

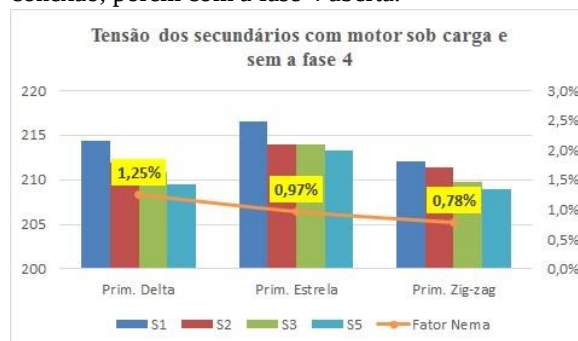


Figura 13. Tensão dos secundários com motor sob carga e sem a fase 4

Nota-se que mesmo com a abertura de uma das fases conectada ao motor sob carga, neste exemplo a fase 4, as tensões ainda conectadas permanecem em equilíbrio, independente da conexão primária e diferente do que ocorre com a carga resistiva. Para todas

as falhas das outras fases provocadas e em todas as conexões primárias, o fator de desequilíbrio de tensão apresenta-se abaixo do limite estabelecido.

A consequência da abertura de uma das fases do secundário pode ser observada pelo valor da corrente na conexão de alimentação do primário do transformador, que passa a tornar-se desequilibrada, independente da conexão primária.

Nas simulações e ensaios do protótipo, foi observada uma queda de tensão uniforme em todos os secundários, originada da resistência elétrica dos enrolamentos e da indutância de dispersão ocasionada pelo fluxo disperso no ar. A regulação média de tensão obtida ao alimentar o motor sob carga foi de 4,38%, ou seja, o valor da tensão média a vazio está 4,38% acima da tensão média sob carga.

5 Conclusão

Através das simulações e ensaios executados, este artigo evidenciou o equilíbrio de tensão nos 5 secundários do conversor, tanto para carga resistiva como para o motor sob carga, independente da conexão primária (delta, estrela e zig-zag). Mesmo com a abertura de uma das fases do secundário, as tensões nos demais 4 secundários conectados a carga permaneceram equilibradas quando alimentando o motor sob carga. Porém não ocorre o mesmo nível de equilíbrio quando alimenta a carga resistiva com as 4 fases. Para manter o equilíbrio, o conversor drenou da fonte de alimentação primária correntes desequilibradas. Comparado com um transformador trifásico convencional, que na falta de uma das fases do secundário deixa de oferecer equilíbrio nas 2 fases ainda conectadas a carga, o conversor proposto neste artigo poderá ser promissor ao alimentar uma carga indutiva que sofrer falha em uma de suas fases, mantendo além do equilíbrio de tensão, o funcionamento da carga.

Agradecimentos

Agradeço a empresa Schneider Electric do Brasil (Blumenau-SC), pela parceria na fabricação do equipamento, assim como o imprescindível apoio financeiro concedido pelo CNPq através da bolsa de mestrado (processo 130064/2015-7).

Referências Bibliográficas

Abdel-Khalik, A., Elserougi, A., Shafik, Z., Ahmed, S. & Massoud, A. (2013) A Scott connection-based three-phase to five-phase power transformer, *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*. IEEE.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5356-11: transformadores de potência Parte 11: transformadores do tipo seco - Especificação. Rio de Janeiro, 2016.

El-kahel, M., Olivier, G., April, G.-E. & Guimaraes, C. (1995) Five-and seven-phase conversion transformers, *Electrical and Computer Engineering, 1995. Canadian Conference on*. IEEE.

El-kahel, M., Olivier, G. & Oury, A. (1996) Five and seven phase current converters: a feasibility study, *Electrical and Computer Engineering, 1996. Canadian Conference on*. IEEE.

Iqbal, A., Moinuddin, S., Khan, M. R., Ahmed, S. M. & Abu-Rub, H. (2010) A novel three-phase to five-phase transformation using a special transformer connection. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 25(3), 1637-1644.

Krause, P. C. (1986) Analysis of Electric Machinery McGraw-Hill Book Company. New York.

Levi, E. (2008) Multiphase electric machines for variable-speed applications. *Industrial electronics, IEEE Transactions on*, 55(5), 1893-1909.

Martignoni, A. (1991) Transformadores. 8va Edição. Editora Globo.

Mohammad, M. & Fletcher, J. E. (2010) Five-phase permanent magnet machines, advantages and applications, *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on*. IET.

Moinoddin, S., Iqbal, A., Abu-Rub, H., Rizwan Khan, M. & Moin Ahmed, S. (2012) Three-phase to seven-phase power converting transformer. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 27(3), 757-766.

National Electrical Manufacturers Association. NEMA MG 1-2014: Motors and Generators, Section II, Part 14-36, Arlington, 2014.

Parsa, L. (2005) On advantages of multi-phase machines, *Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE*. IEEE.

Parton, J. & Chant, Y. (1971) The three-limbed phase transformer with controlled zero sequence effect. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 5(PAS-90), 2019-2029.

Parton, J. E. (1952) A general theory of phase transformation. *Proceedings of the IEE-Part IV: Institution Monographs*, 99(2), 12-23.

Ries, W. (2007) Transformadores—fundamentos para o projeto e cálculo. Porto Alegre: EDIPUCRS.

Tiwari, S., Singh, G. & Saroor, A. B. (1992) Multi-phase power transmission research—a survey. *Electric power systems research*, 24(3), 207-215.