

IMPACTO DA INTERAÇÃO SIMPÁTICA NOS TRANSFORMADORES SOB ALIMENTAÇÃO NÃO-SENOIDAL E DESEQUILIBRADA

Arthur Costa de Souza¹, Carlos Eduardo Tavares¹, Fabricio Parra Santilio²

Universidade Federal de Uberlândia¹, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, Brasil

Universidade Federal do Mato Grosso², Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá/MT, Brasil

E-mail: arthur_costasouza@hotmail.com, cetavares@eel.ufu.br, parra@ufmt.br

Resumo - Este trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia de análise dos transformadores trifásicos quando da presença de distorções harmônicas e desequilíbrios sob o fenômeno denominado de “interação simpática” (*Sympathetic Interaction*). Este fenômeno afeta significativamente a magnitude e a duração da corrente de inrush, podendo ocasionar uma série de problemas à operação do sistema elétrico, tais como a atuação indevida da proteção diferencial e de sobrecorrente em transformadores e bancos de capacitores, além de prolongar as sobretensões harmônicas temporárias em seus circuitos. Para a realização do trabalho, foi utilizado o software ATP (*Alternative Transients Program*), para analisar os efeitos da interação simpática nos transformadores trifásicos.

Palavras-Chave – Alimentação não-senoidal, ATPDraw, Interação Simpática, Transformadores.

SYMPATHETIC INTERACTION IMPACT IN A POWER TRANSFORMER FRONT NON-SINUSOIDAL SUPPLY

Abstract - This work aims to present the methodology of analysis of three-phase transformers when the presence of harmonic distortions and imbalances in the so-called phenomenon of *Sympathetic Interaction*. This phenomenon significantly affects the magnitude and duration of inrush current, which may cause a number of problems with the operation of the electrical system, such as the improper operation of the differential protection and overcurrent in transformers and capacitor banks, and prolong the harmonic voltages temporary in their circuits. To carry out the work, we used the software ATP (*Alternative Transients Program*), to analyze the effects *Sympathetic* in three-phase transformers.

Keywords - Non-sinusoidal supply, ATPDraw, *Sympathetic Interaction*, Transformers.

I. INTRODUÇÃO

Os principais problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica (QEE) podem ser subdivididos da seguinte maneira [1]:

- Variações da tensão de longa e de curta duração (interrupções, afundamentos e elevações de tensão);
- Distorções da forma de onda (harmônicos, Inter harmônicos, ruídos, *offset DC*, *Notching*);
- Flutuações de tensão;
- Desequilíbrios da tensão;
- Transitórios eletromagnéticos;

Diante desta conjuntura, destacam-se os estudos relacionados às distorções harmônicas que são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à fundamental. Os motivos desses distúrbios são diversos, em que as cargas não lineares são as principais perturbadoras, pois o seu aumento nos últimos anos foi bastante significativo, através da inserção de fontes chaveadas em boa parte dos equipamentos residenciais, comerciais e industriais. Tais distorções podem provocar diversos efeitos indesejados à operação dos sistemas, dentre os quais podem ser citados aqueles relacionados ao estresse térmico de equipamentos (aumento das perdas, elevação da temperatura e redução de vida útil), ao estresse dielétrico (sobretensões na frequência de ressonância paralela) e ao estresse mecânico (prejuízo ao desempenho do torque de máquinas rotativas e aumento de vibrações) [1].

Outro fenômeno discutido na área de QEE refere-se aos desequilíbrios de tensão e corrente. O desequilíbrio de tensão é uma condição na qual as três fases apresentam valores diferentes de tensão em módulo e/ou defasagem angular diferente de 120°. Os motivos do surgimento de desequilíbrios estão relacionados aos transformadores, linhas de transmissão e bancos de capacitores desbalanceados. Além disso, as distribuições desiguais de carga nas três fases contribuem para aumentar o desequilíbrio, seja pela presença de cargas trifásicas desequilibradas, pela má distribuição de cargas monofásicas ou pela variação nos ciclos de demanda de cada fase.

Como exemplo de agentes que podem contribuir significativamente para o surgimento de desequilíbrios, pode-se citar os sistemas monofásicos, fornos à arco, máquinas de solda, aparelhos de raios-x, abertura de um condutor, determinados tipos de curtos-circuitos, entre outros. Os equipamentos trifásicos operando com tensões desbalanceadas geralmente funcionarão de forma inadequada, podendo sofrer danos e redução de vida útil [2]. Sabe-se que as perdas em transformadores aumentam proporcionalmente ao aumento da frequência. Mesmo o transformador apresentando alta imunidade às falhas



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

operacionais, a preocupação com seu constante funcionamento é muito grande, já que uma falha na sua operação pode acarretar uma parada completa de um sistema elétrico. Assim, justifica-se a necessidade de se estudar fenômenos relacionados à má qualidade da energia que possam prejudicar o desempenho desses equipamentos.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo realizar simulações da interação simpática frente uma alimentação distorcida e frente uma alimentação desequilibrada no software ATP (*Alternative Transients Program*), com o objetivo de alertar sobre a gravidade deste fenômeno.

II. CONCEITUAÇÃO

Os estudos no regime transitório de um transformador em energização são explorados desde a sua invenção. Várias pesquisas foram feitas para explicar a natureza da corrente de *inrush* nos transformadores. Entretanto, um dos aspectos deste transitório tem sido largamente ignorado na literatura especializada: O efeito que a corrente *inrush* pode causar nos transformadores em operação [3].

Normalmente, a corrente *inrush* nos transformadores é avaliada admitindo que o transformador está sendo conectado a um sistema elétrico onde não há existência de outros transformadores conectados. Na prática, entretanto, esta condição dificilmente ocorre, uma vez que geralmente existe um ou mais transformadores já conectados ao sistema quando outro está para ser energizado. Nestes casos, a probabilidade de ocorrer uma interação transitória entre o transformador que está sendo conectado ao sistema e os que já se encontram energizados é alta, principalmente em sistemas com resistência série de valor apreciável. Este fenômeno, que modifica drasticamente a duração e a magnitude da corrente *inrush* do transformador [4].

A. *Inrush* em transformadores

A corrente transitória de *inrush* nos transformadores ocorre devido a saturação do núcleo do transformador. Esta corrente, a qual é caracterizada como sendo quase que totalmente unidirecional, cresce abruptamente, atingindo o seu pico máximo no primeiro meio ciclo após a energização do transformador e, a partir daí, começa a decair até que o transformador atinja a sua condição normal de magnetização. Da teoria clássica, sabe-se que a magnitude e a duração da corrente *inrush* depende basicamente dos seguintes fatores [3]:

- Do ponto da forma de onda de tensão no momento em que o transformador é energizado.
- Do valor e polaridade do fluxo residual no núcleo do transformador em relação ao fluxo de regime permanente, no momento da energização.
- Do nível de saturação ou densidade de fluxo máximo do material ferromagnético do núcleo do transformador
- Da impedância total do circuito em que a corrente *inrush* flui.

Contudo, se houver um ou mais transformadores já conectados ao sistema, a duração e a magnitude da corrente *inrush* pode mudar bruscamente. O motivo desta mudança se deve a saturação do núcleo ferromagnético dos transformadores que já se encontram conectados ao sistema, instigada pela assimetria da tensão nos transformadores causada pela circulação da corrente de energização. Assim, a

saturação destes transformadores deve ser considerada como um novo fator que afeta a corrente de *inrush*.

Esta última consideração não é normalmente analisada nos estudos de transitórios eletromagnéticos. Contudo, possui grande importância, pois esta interação prolonga os transitórios de energização dos transformadores.

B. Interação entre transformadores

O efeito simpático entre os transformadores foi pela primeira vez citado por Hayward [5] durante testes de campo, com o objetivo de determinar as razões de falsas atuações da proteção diferencial de um banco de transformadores que operava em paralelo com outros. Para fazer a análise da energização de transformadores é necessário selecionar as condições de simulação em que o mesmo será submetido. Para isso foi considerado o sistema exemplificado na Figura 1, que no decorrer do trabalho irá passar por diferentes condições de operação.

Tendo em foco a utilização de modelos pré-existentes no simulador ATP, os resultados obtidos deverão ser alvo de avaliações sobre sua eficácia e qualidade de reprodução das condições operativas dos equipamentos aqui contemplados.

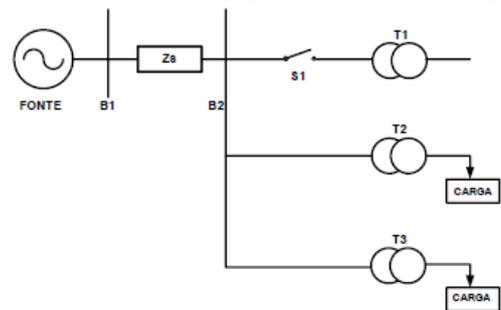


Fig. 1. Modelo utilizado para as simulações computacionais [6].

Onde:

Fonte: Fonte de Alimentação Senoidal 34,5kV

Zs: Impedância da Linha;

S1: Chave para energização do transformador T1;

T1: Transformador de Potência (20MVA – 34,5/13,8kV);

T2: Transformador de Potência (20MVA – 34,5/13,8kV);

T3: Transformador de Potência (20MVA – 34,5/13,8kV).

No modelo apresentado foi utilizada uma fonte de alimentação com características de um sistema interligado. Sendo assim, os distúrbios causados pela energização do transformador não causarão perturbações na rede de alimentação. Os demais parâmetros, como impedância da linha e as cargas conectadas ao sistema, são fatores que influenciam no fenômeno estudado. Desta forma, os parâmetros da impedância da linha (Z_s), apresentada na Figura 1, serão alterados de acordo com cada estudo de caso de forma a verificar a influência desse fator no fenômeno estudado, uma vez que a análise da influência da variação da carga foi realizada na referência [6].

Em cada etapa desse artigo serão apresentados os gráficos correspondentes às formas de onda de corrente do transformador T1 e T2, observando-se a corrente *inrush* em T1 e o efeito simpático em T2. Não serão apresentadas as formas de onda de T3 pela semelhança dos resultados com T2.

III. INTERAÇÃO SIMPÁTICA FRENTE UMA ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

Com o objetivo de mostrar a seriedade da interação simpática frente uma alimentação não-senoidal, faz-se necessário apresentar os resultados para situação de uma alimentação perfeitamente senoidal. A Figura 2 ilustra o sistema elétrico simulado para verificar a interação simpática para uma alimentação senoidal.

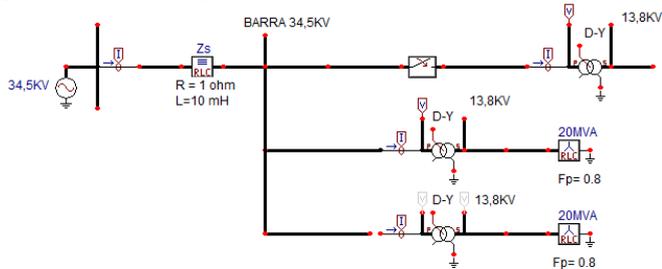


Fig. 2. Sistema analisado frente uma alimentação senoidal.

A. Variação dos parâmetros da linha

A impedância da linha de distribuição que alimenta os transformadores de potência influencia na corrente de *inrush* dos transformadores e a resistência tem um efeito predominante sobre esse fenômeno. A resistência série entre o transformador e fonte não só reduz o limite máximo inicial da corrente de *inrush*, mas também influencia na sua taxa de amortecimento. Transformadores perto de um gerador normalmente apresentam correntes *inrush* de maiores magnitudes, pois estão conectados em linhas de baixa resistência. Do mesmo modo, os grandes transformadores elétricos também tendem a apresentar uma significativa corrente *inrush* devido ao alto valor de indutância se comparados com a resistência do sistema [6]. As Figuras 3.a, 3.b e 3.c apresentam os resultados da simulação do sistema com os seguintes parâmetros: Z_s : 3,9 Ω , sendo ($R=1\Omega$, $L=10\text{mH}$); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo.

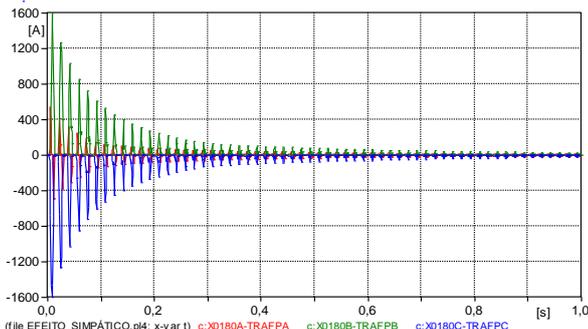


Fig. 3.a. Corrente *inrush* em T1 sem a interação simpática.

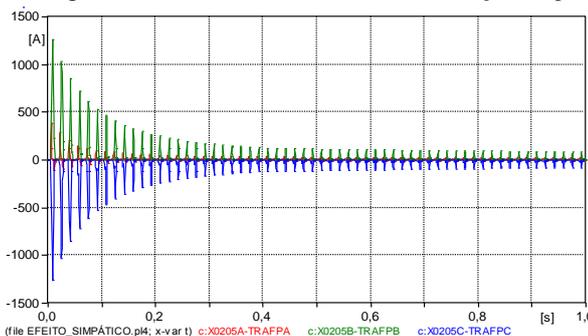


Fig. 3.b. Corrente *inrush* em T1 com a interação simpática.

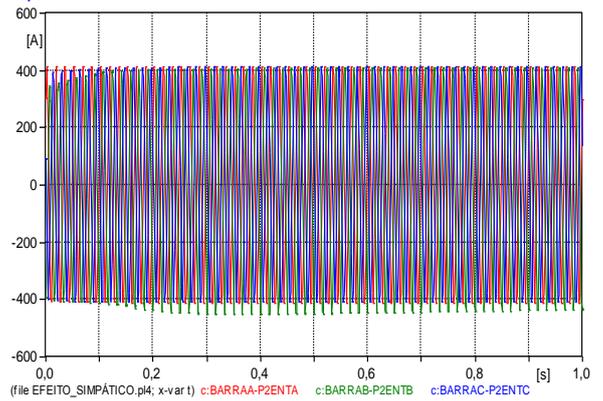


Fig. 3.c. Corrente em T2 com a interação simpática.

Na Figura 3.a mostra-se a corrente de energização sem a influência da interação simpática entre os transformadores, ou seja, os transformadores T2 e T3 foram retirados da simulação. Enquanto na Figura 3.b encontra-se a forma de onda da corrente no momento da energização de T1, com os transformadores T2 e T3 conectados ao sistema. Verifica-se que os valores foram elevados e o tempo de estabilização do sistema foi de aproximadamente 0,4 segundos. Na Figura 3.c percebe-se que a forma de onda da corrente em T2 apresentou variações devido aos distúrbios no sistema, podendo assim, verificar-se o efeito simpático na fase B (em verde), pois a corrente nesta fase apresentou amplitude maior que na fase A (em vermelho) e na fase C (em azul). Esta perturbação transitória está associada a saturação do núcleo ferromagnético do transformador, e como a fase B localiza-se entre as outras duas fases, consequentemente, está mais propício a apresentar uma saturação maior.

Nas Figuras 4.a 4.b e 4.c serão apresentadas as formas de onda de corrente de T1 e de T2, operando com os seguintes parâmetros: Z_s : 3,9 Ω , sendo ($R=3,77\Omega$, $L=2,65\text{mH}$); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo.

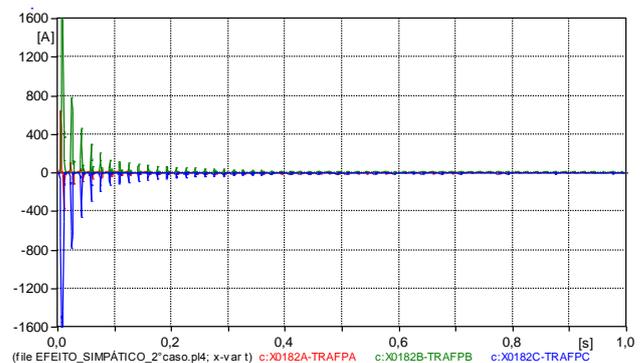


Fig. 4.a. Corrente *inrush* em T1 sem a interação simpática.

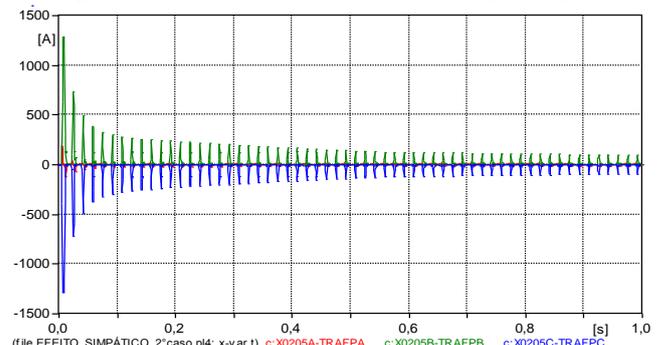


Fig. 4.b. Corrente *inrush* em T1 com a interação simpática.

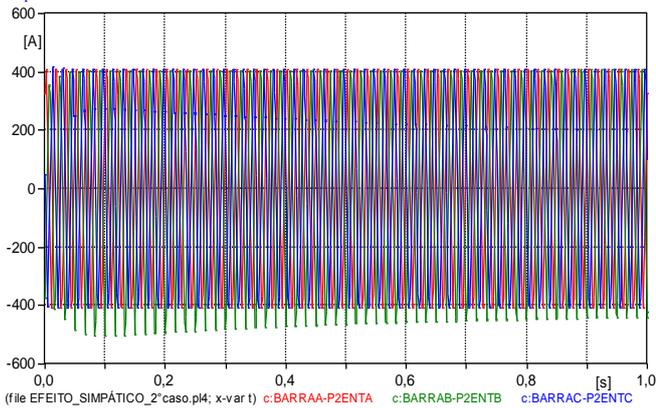


Fig. 4.c. Corrente em T2 com a interação simpática.

A forma de onda de corrente apresentada na Figura 4.b representa a energização de T1, com a alteração dos parâmetros de linha. Para fazer uma análise comparativa das simulações, o sistema operou com a mesma impedância nos dois casos, porém o que foi alterado foram os valores das resistências e da indutância da linha.

Verifica-se que na Figura 3.b a corrente de energização de T1 apresentou maiores magnitudes se comparada à corrente de energização apresentada na Figura 4.b. Houve também uma significativa alteração do tempo de amortecimento da corrente de inrush, comprovando assim a teoria que a resistência da linha influencia na corrente de magnetização, visto que com valores de resistência maiores, o fenômeno foi menos significativo.

IV. INTERAÇÃO SIMPÁTICA FRENTE UMA ALIMENTAÇÃO DISTORCIDA

Para esta situação será aplicada uma distorção harmônica de tensão compreendendo a 3ª, 5ª e 7ª ordens no barramento de 34,5 kV com intensidades de 4%, 5% e 3%, respectivamente. Já os ângulos adotados, referentes a fase A, são de 23°, 50° e -37° respectivamente para 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica. O objetivo é verificar se esta nova situação do sistema irá agravar ou não o fenômeno sob análise. O cálculo utilizado para a obtenção da distorção harmônica total de tensão (DHT_v) é realizado de acordo com a equação (1):

$$DHT_v = \frac{1}{V_1} * \sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} V_h^2} * 100\% \quad (1)$$

Aplicando aos dados aqui empregados:

$$DHT_v = \frac{\sqrt{(0,04^2 + 0,05^2 + 0,03^2)}}{1} * 100 = 7,071\%$$

Onde:

- V_h- Valor eficaz da tensão de ordem h;
- V₁- Valor eficaz da tensão fundamental;
- h - Ordem da componente harmônica.

A Figura 5 exibe o circuito simulado frente uma alimentação distorcida. Para fins comparativos, os casos a serem estudados serão os mesmos que foram propostos para condição de uma alimentação senoidal.

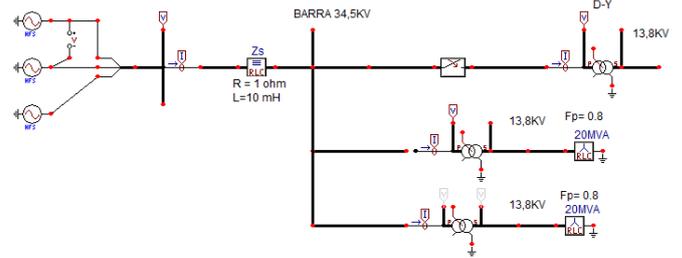


Fig. 5. Sistema analisado frente uma alimentação distorcida.

As Figuras 6.a e 6.b apresentam o resultado da simulação do sistema com os seguintes parâmetros: Z_s: 3,9 Ω, sendo (R=1Ω, L=10mH); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo.

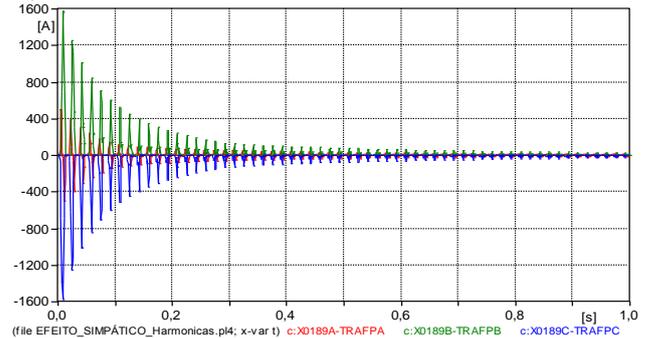


Fig. 6.a. Corrente inrush em T1 sem a interação simpática para uma alimentação distorcida.

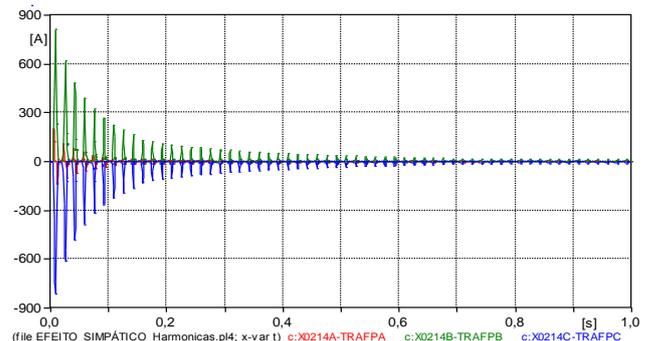


Fig. 6.b. Corrente inrush em T1 com a interação simpática para uma alimentação distorcida.

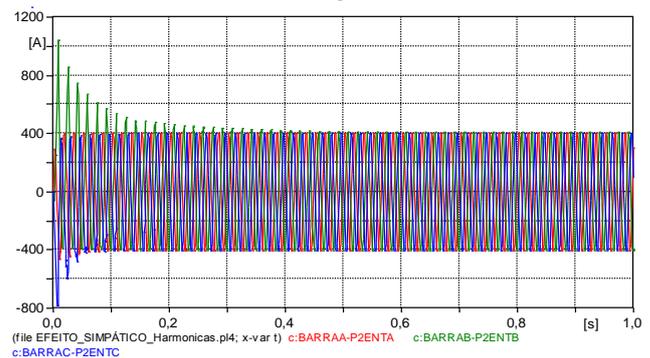


Fig. 6.c. Corrente em T2 com a interação simpática para uma alimentação distorcida.

Ao se comparar as Figuras 6.a e 6.b, nota-se que a interação simpática favoreceu ao processo de energização do transformador T1. Já na Figura 6.c sob condições de uma alimentação não senoidal a interação simpática foi bastante prejudicial para o transformador T2, atingindo valores acima de 2 pu. Nas Figuras 7.a, 7.b e 7.c seguintes, serão apresentadas as formas de onda de corrente de T1 e T2 diante

de uma alimentação distorcida, operando com os seguintes parâmetros: $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=3,77 \Omega$, $L=2,65\text{mH}$); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo.

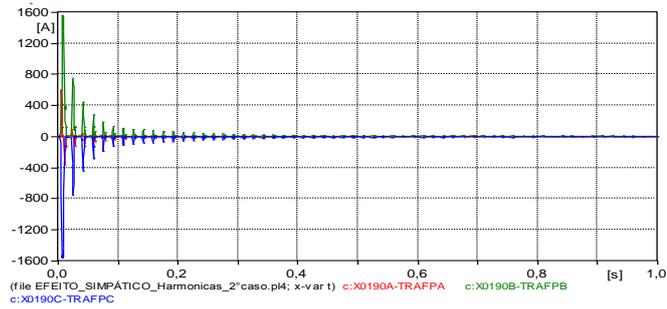


Fig. 7.a. Corrente *inrush* em T1 sem a interação simpática para uma alimentação distorcida.

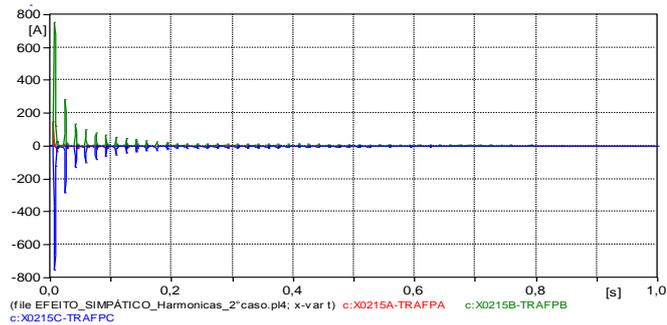


Fig. 7.b. Corrente *inrush* em T1 com a interação simpática para uma alimentação distorcida.

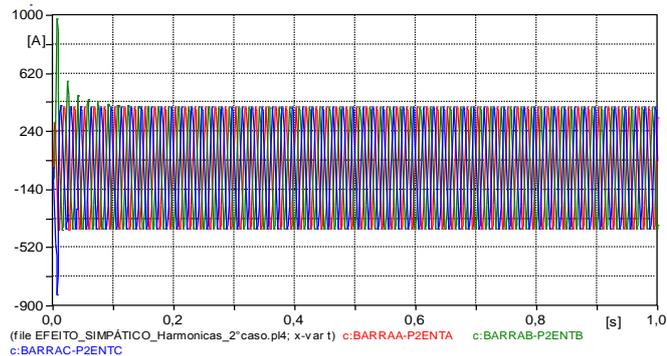


Fig. 7.c. Corrente em T2 com a interação simpática para uma alimentação distorcida.

Da mesma forma que a situação anterior referente as Figuras 6.a e 6.b, os resultados evidenciados nas Figuras 7.a e 7.b, apresentaram a mesma constatação, ou seja, perante a interação simpática a energização do transformador T1 foi menos agressiva. Não obstante, a Figura 7.c também não demonstra risco para o sistema. Contudo, verifica-se que os parâmetros da linha influenciam nas condições de operação.

V. INTERAÇÃO SIMPÁTICA FRENTE UMA ALIMENTAÇÃO DESEQUILIBRADA

Para esse estudo de caso, o transformador foi alimentado com as seguintes tensões de fase desequilibradas:

$$\dot{V}_a = 20998,7329 \angle 4,5^\circ V$$

$$\dot{V}_b = 22858,9836 \angle -117,8^\circ V$$

$$\dot{V}_c = 24760,674 \angle 128,3^\circ V$$

Ao calcular as componentes simétricas dessas tensões utilizou-se da matriz de transformação evidenciada na equação (2).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a+} \\ \dot{V}_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Fig. 8. Cálculo das componentes simétricas das tensões.

Desta forma chegou-se às seguintes tensões:

$$\dot{V}_{a0} = 1715,1324 \angle 170,39^\circ V$$

$$\dot{V}_{a1} = 22849,785 \angle 5,104^\circ V$$

$$\dot{V}_{a2} = 685,0105 \angle -101,286^\circ V$$

Portanto, o nível de desequilíbrio considerado conforme a equação (3) é:

$$k = \frac{V_{a2}}{V_{a1}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$k = \frac{685,0105}{22849,785} \cdot 100 = 2,9978 \%$$

O objetivo deste estudo de caso é verificar se, para as investigações propostas neste trabalho, o sistema irá se encontrar em um estado mais sensível, se comparado a situação de alimentação ideal (perfeitamente senoidal). Os casos a serem estudados serão os mesmos que foram propostos anteriormente. As Figuras 9.a, 9.b e 9.c apresentam o resultado da simulação do sistema com os seguintes parâmetros: $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=1\Omega$, $L=10\text{mH}$); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo.

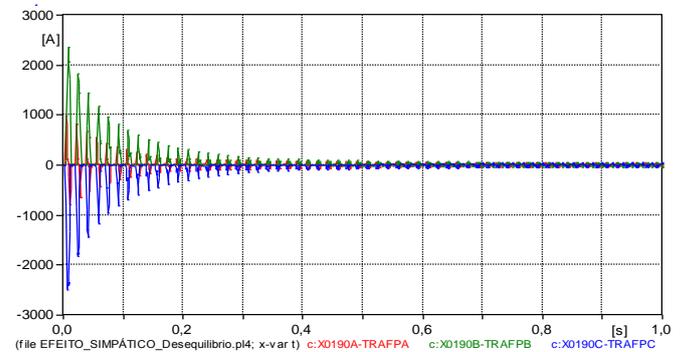


Fig. 9.a. Corrente *inrush* em T1 sem a interação simpática para uma alimentação desequilibrada.

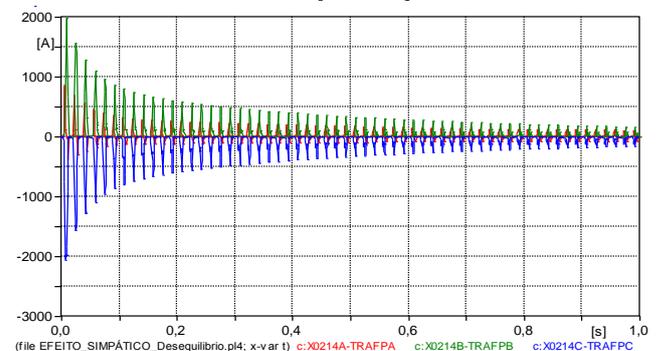


Fig. 9.b. Corrente *inrush* em T1 com a interação simpática para uma alimentação desequilibrada.

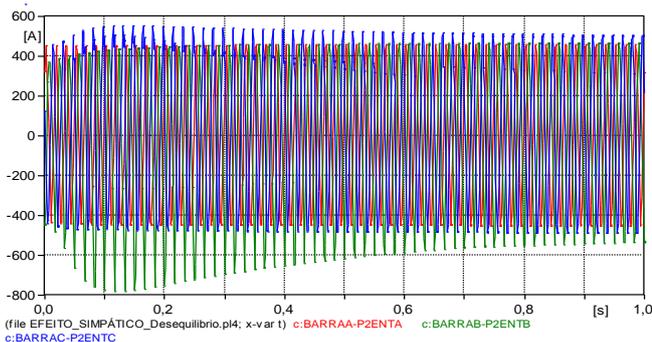


Fig. 9.c. Corrente em T2 com a interação simpática para uma alimentação desequilibrada.

Conforme evidenciado na Figura 9.c sob condições de uma alimentação desequilibrada a interação simpática foi bastante significativa para o transformador, podendo comprometer então a sua vida útil. Nas Figuras 10.a, 10.b e 10.c a seguir serão apresentadas as formas de onda de corrente de T2 diante de uma alimentação desequilibrada, operando com os seguintes parâmetros: Z_s : 3,9 Ω , sendo ($R=3,77 \Omega$, $L=2,65\text{mH}$); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo.

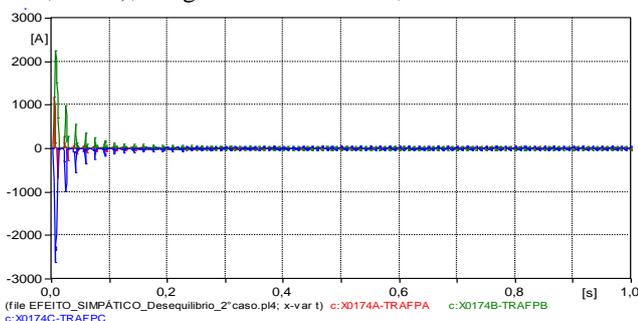


Fig. 10a. Corrente *inrush* em T1 sem a interação simpática para uma alimentação desequilibrada.

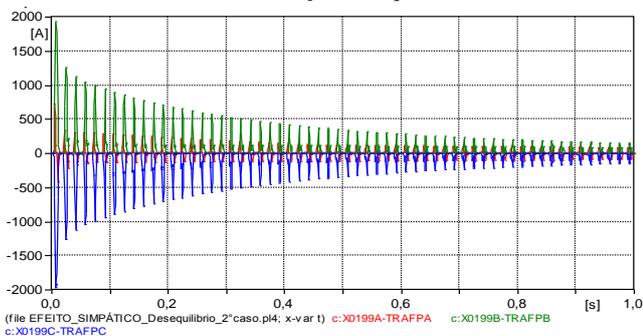


Fig. 10.b. Corrente *inrush* em T1 com a interação simpática para uma alimentação desequilibrada.

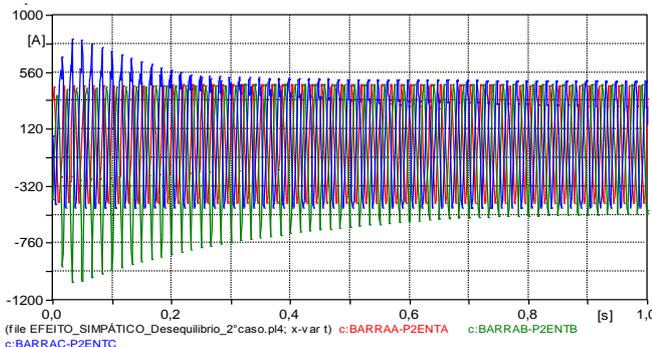


Fig. 10.c. Corrente em T2 com a interação simpática para uma alimentação desequilibrada.

Em ambas situações para os diferentes valores de impedância de linha, a corrente de energização no transformador T1 em relação a sua magnitude, resultou em menor grau de severidade na presença da interação simpática, porém, ao se tratar do tempo de acomodação, o comportamento torna-se preocupante, sendo suficiente para acionar os relés de proteção dos transformadores. As repostas da energização do transformador T1 diante de uma alimentação desequilibrada são evidenciadas entre as Figuras 9.a, 9.b e 10.a, 10.b. Verifica-se também a severidade da interação simpática na Figura 10.c, em que a corrente de operação do transformador T2 aumenta consideravelmente.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo teve por objetivo apresentar e discutir aspectos relacionados a energização de transformadores trifásicos quando submetidos a uma alimentação distorcida e desequilibrada. Foi evidenciada a Interação Simpática entre os transformadores que já se encontram conectados na rede elétrica durante a energização de um novo transformador. Tal efeito pode ocasionar a atuação indevida da proteção da linha de transmissão, por parte dos relés 51 (sobrecarga) e 87 (diferencial). Logo, percebe-se que para o sistema teste, sob as condições operacionais apresentadas, é imperativa a necessidade de reajuste dos parâmetros dos relés para que não haja a interrupção de energia no sistema. Percebeu-se que as consequências da interação simpática foram bastantes danosas ao sistema para uma alimentação com perturbações, sendo a situação mais crítica quando da ocorrência de desequilíbrios de tensão. Isso se deve aos elevados níveis de saturação atingidos nos núcleos ferromagnéticos dos transformadores frente a essas condições de alimentação.

REFERÊNCIAS

- [1] Resende, José Wilson. Apostila de Qualidade da Energia Elétrica I: Análise e Soluções. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2006. 280 p.
- [2] Rezende, P. H. O., Samesima, M., “Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução Trifásicos”. Revista Horizonte Científico, v. 6, n. 2, 2012.
- [3] Bronzeado H. S. “Impacto da Interação simpática (Sympathetic Interaction) entre Transformadores na Qualidade da Tensão”. Seminário Brasileiro sobre a Qualidade de Energia Elétrica IV - SBQEE, 2001.
- [4] Bronzeado, H. S.; Brogan, P. B.; Yacamini, R. (1996). “Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction”, IEEE Transactions on Power Systems 11: 2051 – 2056.
- [5] HAYWARD C.D., "Prolonged Inrush Currents with Parallel Transformers Affect Differential Relaying", AIEE Trans., Vol. 60, pp. 1096-1101, Jan. 1941.
- [6] F. P. Santilio, L. N. Velasco, T. V. Silva, P. H. O. Rezende, L. E. Vasconcelos, J. A. F. Barbosa Junior, A. C. Souza. “Verificação dos Fatores que Influenciam a Corrente de Inrush: Apresentação de Uma proposta Para a Mitigação Deste Fenômeno e Análise do Efeito Sympathetic”, XI Conferência de Engenharia Elétrica- XI CEEL, Novembro 2013, Uberlândia/MG.