

VERIFICAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A CORRENTE DE INRUSH: APRESENTAÇÃO DE UMA PROPOSTA PARA A MITIGAÇÃO DESSE FENÔMENO E ANÁLISE DO EFEITO SYMPATHETIC

F. P. Santilio, L. N. Velasco, T. V. Silva, P. H. O. Rezende, L. E. Vasconcelos, J. A. F. Barbosa Junior, A. C. Souza.

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, Brasil
E-mail: fabricio.qee@gmail.com, loana.velasco@gmail.com, tvsilva@gmail.com, paulohenrique16@gmail.com, lucasevasconcelos@gmail.com, johnareis@gmail.com, arthur_costasouza@hotmail.com.

Resumo – Questões relacionadas com fenômenos transitórios de chaveamentos em sistemas elétricos, dentro do contexto da qualidade da energia, têm despertado grande interesse nos diversos setores da Engenharia Elétrica. Uma das formas mais tradicionais com que se manifestam os altos níveis de correntes transitórias está na clássica energização de transformadores, as quais causam efeitos indesejáveis ao sistema elétrico e ao próprio transformador. Na busca de soluções para tal problema a literatura destaca alguns procedimentos que compreendem a inserção de equipamentos e as técnicas destinadas a um chaveamento sob condições tais que os distúrbios mencionados sejam eliminados ou reduzidos. A ideia de se utilizar o chaveamento controlado em transformadores para minimizar as elevadas correntes de inrush não é recente, porém, as dificuldades encontradas para a implementação das estratégias não eram pequenas. Este artigo tem o objetivo de apresentar uma alternativa para a energização de transformadores de potência, visando à mitigação dos efeitos transitórios proporcionando assim uma melhor estabilidade do sistema.

Palavras-Chave – ATPDraw, Transformadores elétricos, chaveamento controlado, correntes de inrush, efeito sympathetic.

CURRENT INRUSH AFFECTING FACTORS VERIFICATION: A MITIGATION PROPOSAL AND THE SYMPATHETIC EFFECT ANALYSIS

Abstract – As far as issues related to switching transients in electrical systems concerns, Electrical Engineering all over the world have been searching different ways to mitigate the effect of this matter. One of the most traditional forms that this effect manifest is the high levels transient currents of a power transformers energizing cycle, which causes undesirable effects to the electrical system and the transformer itself. Seeking for

solutions to this subject, the literature highlights some procedures that could be able to provide a controlled transient effect by applying switching techniques under conditions such that the disorders mentioned are reduced or eliminated. The idea of using controlled switching transformer to minimize the high inrush currents is not new, however, the difficulties encountered in the strategies implementation were not so easy. Focusing on his problem, this paper aims to provide an alternative to the energizing power transformers, focussing at mitigating the effects of transient thus providing better system stability.

Keywords – ATPDraw, Electric Transformers, control switching, inrush currents, Sympathetic Effect.

I. INTRODUÇÃO

Os grandes transformadores de potência pertencem à classe dos equipamentos de alto custo e de vital importância para o funcionamento dos sistemas elétricos de corrente alternada. A proteção destes equipamentos é um dos grandes desafios na área de proteção de sistemas de potência. A tentativa de inibir as elevadas correntes de magnetização, denominadas frequentemente de correntes de inrush, é uma dessas questões. As correntes de inrush em transformadores resultam de qualquer mudança abrupta na tensão de excitação. Usualmente consideradas como resultado da energização de um transformador, as elevadas correntes de magnetização podem também ser causadas pela ocorrência de faltas externas aos transformadores, quando podem surgir sobretensões no sistema, ou no restabelecimento da tensão de excitação após a eliminação de uma falta externa. A corrente de inrush de magnetização devido a energização de um transformador é considerada o caso mais severo. Conforme estabelece a teoria clássica sobre o tema, a energização convencional de transformadores de potência pode resultar em elevados fluxos dinâmicos no núcleo do transformador, responsáveis pela saturação de uma ou mais colunas do núcleo e, como consequência, elevados valores da corrente de magnetização podem surgir [1], [2] e [3]. Essas correntes possuem amplo espectro harmônico, incluindo as harmônicas pares, e ocasionam efeitos indesejáveis ao próprio transformador e ao sistema de potência, tais como: fadiga mecânica nos enrolamentos, deterioração da isolamento, falha na operação do relé diferencial de proteção do transformador e afundamentos temporários de tensão. Estes dois últimos efeitos afetam diretamente a qualidade da energia elétrica do



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

sistema, enquanto os dois primeiros têm efeito na degradação da vida útil do referido equipamento.

Existem vários fatores que influenciam na corrente de inrush dos transformadores, sendo eles: o ângulo da tensão no momento do chaveamento, a densidade de fluxo residual no transformador no instante da energização, os parâmetros da linha de distribuição que atende ao equipamento e as cargas que estão operando no sistema [4] e [5].

Devido a esse cenário, esse artigo tem o objetivo de analisar alguns parâmetros que influenciam a corrente de inrush do transformador através de simulações computacionais no programa ATPDraw, proporcionando variações nos parâmetros da linha, a carga instalada e por fim será aplicada uma forma de controle no ângulo da tensão de energização no transformador durante o chaveamento, podendo assim verificar como a corrente de inrush se comporta frente a esses controles e consequentemente será analisado o efeito sympathetic no sistema.

II. DESCRIÇÃO DO MODELO UTILIZADO

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-existentis no mencionado simulador, os resultados obtidos deverão ser alvo de avaliações sobre sua eficácia e qualidade de reprodução das condições operativas dos equipamentos aqui contemplados.

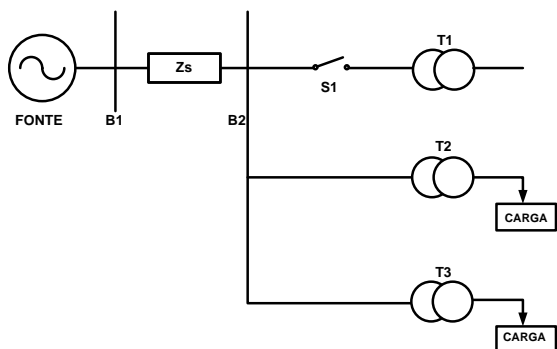


Fig. 1. Modelo utilizado para as simulações computacionais

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, serão alterados de acordo com cada estudo de caso, verificando assim a influência desses fatores no fenômeno estudado.

III. ESTUDO DE CASO

Nesta etapa serão apresentados os estudos de caso selecionados para análise do fenômeno estudado. Como dito anteriormente, os parâmetros considerados na simulação para verificar suas influências na corrente de energização dos transformadores são:

- Variação dos parâmetros da linha;
- Variação do Fator de Potência das cargas;
- Chaveamento controlado através do ângulo da tensão aplicada.

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

A. Variação dos Parâmetros da Linha.

A impedância da linha de distribuição que alimenta os transformadores de potência influencia na corrente de inrush do transformador 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 de 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 de inrush devido ao alto valor de indutância se comparados com a resistência do sistema.

As figuras abaixo apresentam os resultados da simulação do sistema com os seguintes parâmetros: Zs: 3,9 Ω , sendo (R=1 Ω , L=10mH); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo.

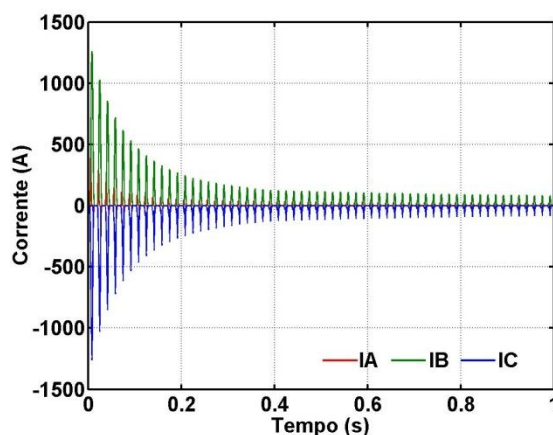


Fig. 2. Forma de onda da corrente de inrush em T1, com Zs: 3,9 Ω , sendo (R=1 Ω , L=10mH);

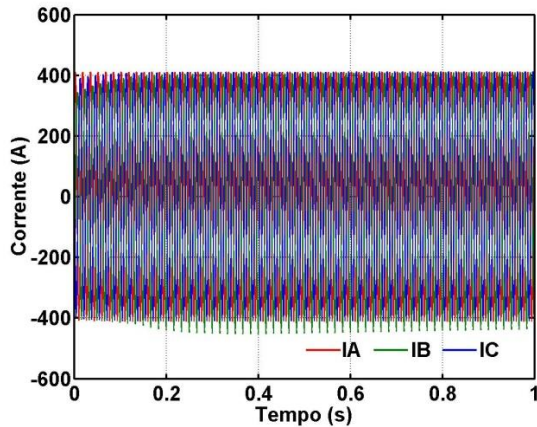


Fig. 3. Forma de onda da corrente em T2, com $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=1\Omega$, $L=10mH$).

Na Figura 2 encontra-se a forma de onda da corrente no momento da energização de T1. Verifica-se que os valores foram elevados e o tempo de estabilização do sistema foi de aproximadamente 0,4 segundos. Na Figura 3 percebe-se que a forma de onda da corrente em T2 apresentou variações devido aos distúrbios no sistema, podendo assim, verificar-se o efeito sympathetic.

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

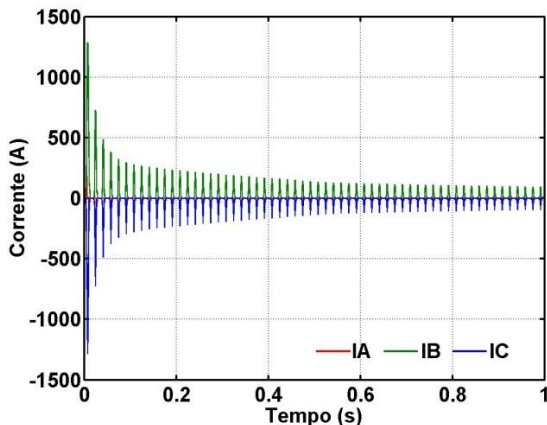


Fig. 4. Forma de onda da corrente de inrush no T1, com $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=3,77 \Omega$, $L=2,65 mH$).

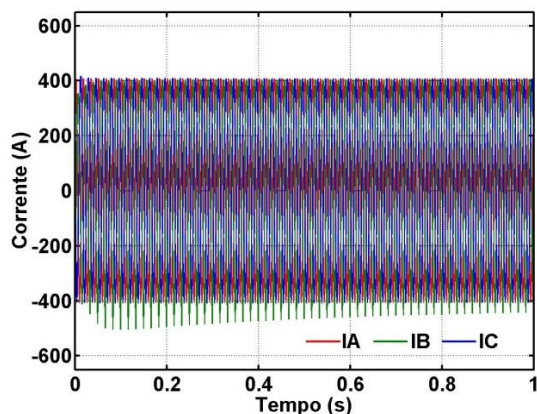


Fig. 5. Forma de onda da corrente no T2, com $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=3,77 \Omega$, $L=2,65 mH$).

A forma de onda de corrente apresentada na Figura. 4 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 2 a corrente de energização de T1 apresentou maiores magnitudes se comparada à corrente de energização apresentada na Figura 4. 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.

Ao se comparar as formas de onda de corrente em T2 no momento da energização de T1 demonstrado na Figura 5, verifica-se que o efeito sympathetic apresentou-se com maior severidade, evidenciando assim que os parâmetros de linha influenciam nas condições de operação dos equipamentos.

B. Variação dos Parâmetros da Carga.

No momento da energização de um transformador de potência, costuma-se retirar toda a carga instalada no mesmo, pois devido ao efeito da corrente de magnetização haverá o surgimento de picos de corrente que podem acarretar prejuízos aos equipamentos instalados. Porém o transformador a ser energizado será conectado ao sistema de distribuição de energia da concessionária, onde haverá outras cargas instaladas, e como essas cargas interferem na corrente que circula no sistema, elas também irão interferir na corrente de magnetização do transformador, assim como no efeito sympathetic. Para este novo caso, T1 será energizado a vazio e T2 e T3 estão operando em regime permanente com as cargas definidas em cada simulação.

As Figuras 6 e 7 apresentam as formas de onda em T1 e T2 respectivamente, no momento da energização.

Os parâmetros utilizados nessa simulação são: $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=1\Omega$, $L=10mH$); Carga: 20MVA – FP: 1,0.

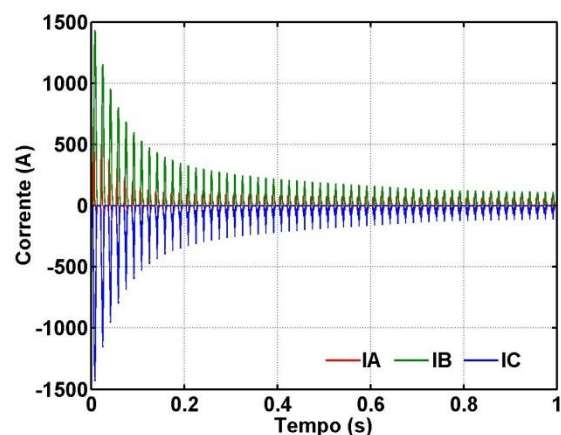


Fig.6. Forma de onda da corrente de inrush em T1.

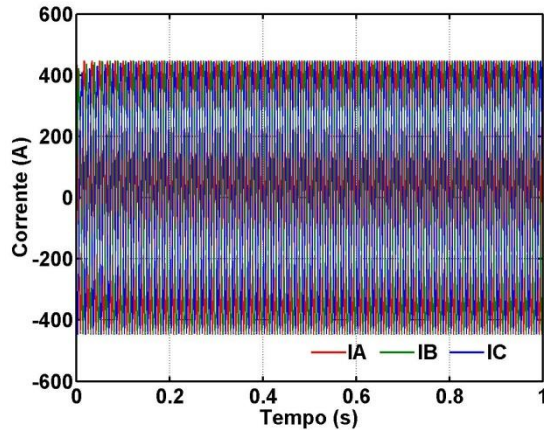


Fig. 7. Forma de onda da corrente em T2, com Carga: 20MVA – FP: 1,0.

Nas Figuras 8 e 9 serão apresentadas as formas de onda de corrente em T1 e T2, porém com características de operação diferentes do caso anterior.

Os parâmetros utilizados nessa simulação são: Z_s : 3,9 Ω , sendo ($R=1\Omega$, $L=10mH$); Carga: 20MVA – FP: 0,5 indutivo.

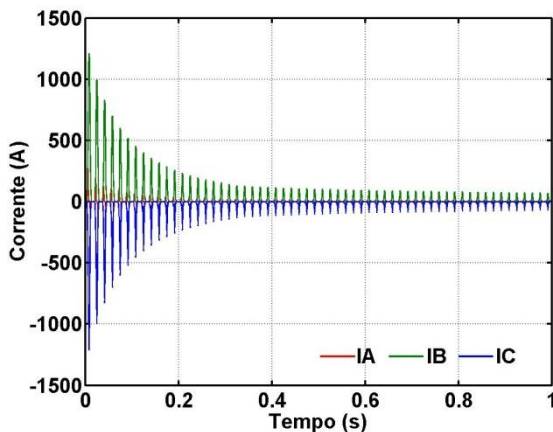


Fig.8. Forma de onda da corrente de inrush em T1.

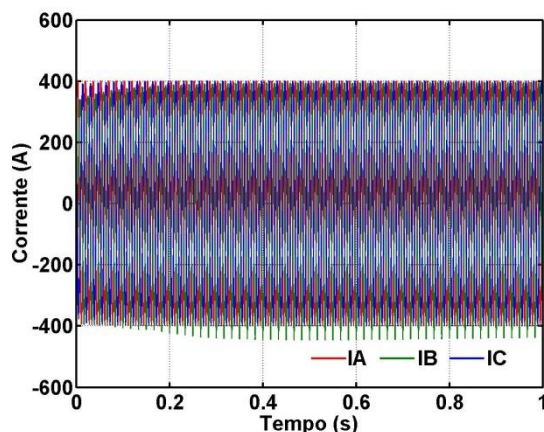


Fig. 9. Forma de onda da corrente de T2, com Carga: 20MVA – FP: 0,5.

Ao comparar os gráficos das Figuras 6 e 7 com os das Figuras 8 e 9, verificou-se que a alteração da carga instalada também influencia no fenômeno estudado.

A forma de onda da Figura 8 apresenta menores valores de pico da corrente de inrush se comparada à Figura 6. Percebe-se que, com a alteração da carga, houve alterações no valor da corrente de pico assim como o tempo de amortecimento do fenômeno.

No que tange ao efeito sympathetic verifica-se que na Figura 9 as perturbações no sistema se apresentaram de forma mais significativa, enquanto que na Figura 7, quando o sistema opera com uma carga puramente resistiva, o efeito sympathetic não foi evidenciado.

De acordo com a análise dos resultados, verificou-se que a influência da carga instalada é significativa, podendo ocasionar interferências no sistema.

C. Chaveamento controlado através do controle do ângulo da Tensão aplicada.

Nos casos anteriores foram realizadas as análises da energização de transformadores de potência frente aos parâmetros do sistema. Os mesmos foram energizados sem levar em consideração os tipos de controle, proporcionando assim, altos valores de corrente de inrush.

Nessa etapa do estudo será considerada a energização de transformadores com chaveamento controlado através do ângulo da tensão aplicada.

De acordo com a literatura sobre a análise do fenômeno, estudos comprovam que o ângulo da tensão no momento do chaveamento do transformador pode causar grandes alterações no sistema. Sabe-se que, se o chaveamento ocorrer no instante em que a tensão de suprimento estiver passando por 0V, os valores das correntes de inrush serão máximos, e conseqüentemente, se o chaveamento do transformador ocorrer no instante em que a tensão de suprimento estiver passando pelo valor de pico, as correntes de inrush irão apresentar os menores valores devido ao atraso de 90° do fluxo de magnetização. Na Figura 10 é apresentado o sistema elétrico em estudo no ATPDraw, cujo instante de chaveamento do transformador T1 foi controlado a fim de minimizar a corrente inrush e o efeito sympathetic.

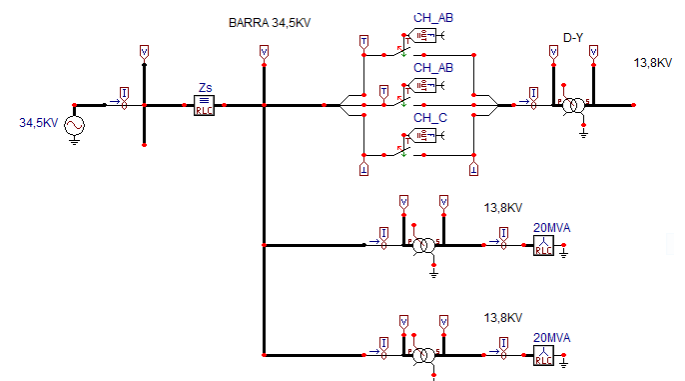


Fig. 10. Sistema elétrico utilizado para a energização de T1.

A metodologia de controle foi desenvolvida no ATPDraw, com a utilização da ferramenta TACS conforme demonstrado na Figura 11. A ferramenta TACS monitora a forma de onda de tensão podendo assim controlar o momento exato para o chaveamento.

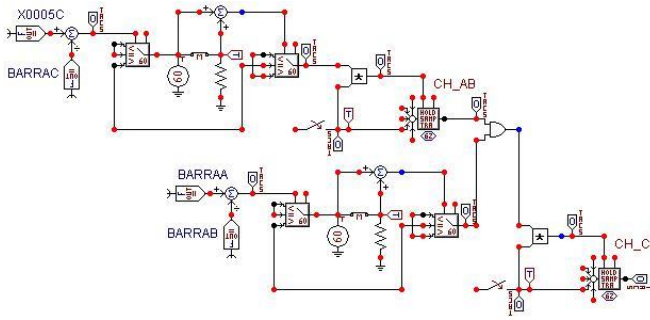


Fig. 11. Sistema de controle selecionado para a energização de T1 utilizando a ferramenta TACS.

As três fases do transformador serão chaveadas independentemente. O chaveamento da Fase A e da Fase B ocorrerá quando a tensão VAB estiver passando pelo seu valor máximo, e a Fase C será chaveada no momento em que a tensão VAB estiver passando pelo 0, proporcionando assim a alteração da corrente de inrush no transformador.

Os parâmetros utilizados nessa simulação são: $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=1\Omega$, $L=10mH$); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo - Chaveamento não controlado.

Nas Figuras 12 e 13 são mostrados os resultados para o chaveamento não controlado.

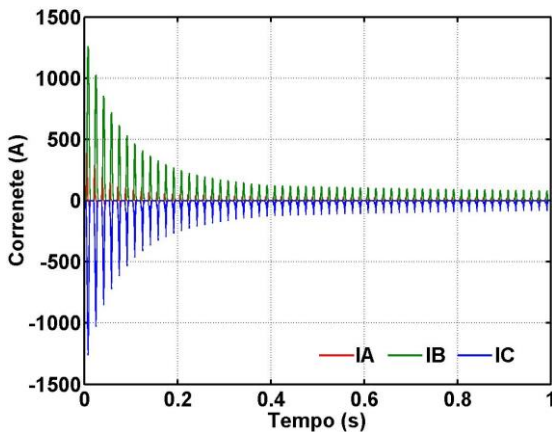


Fig. 12. Forma de onda da corrente de inrush em T1, com chaveamento não controlado.

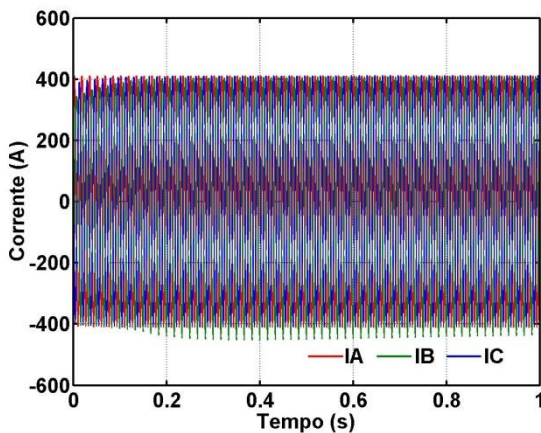


Fig. 13. Forma de onda da corrente em T2, com chaveamento não controlado.

Nas Figuras 14 e 15 são apresentadas as formas de onda de corrente quando a energização é feita mediante a utilização do sistema de controle selecionado, cujo dados são: $Z_s: 3,9 \Omega$, sendo ($R=1\Omega$, $L=10mH$); Carga: 20MVA – FP: 0,8 indutivo - Chaveamento controlado.

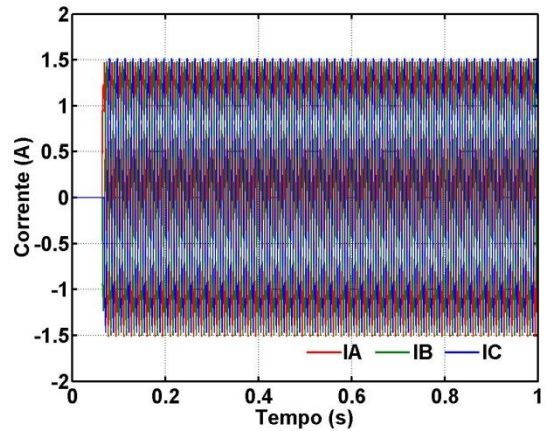


Fig.14. Forma de onda da corrente de inrush em T1, com chaveamento controlado.

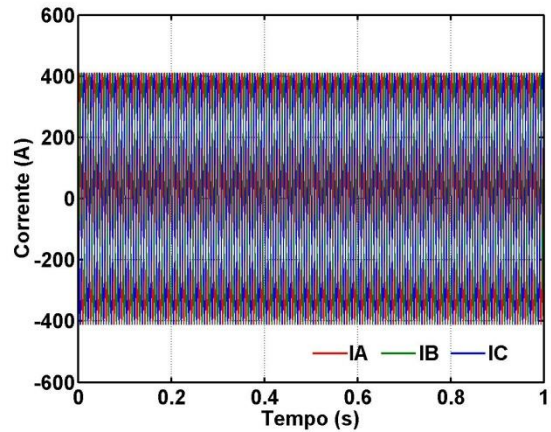


Fig. 15. Forma de onda da corrente do T2, com chaveamento controlado.

Ao analisar os resultados da energização sem controle, conforme demonstrado na Figura 12, percebe-se que a corrente de inrush apresenta altos valores. Porém na energização feita mediante o controle selecionando, a corrente apresentada é a mesma que circula no transformador operando a vazio conforme apresentado na Figura 14, evidenciando assim a eliminação dos picos de corrente no momento da energização, pois o valor da corrente corresponde àquela que circula no transformador operando a vazio em regime permanente.

Como o efeito sympathetic corresponde à interação da corrente de inrush de um transformador em outro transformador operando no sistema, havendo a eliminação da corrente de inrush, conseqüentemente não haverá o efeito sympathetic no sistema, como observado na Figura 15.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou simulações para diagnosticar a influência de vários parâmetros na corrente de inrush de um transformador de potência e também sua conseqüência para o

sistema (efeito sympathetic). Foram apresentados três cenários para a simulação, onde cada um sofreu variações de acordo com os casos estudados. Ao analisar as três alternativas, verificou-se alterações nos resultados de simulação do sistema. No caso *A*, o objetivo era verificar a influência dos parâmetros da linha de distribuição na corrente de inrush e no efeito sympathetic. Ao analisar os resultados da simulação, verificou-se que os mesmos contemplavam o que já tem sido visto na literatura: quanto maior o valor da resistência da linha, menor é o efeito da corrente inrush e melhor é seu amortecimento. Porém no que tange ao efeito sympathetic o resultado apresentou um cenário não muito favorável, pois o efeito foi mais evidenciado com o aumento da resistência da linha. No caso *B*, as simulações apresentaram diferentes resultados com a alteração das cargas conectadas ao sistema, indicando que o fator de potência da carga conectada a um transformador operando no sistema interfere na corrente de inrush de outros transformadores e conseqüentemente no efeito sympathetic. O caso *C*, realmente apresentou uma opção eficiente na redução da corrente de inrush. Com a energização feita mediante o controle estabelecido, a corrente de energização do transformador resultou na mesma corrente que circula com o transformador operando a vazio, proporcionando assim uma estabilidade no sistema e eliminando o problema.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. V. Raffo. “Análise da corrente de inrush em transformadores de potência”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Engenharia Elétrica, 2010. Acessado em 02 de março de 2013, em: <http://hdl.handle.net/10183/33033>.
- [2] F. C. F. Guerra, L. L. Araújo, L. D. C. Medeiros. “Correntes Transitórias de Magnetização em Transformadores de Potência”. VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - VIII CBQEE, 2009, Blumenau/SC.
- [3] H. S. Bronzeado, R. Yacamini. “Transformer Interaction Caused by Inrush Current”, IPST '97 - International Conference on Power Systems Transients Seattle, June 22-26, 1997.
- [4] R. Apolônio. “*Modelagem e Chaveamento Controlado de Transformadores: Análise Computacional e Validação Experimental*”, Uberlândia, 2004, Orientador: José Carlos de Oliveira, Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 254f.: il.
- [5] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde. “Transformer Engineering: Design and Practice”, Indian Institute of Technology, Bombay Mumbai, India, Marcel Dekker, Inc, New York, NY 10016, U.S.A, 2004.