



GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC

CHAVEAMENTO CONTROLADO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA TRIFÁSICOS: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO EM UM TRANSFORMADOR DE 100MVA, 230/138 kV

Herivelto de Souza Bronzeado* CHESF – Recife	Servulo de Oliveira Pinto CHESF – Recife	Per Jonsson ABB – Suécia	José Carlos de Oliveira UFU – Uberlândia	Marcelo Lynce Ribeiro Chaves UFU - Uberlândia
--	--	-----------------------------	--	---

RESUMO

A energização de transformadores geralmente é realizada através do fechamento aleatório dos pólos dos disjuntores, com as tensões do sistema sendo aplicadas nos enrolamentos também em instantes aleatórios. Como decorrência, os fluxos magnéticos inicialmente produzidos nos enrolamentos serão assimétricos, fazendo com que o transformador atinja expressemos níveis de saturação e, conseqüentemente, gerando altas correntes de magnetização (corrente de *inrush*), as quais podem causar sérios inconvenientes à Operação do sistema elétrico. Uma das soluções para mitigar as altas correntes de *inrush* consiste em energizar o transformador de forma que o fluxo produzido pela tensão aplicada seja igual, em módulo e polaridade, ao fluxo residual no núcleo do transformador. Esta estratégia de controle foi alvo de um Projeto CHESF de Pesquisa e Desenvolvimento, realizado com o suporte da Universidade Federal de Uberlândia e apoio da ABB. Este Informe Técnico tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos nos ensaios de campo da energização controlada de um transformador trifásico de 100MVA, 230/138kV, realizados com o intuito de validar a estratégia desenvolvida.

PALAVRAS-CHAVE

Energização de transformadores; Corrente de *inrush*; Chaveamento controlado; Mitigação de distúrbios;

1.0 - INTRODUÇÃO

A energização convencional de transformadores de potência trifásicos normalmente é realizada através do fechamento aleatório dos pólos dos disjuntores, com as tensões do sistema elétrico sendo aplicadas nos enrolamentos do transformador também em instantes aleatórios. Como consequência, os fluxos magnéticos inicialmente produzidos nos enrolamentos, os quais são proporcionais à integral, no tempo, da tensão aplicada nestes enrolamentos, serão, em geral, assimétricos em relação ao seu valor zero. Esta assimetria transitória do fluxo magnético pode provocar um sobre-fluxo no núcleo do transformador, saturando-o, e, portanto, originando altas correntes de magnetização (corrente de *inrush*).

Essa corrente de *inrush*, a qual é caracterizada como sendo quase que totalmente unidirecional, cresce de forma abrupta, 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 (nominal) de magnetização [1]. Dependendo da sua duração, magnitude e grau de desequilíbrio entre as fase, as correntes de *inrush* podem causar sérios inconvenientes no sistema elétrico e no próprio transformador. Como exemplos desses impactos tem-se: sobretensões harmônicas temporárias, atuação indesejada do sistema de proteção [2], afundamentos momentâneos de tensão, estresse eletro-mecânico nos enrolamentos do transformador, etc.

Uma das soluções para se evitar tais inconvenientes seria, portanto, a mitigação das altas correntes de *inrush* geradas pela assimetria no fluxo. Convencionalmente isso é feito através da utilização de resistores de pré-inserção nos disjuntores destinados às manobras de transformadores. A queda de tensão nesta resistência reduz o sobre-fluxo magnético no núcleo e, conseqüentemente, a magnitude da corrente transitória de magnetização. Uma outra forma de se reduzir a corrente de *inrush* é a energização controlada de transformadores. Para se atingir este propósito, torna-se necessário que se implemente de uma estratégia de controle tal que o fechamento elétrico dos pólos do disjuntor seja realizado em instantes de tempo no qual o estado de magnetização residual nas colunas do núcleo magnético do transformador coincida com aquele a ser imposto pela tensão que está sendo aplicada aos enrolamentos do transformador.

Esta estratégia foi alvo de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento gerenciado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF e com o suporte da Universidade Federal de Uberlândia - UFU e apoio da Asea Brown Boveri – ABB (Suécia). O referido Projeto contemplou, entre outros aspectos, as questões relacionadas como modelagem de disjuntores e transformadores na sua forma mais abrangente, o estabelecimento de mecanismos e dispositivos para a determinação dos fluxos residuais nas colunas do núcleo ferromagnético e definição de estratégias para o chaveamento controlado de transformadores trifásicos. Foram realizados testes computacionais e laboratoriais para validação da metodologia/estratégia desenvolvida e, finalmente, a realização de ensaios de campo com transformadores de grande porte (100MVA) para a ratificação do sucesso do Projeto.

Este Informe Técnico tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos nos ensaios de campo realizados na Subestação Eunápolis, do sistema CHESF, localizada no sul do estado da Bahia, os quais consistiram da energização de um dos transformadores de 100MVA, 230/138kV, daquela subestação através do fechamento controlado dos pólos do disjuntor de 230kV daquela unidade.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DA SUBESTAÇÃO EUNÁPOLIS

A Subestação Eunápolis foi escolhida como local para a realização dos ensaios de campo associados ao Projeto CHESF de P&D devido a ocorrências de atuações indesejadas nas proteções de neutro dos transformadores daquela subestação durante manobras de energização de transformadores. Tais atuações foram devidas fundamentalmente ao fenômeno de interação simpática entre transformadores [3-5], que prolonga as correntes de *inrush* nos transformadores, mantendo-as por dezenas de segundos. Por estar numa ponta de um sistema predominantemente radial, com uma potência de curto-circuito de aproximadamente 1000MVA, a Subestação Eunápolis proporciona condições bastante favoráveis para a ocorrência desse tipo de fenômeno.

Portanto, a redução da magnitude das correntes de *inrush* através do chaveamento controlado dos transformadores da Subestação Eunápolis eliminaria o risco de atuações da proteção de sobre corrente, bem como as variações momentâneas de tensão causadas por aquela corrente nos barramentos do sistema elétrico derivado daquela subestação, melhorando consideravelmente o nível da qualidade da operação e da tensão fornecida.

Uma outra razão para que os ensaios fossem realizados daquela Subestação foi a alta confiabilidade da sua configuração, com três transformadores de 100MVA, em paralelo, alimentando uma carga da ordem de 100MW. Deste modo, a retirada de um dos transformadores para a realização dos ensaios não impunha grandes riscos ao suprimento da carga.

Além das características mencionadas, o dispositivo utilizado para controlar o fechamento do disjuntor, o próprio disjuntor, e também o transformador a ser energizado tinham sido produzidos pelo mesmo fabricante, aumentando desta forma o nível de compatibilização entre tais equipamentos. Este fato, dentre outros aspectos, facilitou a obtenção de informações necessárias à modelagem dos equipamentos envolvidos.

3.0 - DISPOSITIVO UTILIZADO PARA CONTROLE DO DISJUNTOR

Devido à semelhança da metodologia/estratégia de controle desenvolvida no Projeto CHESF de P&D com a empregada em um equipamento da ABB – Suécia que, na ocasião, também estava sendo desenvolvido por aquela empresa, foi feito um acordo entre a CHESF e a ABB para que tal equipamento (Switchsync T183™) fosse testado durante o desenvolvimento do Projeto.

É importante ressaltar que a utilização daquele dispositivo proporcionou um avanço significativo no Projeto da CHESF, considerando que o mesmo já se encontrava praticamente pronto para aplicações em disjuntores de alta tensão. Verificou-se que ainda são necessárias algumas adaptações no algoritmo de controle para que o mesmo se adapte à metodologia/estratégia proposta pelo Projeto.

A Figura 1 mostra as principais conexões do “Switchsync T183™”, enquanto a Figura 2 apresenta a vista frontal do dispositivo instalado provisoriamente em um dos painéis na cabana de relés da Subestação Eunápolis.

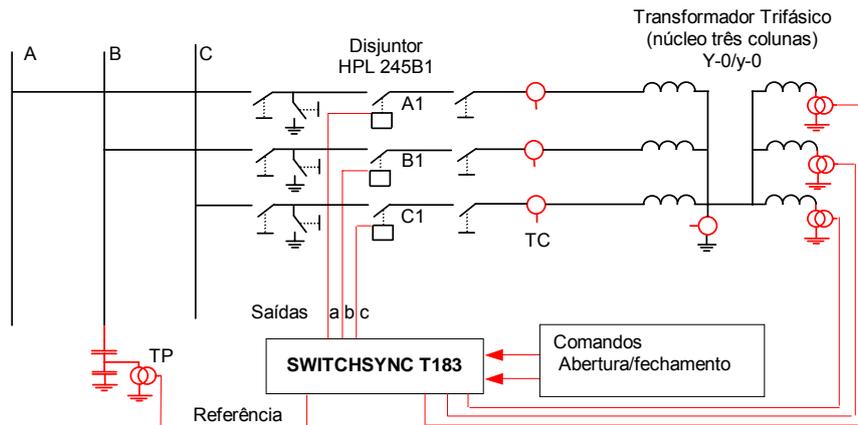


FIGURA 1 - Principais conexões do dispositivo "Switchsync T183TM".



FIGURA 2 – Vista frontal do dispositivo "SwitchsyncTM" instalado provisoriamente na Subestação Eunápolis.

4.0 - MEDIÇÕES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS

A Figura 3 mostra o diagrama esquemático dos pontos de medição onde os sinais de tensão e corrente foram obtidos dos secundários dos TP e TC conforme na.

As medições realizadas durante os ensaios de campo consistiram basicamente nos registros das formas de onda das correntes e tensões nos transformadores 04T2 e 04T3 da Subestação Eunápolis, durante as manobras de energização e desenergização do transformador 04T3, 100MVA, 230/138kV, daquela subestação. O transformador 04T2 é idêntico ao transformador 04T3.

As correntes do lado de 230kV e as tensões nos terminais de 138kV do transformador 04T2 foram registradas com o objetivo de investigar, em campo, o fenômeno da interação simpática entre os transformadores.

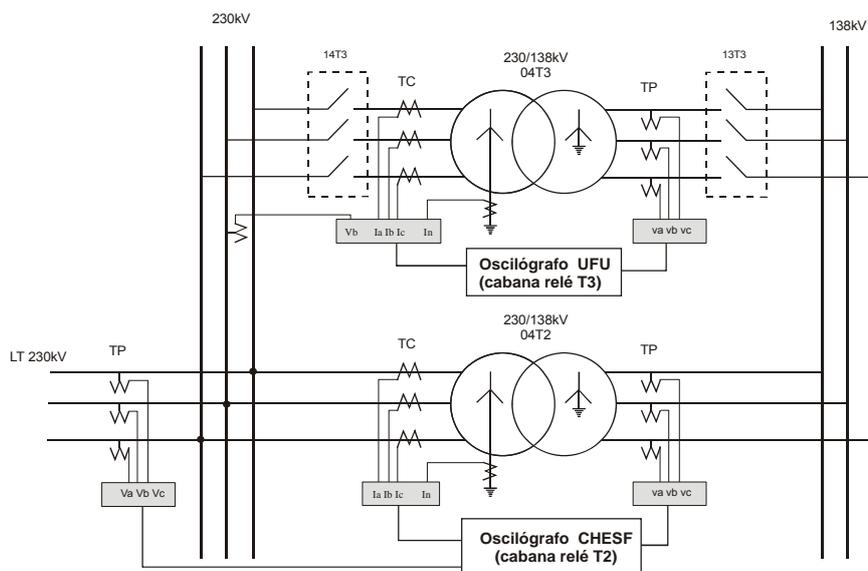


FIGURA 3 – Diagrama esquemático dos pontos de medição.

Os registros dos sinais de tensão e corrente foram realizados utilizando-se o Registrador Digital RDP IV, de fabricação Reason, com 16 canais analógicos e 32 canais digitais de eventos. Os sinais de tensão foram obtidos diretamente dos secundários dos TP, enquanto os sinais de corrente foram obtidos através de “alicates amperímetros” (*clamps*) de 10A e 100A envolvendo os secundários dos TC de 230kV.

5.0 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

A Tabela 1 mostra um resumo dos ensaios realizados, com a descrição da condição de cada um deles, e a Figura 4 mostra as formas de ondas das correntes de *inrush* no transformador 04T3 registradas durante a sua energização. Para o propósito de comparação, as magnitudes das correntes estão mostradas em uma mesma escala de magnitude, tendo como base o maior valor de pico de corrente (1110 A), o qual foi registrado no Ensaio 9.

TABELA 1 – Ensaio Realizados

Ensaio	Hora	Descrição do Ensaio
1	10:45	Energização do transformador 04T3 através do controle do fechamento dos pólos do disjuntor, mas sem a informação de fluxo residual (considerado nulo).
2	11:07	Desenergização do transformador 04T3.
3	11:27	Energização do transformador 04T3 com controle do fechamento dos pólos do disjuntor e considerando o fluxo residual medido.
4	11:50	Desenergização do transformador 04T3.
5	12:00	Energização do transformador 04T3 com controle do fechamento dos pólos do disjuntor e considerando o fluxo residual medido.
6	14:08	Desenergização do transformador 04T3
7	14:43	Energização do transformador 04T3 com controle do fechamento dos pólos do disjuntor e considerando o fluxo residual medido.
8	15:19	Desenergização do transformador 04T3.
9	15:30	Energização do transformador 04T3 sem o controle do fechamento dos pólos do disjuntor.

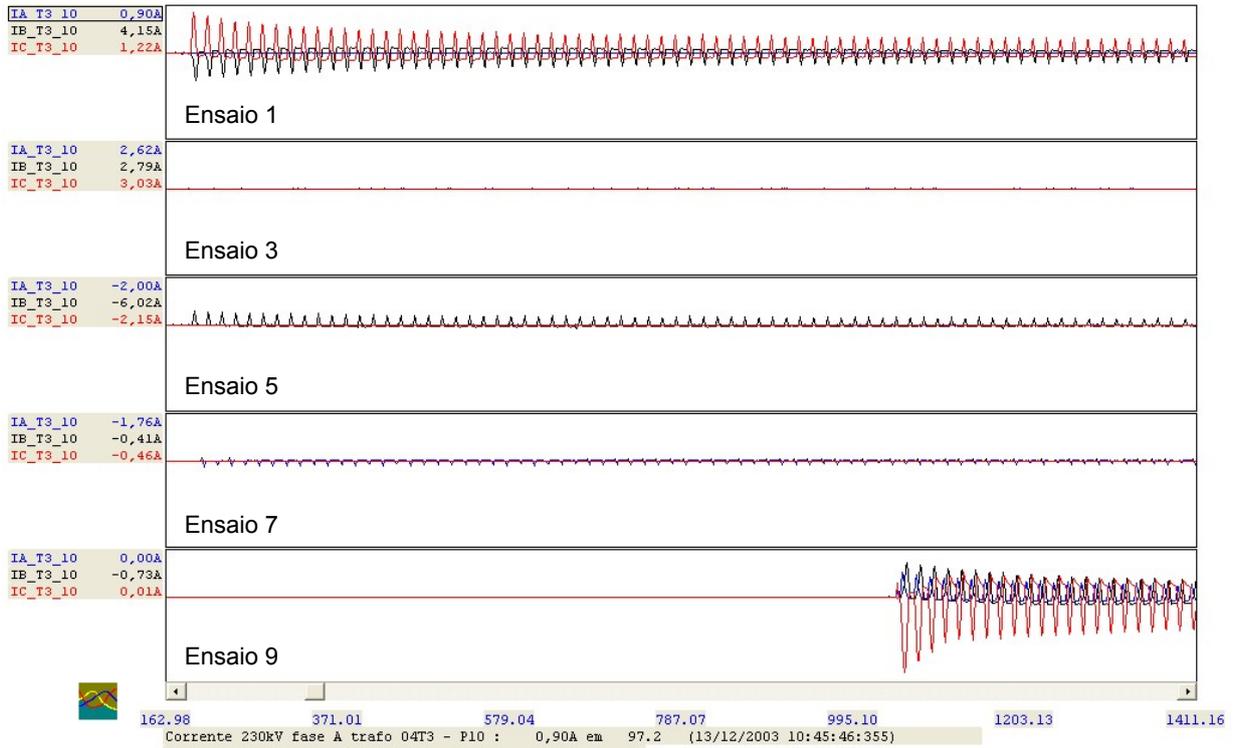


FIGURA 4 – Correntes de *inrush* no transformador 04T3 registradas nos ensaios de 1, 3, 5, 7 e 9.

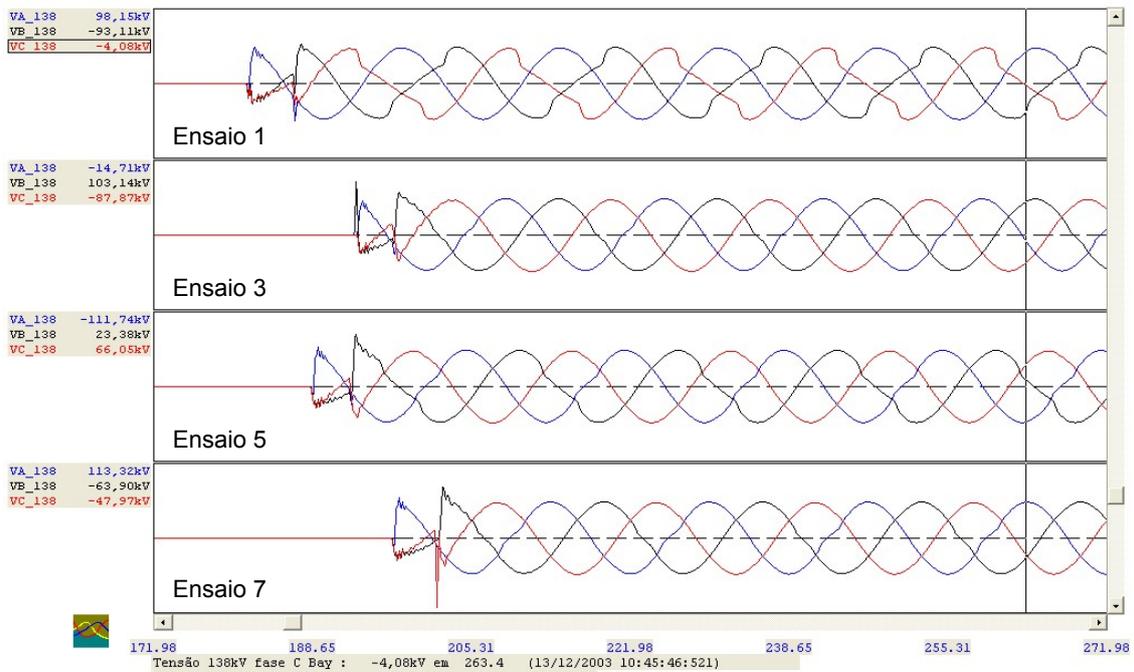


FIGURA 5 – Tensões de 138kV no transformador 04T3 durante a sua energização.

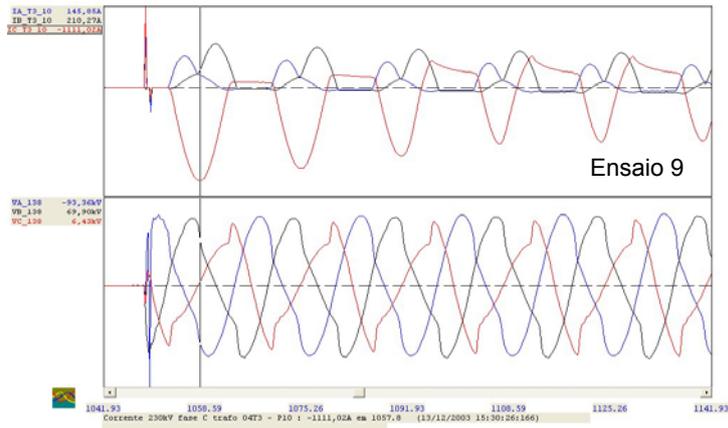


FIGURA 6 – Correntes de *inrush* (lado 230kV) e tensões de 138kV medidas no transformador 04T3.

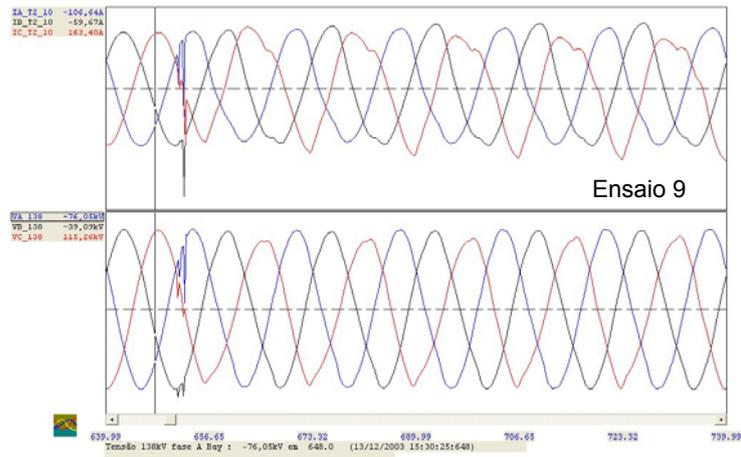


FIGURA 7 – Correntes no lado de 230kV e tensões de 138kV medidas no transformador 04T2.

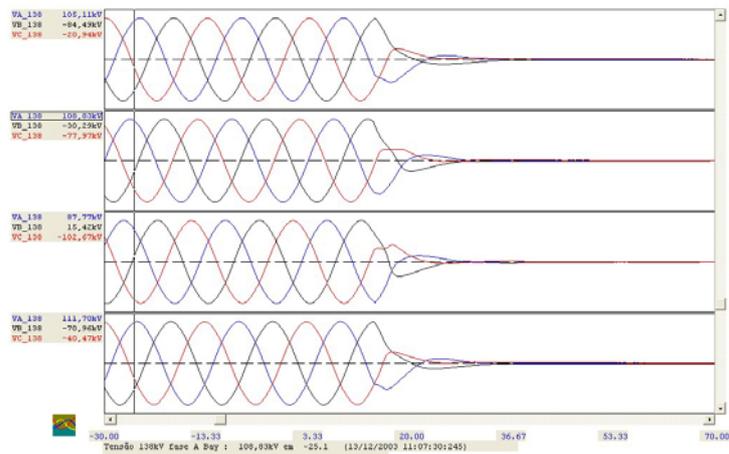


FIGURA 8 – Tensões de 138kV no transformador 04T3 durante a sua desenergização.

6.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

A Figura 4 mostra as formas de onda das correntes de *inrush* no transformador 04T3 da Subestação Eunápolis nos Ensaios de 1, 3, 5, 7 e 9 (ver Tabela 1). Para efeito de comparação, estas correntes estão mostradas numa mesma escala, tendo como base o maior pico de corrente (1110A), o qual ocorreu no Ensaio 9. Como se pode observar, o controle dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor (Ensaios 3, 5 e 7) reduziu significativamente as correntes de *inrush* no transformador. As magnitudes das correntes atingiram valores tão baixos (Ensaio 3) que não foi possível registrar as formas de onda das mesmas.

No Ensaio 1, embora o dispositivo controlador estivesse ativado, o fluxo residual não tinha sido medido durante a desenergização do transformador. Nesta circunstância, o dispositivo assume um valor nulo para o fluxo residual, com os instantes de fechamento dos pólos sendo realizado com base nesta informação. Desta maneira, a energização do transformador não foi realizada conforme a estratégia desenvolvida, embora os instantes de fechamento dos pólos do disjuntor tenham sido disparados pelo dispositivo. Neste Ensaio, a corrente medida atingiu um pico de aproximadamente 600 A.

Na Figura 5 estão mostradas as tensões nos terminais de 138kV do transformador 04T3 nos Ensaios 1, 3, 5 e 7, durante os instantes iniciais da sua energização. Uma análise das formas de onda das tensões no Ensaio 1 indica que o primeiro pólo fechado foi o da fase A. Na seqüência, os outros dois pólos foram fechados praticamente no mesmo instante, aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ciclo após do fechamento do primeiro pólo do disjuntor. O nível de distorção apresentado nas tensões das fases B e C indica que houve saturação nas colunas correspondentes àquelas fases, o que pode ser confirmado pelas magnitudes das correntes de *inrush* apresentadas (Figura 4, Ensaio 1). Notar que a tensão na fase A não apresentou distorções apreciáveis, indicando que a correspondente coluna do núcleo ferromagnético não atingiu a saturação.

No Ensaio 3, a energização do transformador 04T3 foi realizada de acordo com a estratégia desenvolvida, ou seja, com os instantes de fechamento dos pólos do disjuntor de 230kV considerando, neste caso, o fluxo residual medido durante a desenergização do transformador (Ensaio 2), cuja forma de onda pode ser vista na Figura 8. Observa-se que, neste caso, as correntes de *inrush* no transformador 04T3 apresentaram valores desprezíveis, não chegando sequer a serem detectadas pelo instrumento utilizado na medição. Isto indica que não houve saturação das colunas do núcleo do transformador, o que pode ser confirmado (também) pelas formas de onda das tensões de 138kV (Figura 5), as quais, praticamente, não apresentaram distorções.

Os resultados do Ensaio 3 demonstraram claramente o sucesso da estratégia utilizada para se energizar transformadores de forma suave, sem a ocorrência de altas correntes de *inrush*, reduzindo, conseqüentemente, os distúrbios decorrentes desse tipo de manobra.

Os Ensaios 5 e 7 foram realizados para testar a robustez da estratégia de controle desenvolvida. Em ambos os ensaios, o fechamento do disjuntor foi realizado controladamente, sempre levando em consideração os valores dos fluxos residuais medidos durante a desenergização do transformador (ver formas de ondas da tensão na Figura 8, Ensaios 4 e 6, respectivamente). É importante ressaltar que o fluxo residual que permanece no núcleo ferromagnético após a desenergização do transformador é calculado com base na integral, no tempo, das tensões medidas nos terminais do mesmo, as quais decaem durante a desenergização. O valor desse fluxo irá determinar o instante de fechamento dos pólos do disjuntor na próxima energização do transformador.

Nos Ensaios 5 e 7, os maiores valores de pico das correntes ficaram abaixo de 210A e 90A, respectivamente, as quais correspondem a menos da 50% e 20% do pico da corrente nominal do transformador, o que correspondente a menos da metade do pico da corrente nominal do transformador manobrado ($251 \times \sqrt{2} = 434$ A). Diante das imprecisões inerentes à operação de manobra de disjuntores, estes resultados têm sido considerados bastantes satisfatórios, uma vez que a corrente de *inrush* ficou abaixo da corrente nominal do transformador.

A Figura 6 mostra as formas de onda das correntes de *inrush* e as tensões de 138kV nos terminais do transformador 04T3 durante a sua energização sem o dispositivo de controle dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor de 230kV (Ensaio 9), ou seja, neste ensaio, o fechamento do disjuntor ocorreu normalmente, com seus pólos sendo fechados aleatoriamente. Observa-se que as correntes de *inrush* do transformador 04T3 apresentaram altas magnitudes, com a fase C atingindo um pico de mais de 1.100 A, o que corresponde à aproximadamente 250% do pico da corrente nominal do transformador. Isto indica a ocorrência de altos níveis de saturação nas colunas do núcleo ferromagnético do transformador.

Uma análise das formas de onda das tensões de 138kV mostradas na Figura 6 indica que o disjuntor de 230kV fechou seus pólos praticamente no mesmo instante. O nível de distorção apresentado nas tensões das fases B e C comprova o alto nível de saturação ocorrida nas colunas ferromagnéticas associadas àquelas fases. A tensão na fase C apresentou a maior distorção, indicando que a coluna correspondente a esta fase atingiu o maior nível de saturação.

A Figura 7 mostra as formas de onda das correntes e tensões associadas ao transformador 04T2 durante a energização do transformador 04T3 no Ensaio 9. Observa-se, pela distorção apresentada nas correntes das fases B e C, que as colunas do núcleo do transformador 04T2 também saturaram, notadamente a coluna da fase C, com a corrente naquela fase apresentando a maior distorção. Isto indica a ocorrência do fenômeno da interação simpática entre os transformadores [3-5], com o decaimento das correntes de *inrush* tornando-se relativamente lento (Figura 4). É importante ressaltar que as correntes medidas no transformador 04T2 correspondem à soma da corrente de carga e de magnetização daquele transformador.

As distorções das formas de onda das tensões mostradas na Figura 7 indicam a ocorrência de um impacto significativo na qualidade da tensão do sistema elétrico durante a energização do transformador 04T3 da Subestação Eunápolis sem o controle do fechamento dos pólos do disjuntor. Na ocasião desta manobra, os operadores daquela Subestação observaram um afundamento apreciável na tensão do sistema e a partida do relé de neutro de um dos transformadores da Subestação Itapebi, próxima a Subestação Eunápolis.

7.0 - CONCLUSÕES

A eficácia e a robustez da estratégia de chaveamento controlado de transformadores trifásicos desenvolvidas no Projeto CHESF de P&D foram comprovadas através dos vários ensaios realizados com o transformador 04T3 da Subestação Eunápolis, cujos resultados foram mostrados neste Informe Técnico. Esses resultados não deixam dúvidas sobre o sucesso dos procedimentos desenvolvidos no referido Projeto.

O dispositivo utilizado nos ensaios de campo, ainda em desenvolvimento pela ABB, apresenta grande semelhança, em sua concepção e metodologia, com os princípios físicos que nortearam os procedimentos idealizados e implementados em laboratório no desenvolvimento do Projeto CHESF de P&D. Outras estratégias para chaveamento controlado de transformadores trifásicos foram desenvolvidas e serão oportunamente testadas.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados sem o controle dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor evidenciaram os fenômenos que produzem altos níveis de correntes transitórias de magnetização (*inrush*) nos transformadores. Além de picos com altas magnitudes, estas correntes apresentam assimetrias significativas, componentes harmônicos de todas as ordens (inclusive a de corrente contínua) e um amortecimento relativamente lento devido à interação simpática entre os transformadores. Com estas características, essas correntes podem causar consideráveis impactos no sistema elétrico, tais como os afundamentos momentâneos de tensão, as distorções da forma de onda de tensão com sobretensões harmônicas temporárias, os estresses relacionados com os esforços mecânicos internos ao transformador, altas correntes em bancos de capacitores e neutro de transformadores, etc., os quais podem, perfeitamente, ser contornados com a aplicação da técnica desenvolvida.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] YACAMINI, R. e BRONZEADO, H. S., "Transformer inrush calculations using a coupled electromagnetic model", *IEE Proc. - Science, Measurements and Technologies*, Vol. 141, No. 6, pp. 491-498, Nov. 1994.
- [2] HAYWARD C.D., "Prolonged Inrush Currents with Parallel Transformers Affect Differential Relaying", *AIEE Trans.*, Vol. 60, pp. 1096-1101, Jan. 1941.
- [3] BRONZEADO H. S., "Transformer Interaction Caused by Inrush Current", MSc Thesis, University of Aberdeen (Scotland), April 1993.
- [4] BRONZEADO H. S. e YACAMINI R., "Phenomenon of Sympathetic Interaction Between Transformers Caused by Inrush Current", *IEE Proc. - Science, Measurements and Technologies*, Vol. 142, No. 4, July 1995.
- [5] BRONZEADO H. S e FERANDEZ, P. C. "Sympathetic Interaction Between Transformers - A Potential Source of Disturbances in Electric Power System", VI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE, CIGRÉ-Brasil, Salvador, 24-29 maio, 1998.