



GRUPO V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS TC'S SOB CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Roger Garcia Almeida*

UFU

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

UFU

Adeon Cecílio Pinto

UFU

RESUMO

O informe técnico consiste em apresentar os resultados de um estudo das correntes de neutro na conexão dos TC's quando em seus secundários apresentam ou não um certo nível de desequilíbrio, durante o processo de Energização de um Transformador de Potência. Tais correntes, de acordo com relatos e constatações através de ensaios realizados em laboratório, podem ocasionar o desligamento e interrupções causando grandes prejuízos. Visando ilustrar esse trabalho, apresentam-se resultados de simulações utilizando a plataforma computacional ATP. Por fim, são mostradas de forma conclusiva algumas alternativas para evitar que a proteção de corrente de neutro seja sensibilizada de maneira inadequada.

PALAVRAS-CHAVE

Correntes de Inrush, Ground Sensor, TC's, ATP.

1.0 - INTRODUÇÃO

A utilização de transformadores de corrente em sistemas de proteção de unidades geradoras e subestações tem sido feito há cerca de um século com total sucesso. Neste meio tempo, tornou-se necessário efetuar-se sucessivas modificações no projeto desses dispositivos devido à própria evolução do sistema elétrico de potência de alta e extra-alta tensão. Com crescimento da necessidade de transmitir grandes blocos de energia sem que haja qualquer alteração que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica para manter a Qualidade da Energia Elétrica, torna-se necessário:

- A eliminação rápida das faltas;
- Confiabilidade e eficiência da atuação da proteção;
- Aumento das correntes de curto-circuito.

Isto exige que, durante a ocorrência de uma falta, os relés devam ser corretamente sensibilizados, mesmo considerando as situações adversas como interrupções de natureza permanente ou transitória que afetam o desempenho da transmissão, distribuição e utilização da Energia Elétrica (1).

As correntes de falta apresentam duas componentes: uma alternada senoidal e a outra contínua com decréscimo exponencial, a qual pode levar o núcleo dos transformadores a uma forte saturação, distorcendo de forma acentuada a corrente secundária fornecida a instrumentos de medição (amperímetros etc.) e proteção (relés, por exemplo), durante os primeiros ciclos, e, deste modo, ocasionar alguns problemas:

- a. Os relés são sensibilizados quando não deveriam ser;
- b. Os relés não são sensibilizados quando deveriam ser;

*** Universidade Federal de Uberlândia (UFU) / Faculdade de Engenharia Elétrica
Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos e Qualidade da Energia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N, 38.400-902 Uberlândia-MG.
E-mail: rogerengeletrica@uol.com.br**

- c. Os relés não são sensibilizados com a rapidez suficiente desejada para evitar certas anormalidades, como por exemplo, instabilidade do sistema elétrico.

Esses problemas implicam numa perda de seletividade na proteção, ocasionando maiores prejuízos na continuidade de serviço (**a**, **b** e **c**) ou perdas de estabilidade do sistema e uma maior extensão dos danos de natureza térmica e eletrodinâmica (**b** e **c**).

Constatações em campo e através de ensaios realizados em laboratórios mostraram que correntes de neutro, com intensidades e durações capazes de sensibilizar os relés de proteção, podem aparecer durante a energização de transformadores ligados em triângulo ou estrela isolada (2) e (3). Sabe-se que nessas situações não há circulação de corrente de seqüência zero no circuito primário dos TC's, portanto, as mesmas só estão presentes no circuito secundário. Este fato motivou a realização de estudos sobre o comportamento dos TC's com vistas ao esclarecimento dos motivos que proporcionaram o aparecimento de correntes de neutro no circuito secundário dos TC's. Para tanto, foram realizados testes em laboratórios e simulações computacionais utilizando programa ATP (Alternative Transients Program) (4), os quais mostraram que o aparecimento da corrente de neutro no circuito secundário dos TC's não estaria vinculado somente às características dos TC's, mas também à condição de desbalanceamento das impedâncias conectadas nos secundários dos TC's. Desta forma, afim de ressaltar o fato do desbalanceamento de impedâncias, foram tomadas precauções para que não houvessem possibilidades de saturações dos TC's empregados nos testes.

Este trabalho apresenta algumas alternativas que permitem a redução ou mesmo a eliminação das correntes de neutro nas situações enfocadas e com isso elevar consideravelmente a sensibilidade dos relés de proteção.

2.0 - MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO NO ATP

O programa ATP possui intrinsecamente modelos de diversos componentes do sistema elétrico os quais têm sido amplamente utilizados pelos seus usuários em diferentes situações de chaveamentos. Assim, para o estudo proposto à modelagem do sistema elétrico foi feita com base nos modelos já existentes no ATP e esta se procedeu da seguinte forma:

- Fonte de Tensão: utilizou-se uma fonte de tensão trifásica ideal em série com a impedância representativa do nível de curto-circuito do sistema elétrico;
- Transformador de Potência: para a representação do transformador de potência trifásico com ligação Y-Y empregou-se um banco de transformadores monofásicos saturáveis, cuja característica de magnetização foi levantada com base na curva de magnetização do material magnético do núcleo do transformador. O modelo de transformador monofásico saturável consiste de um transformador ideal de dois enrolamentos associado às impedâncias de dispersão e um reator saturável representando a não linearidade do circuito magnético, conforme mostra a figura 1.
- Transformador de Corrente: os transformadores de corrente foram representados pelo modelo de transformador saturável utilizado para o transformador de potência sendo seus parâmetros determinados de acordo com os dados obtidos de ensaios do equipamento. Nesse caso, optou-se por utilizar os mesmos parâmetros para os três TC's evitando-se dessa forma que qualquer discrepância entre os equipamentos pudessem interferir nos resultados. Dessa forma, o erro proporcionado pelos TC's será somente devido a sua condição de saturação. Esse modelo não contempla o ciclo de histerese, pois para os interesses deste estudo, este pode ser desconsiderado (5).
- Disjuntor: cada pólo do disjuntor foi representado por uma chave de tempo controlado. Esse fato permitiu reproduzir com grande aproximação a situação de fechamento do disjuntor durante a energização do transformador nos ensaios laboratoriais.

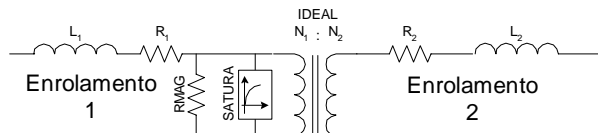


FIGURA 1. Monofásico com dois enrolamentos.

Como se observa, ambos enrolamentos **1** e **2** possuem uma impedância de dispersão associada aos mesmos, caracterizadas pelas resistências R_1 e R_2 e as indutâncias L_1 e L_2 , porém, o efeito da saturação do ramo de magnetização está confinado a um reator não linear "SATURA" no circuito do enrolamento **1**.

2.1 Testes Experimentais e Simulações

Na figura 2 é apresentado o diagrama do sistema estudado. Os testes experimentais tiveram por objetivo avaliar a possibilidade da operação indevida da proteção de corrente de neutro durante a energização de transformadores. A situação criada no laboratório e comprovada nas simulações computacionais retrata a energização de um

transformador ligado em estrela isolada que não admite corrente de seqüência zero no primário dos TC's. As alternativas que poderão conduzir ao aparecimento dessas correntes no secundário dos TC's são:

- Elevados picos da corrente de energização, elevando os TC's à condição de Saturação;
- Desbalanceamento das cargas no circuito secundário dos TC's associado às correntes também desbalanceadas, proporcionando correntes de seqüência zero.

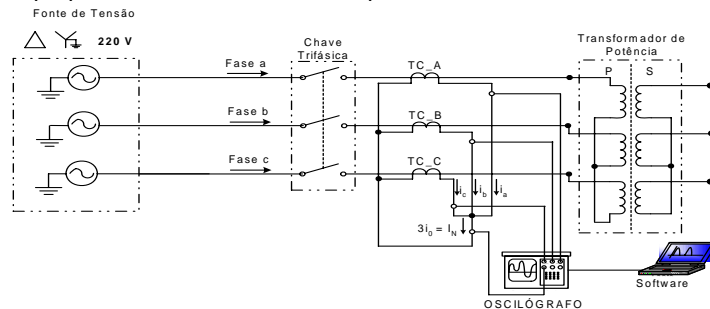


FIGURA 2. Diagrama do sistema em estudo.

Para a realização dos ensaios utilizou-se:

- Fonte de alimentação trifásica de 220 V e chave trifásica para a realização da energização;
- Três transformadores de corrente de relação de 50:5A, 15VA e classe de exatidão de 0,2% do fabricante YOKOGAWA Electric Works LTDA;
- Transformador Trifásico de um nível de tensão de 220 [V] e de potência nominal de 15 [kVA], com os enrolamentos ligados em estrela;
- Oscilógrafo, para registrar os efeitos dos transitórios do fabricante REASON;
- Microcomputador, ferramenta onde está instalado o software, onde visualiza-se as formas de onda capturadas do Oscilógrafo.

2.2 Metodologia Utilizada

Objetivando a observar os fenômenos transitórios, tanto os ensaios experimentais quanto as simulações computacionais obedecem a seguinte metodologia:

- O transformador é energizado a partir do fechamento das chaves;
- Os fenômenos transitórios são registrados e sua atenção ficou totalmente voltada para os efeitos das correntes de neutro nos secundários das conexões dos TC's;
- Os ensaios foram realizados **com** e **sem** desequilíbrios das cargas nos enrolamentos secundários dos TC's.

3.0 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Obedecendo a metodologia anteriormente estabelecida, os ensaios experimentais e simulações computacionais são descritos conforme ilustrado na Tabela 1.

Observa-se que os fenômenos estudados possuem fortes dependências com os parâmetros do sistema elétrico (resistência, indutância, curva de magnetização do transformador, fluxo residual, condições de chaveamento e instantes de fechamento de cada pólo do disjuntor), e como a modelagem utilizada para o transformador não permite a representação do fluxo residual, todos os ensaios e simulações são realizados com o fluxo nulo.

TABELA 1. Descrição dos casos estudados.

Caso	DESCRIÇÃO	Impedância no Secundário Dos TC's [Ω]		
		Fase A	Fase B	Fase C
		Z_a	Z_b	Z_c
A	Energização do transformador de potência com desequilíbrios das cargas nos TC's	0,180	0,220	0,200
B	Energização do transformador de potência com desequilíbrios das cargas nos TC's	0,140	0,260	0,200
C	Energização do transformador de potência com desequilíbrios das cargas nos TC's	0,100	0,300	0,200
D	Energização do transformador de potência com desequilíbrios das cargas nos TC's	0,450	0,120	0,220
E	Energização do transformador de potência sem desequilíbrios das cargas nos TC's	0,100	0,100	0,100

Caso A

Cálculo do valor de desequilíbrio

$$Z_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{0,180 + 0,220 + 0,200}{3} \therefore Z_{\text{m\u00e9dio}} = 0,2\Omega, \text{ onde } \Delta Z = 0,02\Omega.$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{m\u00e9dio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,02\Omega}{0,2\Omega} \times 100 \therefore D(\%) = 10,00$$

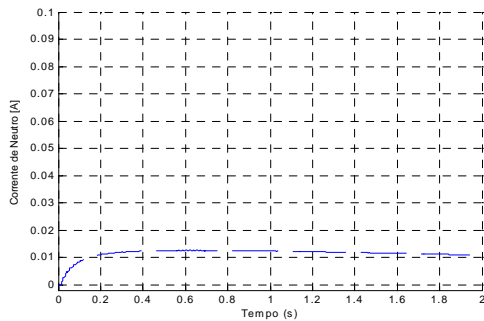


FIGURA 3a. Corrente de neutro - Ensaio Experimental

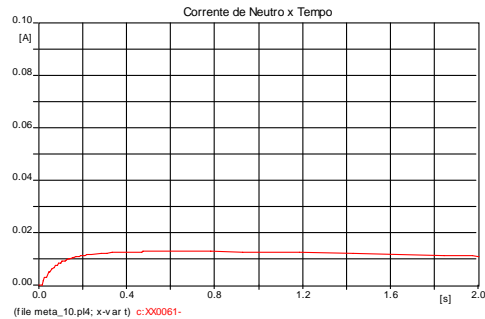


FIGURA 3b. Corrente de neutro - Ensaio Computacional

Caso B

C\u00e1lculo do valor de desequil\u00edbrio

$$Z_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{0,140 + 0,260 + 0,200}{3} \therefore Z_{\text{m\u00e9dio}} = 0,2\Omega, \text{ onde } \Delta Z = 0,06\Omega.$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{m\u00e9dio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,06\Omega}{0,2\Omega} \times 100 \therefore D(\%) = 30,00$$

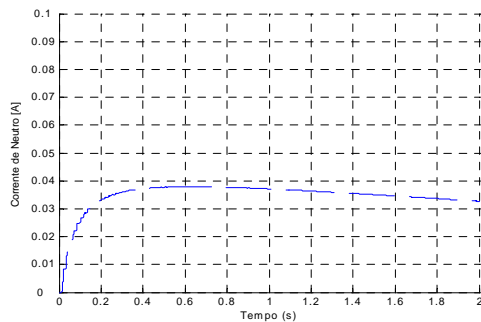


FIGURA 4a. Corrente de neutro - Ensaio Experimental

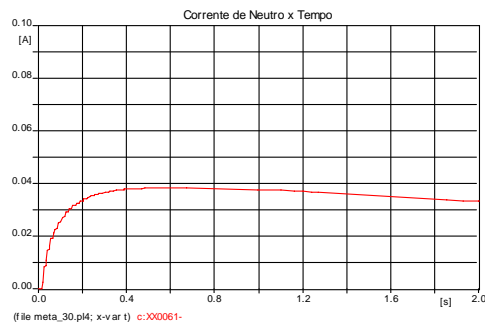


FIGURA 4b. Corrente de neutro - Ensaio Computacional

Caso C

C\u00e1lculo do valor de desequil\u00edbrio

$$Z_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{0,100 + 0,300 + 0,200}{3} \therefore Z_{\text{m\u00e9dio}} = 0,2\Omega, \text{ onde } \Delta Z = 0,1\Omega.$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{m\u00e9dio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,1\Omega}{0,2\Omega} \times 100 \therefore D(\%) = 50,00$$

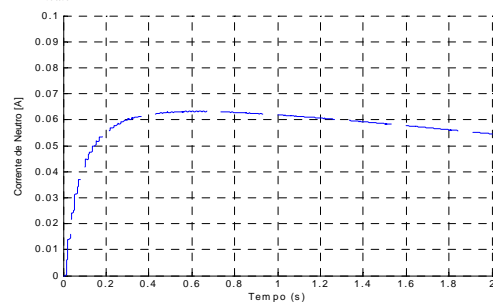


FIGURA 5a. Corrente de neutro - Ensaio Experimental

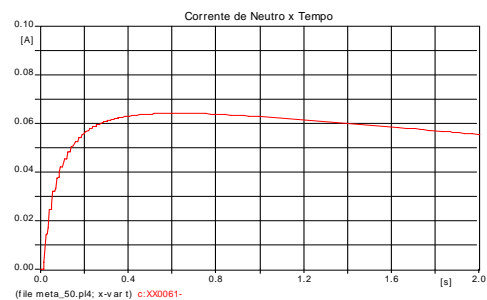


FIGURA 5b. Corrente de neutro - Ensaio Computacional

Caso D

Cálculo do valor de desequilíbrio

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,450 + 0,112 + 0,220}{3} \therefore Z_{\text{médio}} = 0,2633\Omega, \text{ onde } \Delta Z = 0,18667\Omega.$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,18667\Omega}{0,2633\Omega} \times 100 \therefore D(\%) = 70,89$$

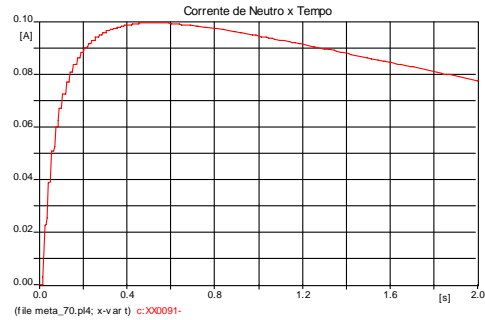
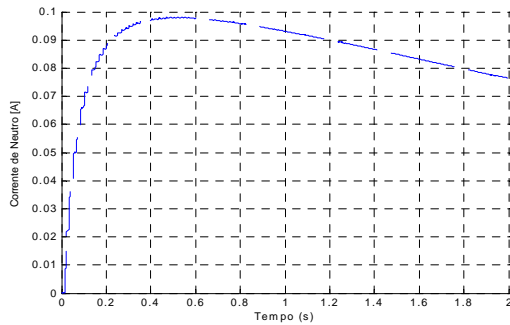


FIGURA 6a. Corrente de neutro - Ensaio Experimental FIGURA 6b. Corrente de neutro - Ensaio Computacional

Caso E

Cálculo do valor de desequilíbrio

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,100 + 0,100 + 0,100}{3} \therefore Z_{\text{médio}} = 0,100\Omega, \text{ onde o maior desvio em relação ao valor médio}$$

$$\Delta Z = 0\Omega.$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0\Omega}{0,100\Omega} \times 100 \therefore D(\%) = 0,00$$

Neste caso, os valores da corrente de retorno pela terra medido e simulado são nulos.

3.1 Resultados dos Ensaios

Através da inspeção visual das figuras anteriormente apresentadas torna-se possível o estabelecimento de termos comparativos entre os resultados obtidos através dos diferentes ensaios experimentais e simulações computacionais efetuados. Vale ressaltar que os aspectos qualitativos e quantitativos das correntes transitórias são fortemente influenciados por variáveis como:

- Fluxo residual e a curva real de saturação do material magnético dos transformadores de potência;
- Parâmetros resistivos, indutivos, do sistema elétrico;
- Momento exato em que acontecem as energizações;
- Origem e nível dos desequilíbrios das cargas alimentadas pelos TC's e respectivos cabos de conexão.

Sobre esses aspectos, é importante salientar que, nas simulações computacionais, procurou-se sempre repetir as mesmas condições dos ensaios experimentais.

A tabela 2 representa em síntese os resultados experimental e computacional dos casos estudados anteriormente.

TABELA 2. Comparação das correntes de neutro entre o ensaio Experimental versus Computacional.

COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS			
CASO	Valor Máximo da Corrente de Neutro [A]		Diferença Percentual entre o Ensaio Computacional e Experimental (%)
	Ensaio Experimental	Ensaio Computacional	
A	0,0126	0,0128	1,504
B	0,0380	0,0385	1,528
C	0,0633	0,0642	1,534
D	0,0980	0,0996	1,529
E	0,0000	0,0000	0,000

4.0 - ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE NEUTRO NOS TC'S

São apresentadas algumas alternativas que uma vez estudadas e devidamente aplicadas, permitirão consideravelmente a sensibilidade da proteção contra correntes de neutro, durante a energização de um transformador de potência e, com isso, proporcionar minimização de sérios inconvenientes tão comuns nos sistemas de distribuição de energia elétrica que atualmente acontecem. Os métodos que serão mostrados são:

- Diminuição do nível de desequilíbrio nos secundários dos TC's;
- Utilização do "Ground Sensor".

4.1 Diminuição do nível de desequilíbrio nos secundários dos TC's

Uma solução que possa ser atribuída a fim de reduzir o nível de desequilíbrio é a adição de uma impedância a mais em cada secundário dos TC's, desta forma, o nível de desequilíbrio diminuiria em relação ao atual. Serão efetuados aqui os mesmos casos estudados anteriormente, porém, com o acréscimo de uma impedância de $0,2 \Omega$ aos enrolamentos secundários dos TC's, ilustrado na Tabela 3.

TABELA 3. Descrição dos ensaios realizados.

Caso	Descrição
1	Idem ao Caso A apresentado no item anterior, porém, com adição de uma impedância de $0,2 \Omega$ no enrolamento secundário dos TC's.
2	Idem ao Caso D apresentado no item anterior, porém, com Adição de uma impedância de $0,2 \Omega$ no enrolamento secundário dos TC's.

Caso 1

Impedância no Secundário dos TC's

Fase A
 $Z_a = 0,380\Omega$

Fase B
 $Z_b = 0,420\Omega$
Corrente de Neutro x Tempo

Fase C
 $Z_c = 0,400\Omega$

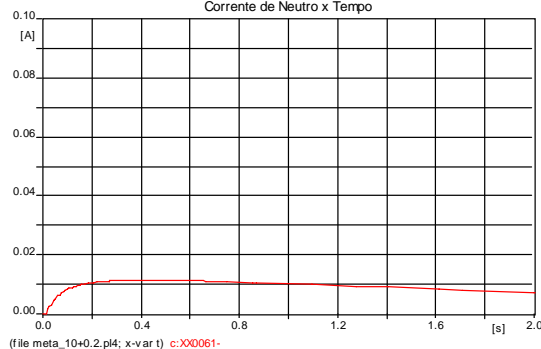


FIGURA 7. Corrente transitória de neutro [A] - Ensaio Computacional.

Caso 2

Impedância no Secundário dos TC's

Fase A
 $Z_a = 0,650\Omega$

Fase B
 $Z_b = 0,320\Omega$

Fase C
 $Z_c = 0,420\Omega$

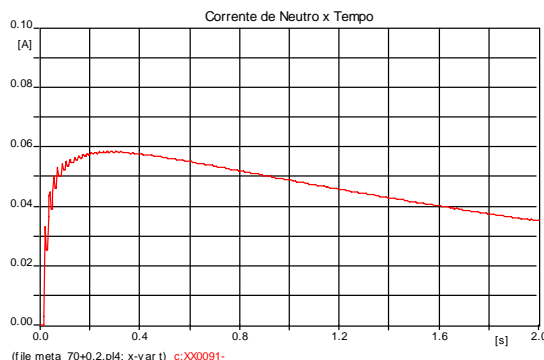


FIGURA 8 - Corrente transitória de neutro [A] - Ensaio Computacional

4.2 Utilização do Ground Sensor

Uma outra alternativa para evitar as correntes de neutro indevidas é a utilização de um "Ground Sensor", também conhecido como sensor de seqüência zero. Esse equipamento consiste em um simples TC toroidal com uma

janela grande o bastante para acomodar os três condutores das três fases (6). A figura 9 mostra o sistema elétrico utilizado para a simulação da energização do transformador no qual foi acrescentado um “ground sensor” (GS).

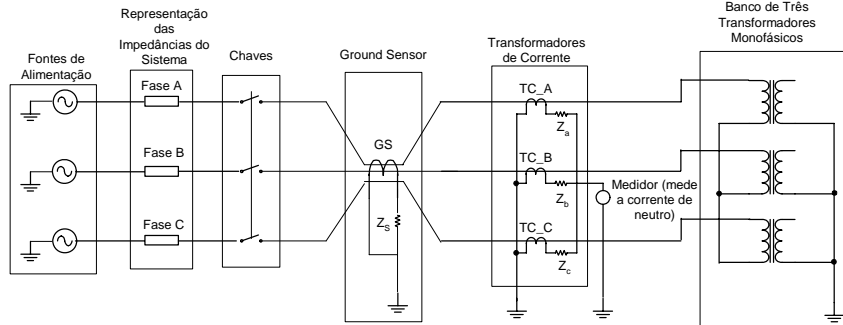


FIGURA 9. Utilização do “ground sensor” no diagrama do sistema em estudo.

4.2.1 Implementação do *Ground Sensor*

A implementação do “ground sensor” no ATP baseou-se no fato de que a força magneto motriz (fmm) geradora de fluxo magnético no núcleo do TC é obtida pela somatória das fmm's produzidas em cada fase, ou seja, pela somatória das correntes nas fases. Assim, com auxílio da TACS criou-se uma fonte de corrente igual à somatória das correntes nas três fases da chave utilizada para energização do transformador de potência. Tal fonte de corrente é aplicada ao modelo de transformador saturável usado na modelagem dos TC's. Com isto tem-se a modelagem de um “ground sensor” com relação de 50/5 A com a mesma características de magnetização dos TC's convencionais.

A seguir apresenta-se o resultado das correntes de neutro obtido pela simulação na qual a impedância de carga do “ground sensor” é $Z_s = 0,480 \Omega$ e as impedâncias de carga dos TC's convencionais são aquelas relativas ao **Caso E**. Na figura 10 mostra-se a forma de onda da corrente de neutro (em vermelho) obtida pela associação dos três TC's e a corrente obtida pelo “ground sensor” (em azul).

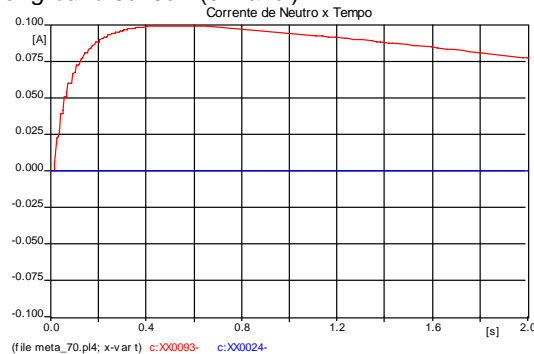


FIGURA 10 - Somatório das correntes no enrolamento da alta.

Como era esperado, a corrente no secundário do “ground sensor” é desprezível, observa-se que este fato ocorre independentemente do valor da impedância de carga do “ground sensor”.

4.3 Síntese dos Resultados

Comparando esses resultados com os outros ilustrados no **item 3.0**, tabela 4 apresenta os valores máximos das correntes de neutro obtidos nas simulações computacionais dos casos **A**, **B**, **1** e **2**.

TABELA 4. Correntes de Neutro e sua respectiva redução percentual devido à redução do nível de desequilíbrio ou utilização do Ground Sensor.

	Caso A			Caso 1			Caso D			Caso 2		
	$Z_a (\Omega)$	$Z_b (\Omega)$	$Z_c (\Omega)$	$Z_a (\Omega)$	$Z_b (\Omega)$	$Z_c (\Omega)$	$Z_a (\Omega)$	$Z_b (\Omega)$	$Z_c (\Omega)$	$Z_a (\Omega)$	$Z_b (\Omega)$	$Z_c (\Omega)$
	0,180	0,220	0,200	0,380	0,420	0,400	0,450	0,120	0,220	0,650	0,320	0,420
Valor do Desequilíbrio [D%]	10,00			5,00			70,89			40,17		
Máxima Corrente de Neutro (A)	0,0128			0,0996			0,0065			0,0585		

5.0 - CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios laboratoriais e simulações computacionais mostraram que durante a energização de um transformador ligado em estrela não aterrada ou triângulo, correntes de neutro podem surgir no circuito secundário dos TC's. Nesse sentido, observou-se o seguinte comportamento para essas correntes:

- As correntes de neutro são fortemente dependentes das correntes de energização do transformador (inrush). Sobre este aspecto, observando que as correntes de energização do transformador por sua vez, são dependentes de variações aleatórias como o fluxo residual do núcleo e o valor instantâneo da tensão no momento do chaveamento, fica evidente o caráter aleatório das correntes de neutro;
- Quando o circuito secundário dos TC's apresenta impedâncias balanceadas verificou-se a inexistência da corrente de neutro. Ressalta-se aqui que este fato está vinculado a não saturação dos TC's;
- Quando o circuito secundário dos TC's apresenta desbalanceamentos de impedância, verificou-se a existência da corrente de neutro, sendo estas mais acentuadas quanto maior for o nível de desbalanceamento dessas impedâncias. Nesse sentido, para evidenciar a dependência da corrente de neutro com o desbalanceamento das impedâncias do circuito secundário dos TC's, acrescentou-se um mesmo valor de impedância nas três fases desse circuito, de forma a reduzir o nível de desbalanceamento e comprovou-se através de simulação a redução da corrente de neutro.

A evolução do sistema elétrico aliado à exigência de algumas cargas no que concerne à qualidade da energia elétrica tem exigido, cada vez mais, dos sistemas de proteção, maior rapidez e confiabilidade na sua operação. Atualmente, com a utilização de relés estáticos nos sistemas de proteção, tem-se reduzido muito as impedâncias de cargas conectadas aos secundários dos TC's. Assim, uma pequena impedância advinda das conexões dos terminais dos TC's e relés de proteção podem estabelecer um desbalanceamento de impedâncias no circuito formado pelos secundários dos TC's e proporcionar o aparecimento das correntes de neutro.

Os resultados e análises apresentados ao longo deste trabalho permitem concluir que os níveis e duração das correntes de neutro podem ser capazes de sensibilizar e fazer atuar de forma indevida o sistema de proteção.

Dentro deste contexto, foi considerado que, muito embora os estudos computacionais tenham esclarecido sobre a origem e natureza do fenômeno, apenas providências de campo deverão ser tomadas para a eliminação do ocorrido. Como formas para atenuar tais problemas recomenda-se, pois:

- Medição das impedâncias vista a partir dos secundários de cada TC e providências (limpezas de contato, re-apertos, substituição de cabos, etc.) para a redução das correntes de neutro;
- Ajuste das proteções de forma a compatibilizar o relé de neutro com as constatações de campo.
- Utilização do "ground sensor".

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a **CAPES** e **CNPq** pelo apoio financeiro.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CAMINHA, Amadeu, C.; "Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos", **Editora Edgar Blucher Ltda** - 1977.
- (2) LEMOS, A. M., OLIVEIRA, J. C., DELAIBA, A. C., LYNCE, M, R. C., OLIVEIRA, J. C. F., MEDEIROS, A. C. G "Experimental and Computational Investigations Related to CT's Neutral Current Arising from Inrush Phenomenon on Delta Connected Transformers", **V Induscon**, Salvador, BA, 2002.
- (3) GREENWOOD, A.; "Electrical Transients in Power Systems" - **Wiley Interscience**, 1971 - Chaper 5
- (4) LEUVEN EMTP CENTER (LEC) - "Alternative Transients Program (ATP)" - **RULE BOOK**, July/1987.
- (5) CONRAD, T.; OEDING, D. – "A method to Correct the Distorted Secondary Currents of Current Transformer" - **9th Power System Computation Conference**, 1987.
- (6) BALDWIN, B. Jr., TED, A. B., "Operation of Ground Sensor Relays Under Conditions of Partial CT Saturation", **IEEE Trans. Ind. Applicat.**, vol. 33, pp. 1111-1116, July/Aug. 1997.