



GRUPO V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GPC)

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM O EMPREGO DO ATP-EMTP

M. C. Tavares*

D. V. Coury

P. E. G. Campos

M.C. Lima

Depto Eng. Elétrica

EESC – Universidade de São Paulo

cristina, coury, guidetti@sel.eesc.sc.usp.br

UPE-CHESF

manfredo@chesf.gov.br

RESUMO

O presente informe técnico apresenta a análise do desempenho da proteção diferencial de um transformador trifásico de potência. Foi escolhido o ATP como ferramenta para a simulação das seguintes situações: faltas internas, faltas externas próximas ao transformador, energização do transformador e remoção de faltas externas. A atuação do relé diferencial de proteção foi implementada e estudada, empregando a subrotina TACS do ATP, e os resultados obtidos são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, TCs, Proteção Diferencial, ATP, TACS, Saturação.

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são equipamentos que requerem cuidados especiais de manutenção e operação devido a sua importância para o sistema elétrico ao qual estão conectados.

Para proteção contra faltas internas, utiliza-se o conhecido esquema denominado proteção diferencial, onde um relé diferencial realiza a comparação entre os sinais de corrente elétrica extraídos a partir da entrada e saída do transformador e de parâmetros predeterminados decide pelo desligamento do mesmo, caso haja a ocorrência de faltas em seu interior.

No entanto, a simples detecção de uma corrente diferencial não é suficiente para distinguir entre situações de faltas internas e outras situações onde não é desejado o seu desligamento, tais como energização do transformador, sobreexcitação, saturação dos transformadores de corrente (TCs), etc., onde correntes de magnetização de elevado conteúdo harmônico

podem provocar o surgimento de altas correntes diferenciais (1).

Uma solução para a adequada distinção entre faltas internas e demais situações consiste na combinação da característica diferencial com a restrição de harmônicos (2).

Entretanto, novas técnicas vem sendo empregadas com o objetivo de se aprimorar a seletividade, a velocidade e a sensibilidade dos relés diferenciais, destacando-se o emprego de redes neurais artificiais (3) e lógica *fuzzy* (4).

Deste modo, a simulação computacional das situações às quais o relé diferencial está submetido, tanto em regime permanente quanto em condições transitórias, é de grande importância para o desenvolvimento de sistemas de proteção mais eficientes e melhoria do desempenho daqueles já em operação, servindo como parâmetro para projetos baseados nas técnicas computacionais citadas anteriormente.

Neste artigo utilizou-se o ATP (Alternative Transients Program) (5) para a modelagem de um sistema elétrico de potência contendo, entre outros elementos, um transformador de potência e TCs. O ATP permite a representação detalhada de diversos elementos componentes de um sistema elétrico, além da modelagem das diversas manobras e defeitos que afetam o mesmo

Além disso, o ATP possui diversas subrotinas auxiliares, dentre as quais se destaca a TACS (Transient Analysis Control System), utilizada para a modelagem da característica do relé diferencial, permitindo a representação da sua atuação.

Assim, foram realizadas simulações das situações que o relé diferencial experimenta na prática, tais como faltas em seus enrolamentos internos, faltas externas

próximas ao transformador, energização e rejeição de cargas, permitindo a observação da atuação do relé diferencial em cada uma destas situações.

O artigo mostra alguns aspectos relacionados à proteção diferencial dos transformadores, e descreve as simulações realizadas, apresentando os mais relevantes resultados obtidos.

2 A PROTEÇÃO DIFERENCIAL

Ao longo do tempo, diversos métodos de proteção foram desenvolvidos de forma a evitar condições anormais de funcionamento dos sistemas de potência. No caso dos transformadores, utiliza-se a proteção diferencial, que consiste na aquisição das formas de onda de entrada e saída do transformador a partir de TCs acoplados em série com os ramos primário e secundário do sistema, conforme mostra a Figura 1.

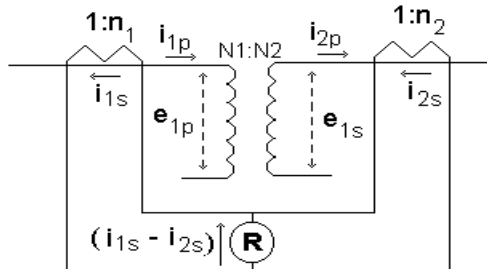


FIGURA 1. Esquema de um transformador monofásico, com conexão de relé de proteção diferencial.

O esquema mostra também a conexão dos TCs acoplados aos ramos primário e secundário. $N1:N2$ é a relação de transformação entre o primário e o secundário do transformador, e $1:n1$ e $1:n2$ são as relações de transformação entre os ramos e os TCs

Em condições normais de funcionamento e em caso de faltas externas, as correntes i_{1s} e i_{2s} (correntes de secundário dos TCs) serão iguais. Já no caso de faltas internas, a diferença entre essas correntes torna-se significativa, sensibilizando o relé de sobrecorrente.

Assim, a corrente diferencial

$$i_d = i_{1s} - i_{2s} \quad (1)$$

fornece uma medida precisa para a corrente de falta.

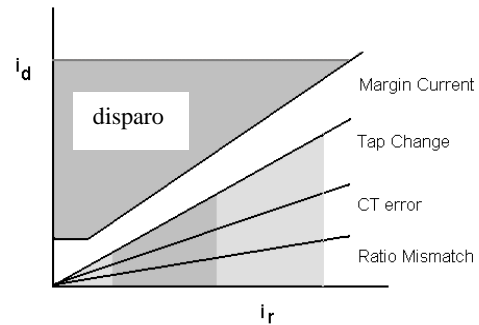
Para se corrigir pequenas imperfeições que surgem devido a ajustes no tape do transformador de potência e nos TCs, é fixada uma margem que a corrente diferencial deve atingir para que o relé atue, dada pela relação abaixo.

$$i_d \geq K \cdot (i_{1s} + i_{2s}) / 2 \quad (2)$$

onde K representa a inclinação percentual da característica diferencial. Assim, pequenas correntes diferenciais são permitidas, sem que o relé seja desativado.

A Figura 2 representa a característica do relé diferencial percentual, mostrando sua região de operação (disparo).

Alguns tipos de manobras realizadas com o transformador, bem como faltas externas próximas a ele fazem surgir correntes diferenciais cujos valores superam a corrente de margem, causando uma operação indevida da proteção diferencial. A seguir são descritas as principais causas do surgimento de correntes diferenciais indesejadas.



Corrente de margem

Mudança de tape

Erro do TC

Erro de transformação

FIGURA 2. Característica do relé diferencial percentual

2.1 Corrente de magnetização (corrente de inrush) durante a energização do transformador

Estas correntes aparecem durante a energização do transformador, devido à magnetização e à saturação do seu núcleo, sendo sua magnitude determinada pela declividade da característica de magnetização na região saturada. Nos transformadores de elevada potência, altas correntes de *inrush* podem ser atingidas.

Uma vez que o secundário permanece em aberto durante a energização do transformador, a corrente diferencial atinge valores suficientemente altos, a ponto de sensibilizar o relé diferencial, causando uma operação indesejável. Alguns autores (6) a (9) estudaram seu conteúdo harmônico, mostrando a predominância de componentes de 2ª harmônica.

2.2 Sobreexcitação do transformador

Durante rejeições de carga e outras condições de operação, o transformador pode estar sujeito a sobretensões em regime permanente. Nestas condições o transformador pode ser submetido a formas de onda distorcidas, compostas por harmônicos ímpares, particularmente de 3ª e 5ª ordem. Deste modo, o

transformador apresenta característica não linear, fazendo surgir correntes diferenciais não nulas e, conseqüentemente sensibilizando a proteção diferencial de forma não desejada.

2.3 Corrente de magnetização em decorrência da remoção de falta próxima ao transformador

Quando uma falta externa próxima ao transformador é removida, surge uma situação similar a aquela encontrada durante a energização do transformador.

Como a tensão aplicada aos enrolamentos do transformador passa de um valor pré-falta para um valor pós-falta, o fluxo concatenado também se comporta do mesmo modo, e, dependendo do instante no qual a falta é removida, esta transição leva à produção de uma componente CC no fluxo concatenado. Deste modo, as formas de onda de corrente primária serão similares às correntes de *inrush* obtidas durante a energização do transformador.

Deve ser notado que como não há fluxo remanescente no núcleo do transformador durante este processo, as correntes de *inrush* para este caso são menores do que no caso de energização.

2.4 Saturação dos TCs

Para certas faltas externas, onde as correntes de falta são elevadas, é provável que o TC próximo à falta sature, criando mais uma vez uma corrente diferencial indesejada.

3 ESTUDOS REALIZADOS

3.1 O Sistema elétrico de potência

Na Figura 3 é apresentado o diagrama simplificado do subsistema representado nas simulações do ATP.

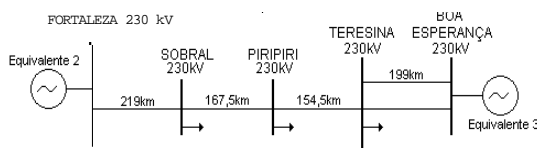


FIGURA 3 – Diagrama unifilar simplificado do subsistema Norte da CHESF

Na Figura 4 é apresentado o diagrama simplificado do regional de Teresina onde foram efetuadas as manobras.

Modelamos a proteção diferencial dos transformadores de Teresina T3 e T4 (100 MVA), sendo que as manobras e os defeitos foram realizados no transformador T4 e na barra de 69 kV. Observamos o sinal de disparo dos relés associados aos transformadores T3 e T4, como apresentado nos gráficos a seguir.

O modelo utilizado para a representação das faltas internas é mostrado na Figura 5. As simulações das

faltas são obtidas dividindo-se os enrolamentos e as impedâncias de acordo com as seções onde as mesmas são aplicadas, através da inclusão de chaves para a terra, como mostrado na Figura 5.

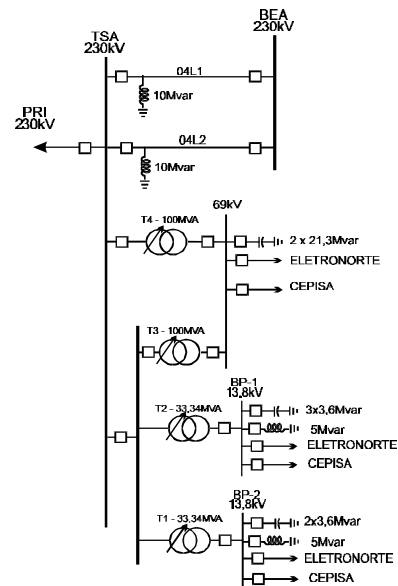


FIGURA 4. Diagrama unifilar simplificado do regional de Teresina

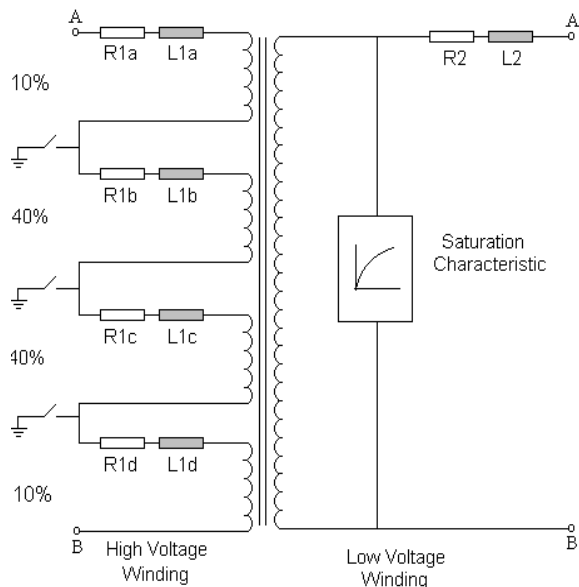


FIGURA 5. Modelo do enrolamento em curto

3.2 Implementação do relé diferencial

Para a modelagem do relé diferencial foi utilizada a subrotina TACS. Assim, as correntes provenientes dos TCs em cada fase foram tomadas, sendo em seguida realizada a correção do ângulo de 30° devido a conexão em delta-estrela do transformador de potência. A partir daí a lógica do relé pode ser implementada de acordo com a equação 2. O relé

diferencial passou a apresentar característica semelhante à da Figura 2, comportando-se como desejado. No caso da corrente diferencial encontrar-se na região de disparo o relé (TACS) envia ordem para as chaves retirarem o transformador.

3.3 Transformador de Corrente

Um dos aspectos analisados neste estudo consiste na possível saturação dos TCs, o que pode resultar em correntes diferenciais indesejadas. Para tanto os TCs foram modelados com e sem saturação para os dois transformadores observados.

A Figura 7 apresenta a curva de saturação dos TCs.

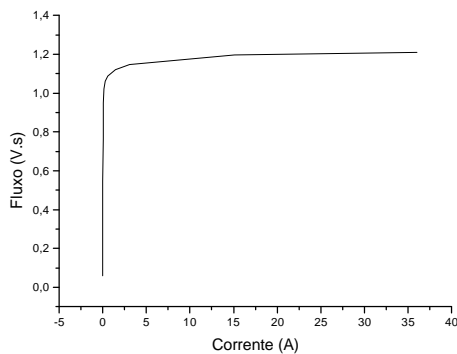


FIGURA 7. Curva de Saturação dos TCs

4 RESULTADOS OBTIDOS

A seguir são mostrados os resultados obtidos nas simulações realizadas. São apresentadas as formas de onda das correntes diferenciais e também o sinal de disparo do relé diferencial, para os casos onde houve a sua atuação. Para a obtenção das formas de onda das correntes diferenciais até o final da simulação, foi realizado o bloqueio da atuação do relé diferencial, pois de outra forma as ondas de corrente seriam nulas após a retirada do transformador, após o sinal de disparo. Para cada um dos casos estudados o TC foi representado com e sem saturação. No sistema estudado e para as simulações efetuadas os TCs não saturaram, apesar de relatado em (1), portanto somente os casos com saturação do TC serão apresentados.

4.1 Energização do transformador

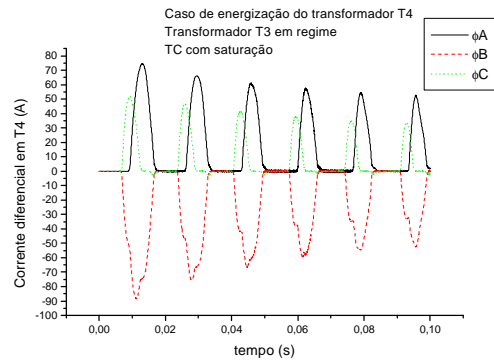


FIGURA 8 – Corrente diferencial em T4

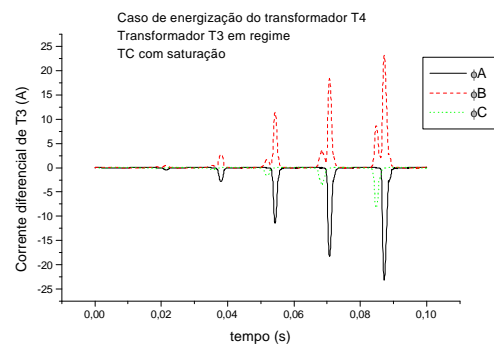


FIGURA 9 – Corrente diferencial em T3

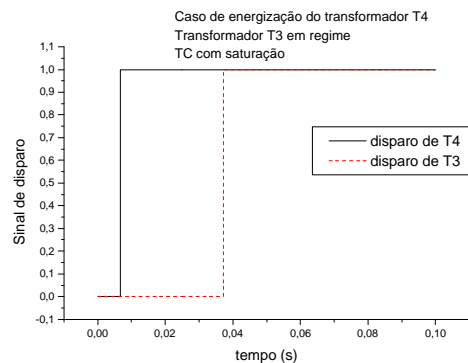


FIGURA 10 – Sinal de disparo de T3 e T4

4.2 Falta Interna

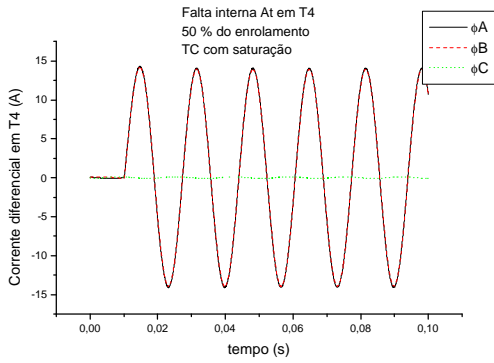


FIGURA 11 – Corrente diferencial em T4

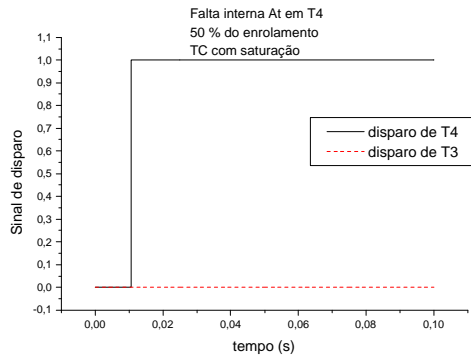


FIGURA 12 – Sinal de disparo de T3 e T4

4.3 Falta monofásica externa

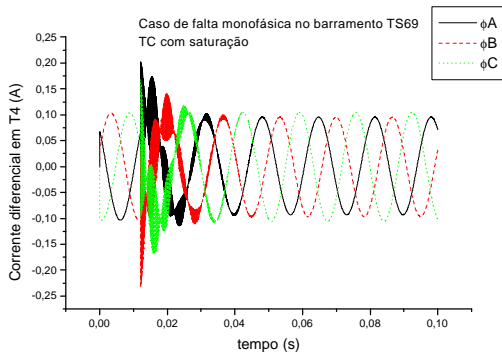


FIGURA 13 – Corrente diferencial em T4

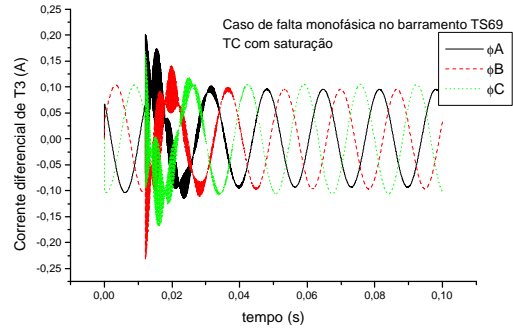


FIGURA 14 – Corrente diferencial em T3

4.4 Falta trifásica externa envolvendo a terra

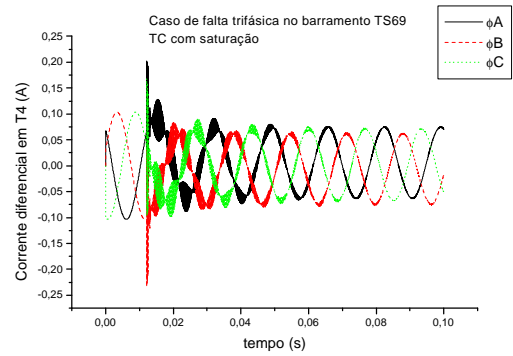


FIGURA 15 – Corrente diferencial em T4

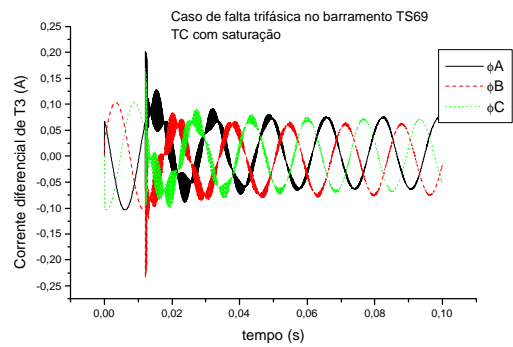


FIGURA 16 – Corrente diferencial em T3

4.5 Rejeição de carga

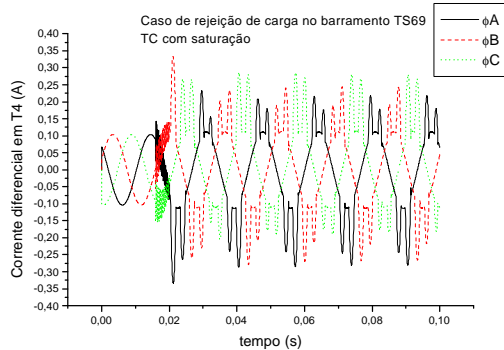


FIGURA 17 – Corrente diferencial em T4

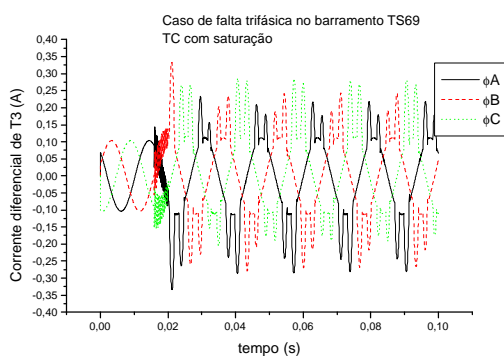


FIGURA 18 – Corrente diferencial em T3

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para o sistema analisado os casos simulados que sensibilizaram a proteção diferencial, correta e erroneamente restringiram-se ao de falta interna e à energização do transformador. Para os demais, apesar de existir a possibilidade de os TCs saturarem nos casos de falta próxima ao barramento onde estiver conectado, ou no caso de rejeição de carga, isto não ocorreu para o sistema CHESF analisado.

Com relação ao caso de energização, representamos o relé sem nenhum filtro, apesar de existirem na prática, como o de 2ª harmônica, para restringir a operação indevida nestes casos. Esta restrição está sendo implementada em nosso modelo.

No caso de falta interna o sinal de disparo ocorreu corretamente para o transformador sob falta, T4.

Deste modo, para o projeto adequado da proteção diferencial, devem ser levados em conta os casos de atuação indevida, implementando-se mecanismos eficientes para se evitar uma atuação indesejada do relé diferencial.

6 CONCLUSÕES

O presente artigo estudou o desempenho da proteção diferencial de um transformador de potência, modelando a atuação do relé e os TCs, com suas

saturações, quando submetidos a transitórios eletromagnéticos típicos. O ATP foi a ferramenta escolhida para o estudo.

O modelo permite a simulação de faltas internas no transformador, além de diversas manobras e distúrbios capazes de provocar a operação indevida da proteção diferencial.

Para a realização deste estudo foram levadas em conta as seguintes situações:

- faltas nos enrolamentos internos;
- energização;
- faltas externas próximas ao transformador
- rejeição de carga;

O presente estudo é parte de um projeto de proteção digital diferencial dos transformadores de potência que utiliza-se de novos métodos de discriminação das situações estudadas, na busca de uma melhor eficiência dos relés digitais. Este trabalho reveste-se de especial relevância como elemento de apoio as empresas de energia elétrica, que buscam elevar os níveis de qualidade da energia fornecida, através da redução do número de interrupções, bem como de uma adequada análise do desempenho de suas proteções, algumas das quais anteriormente eram classificadas como “sem dados”.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo o apoio recebido durante a execução deste trabalho.

8 REFERÊNCIAS

- (1) HOROWITZ, S.H e PHADKE, A.G “Power System Relaying”, John Wiley e Sons Inc., 1992.
- (2) PIOVESAN, L. S “Avaliação de Algoritmos para Proteção Diferencial de Transformadores”, Dissertação de Mestrado, USP, SP, 1997.
- (3) BASTARD, P. *et al.*, “A Neural Network Classifier for the Analysis of a Protection Transformer differential Current”, Proc. of the International Conf. on Intelligent System Application to Power Systems, Montpellier, France, 1994.
- (4) WISZNIEWSKI, A. e KASZTENNY, B. “A Multi-criteria Transformer Differential Relay Based on Fuzzy Logic”, IEEE PES 1994 Winter Meeting, New York.
- (5) DOMMEL, H.W. “Electromagnetic Transients Program - Rule Book”, Oregon, 1984.
- (6) YACAMINI, R. e ABU-NASSER, A. “The Calculation of Inrush Current in Three-Phase Transformer”, IEE-B, Vol. 133, No. 1, Jan. 1986, págs. 31-40.
- (7) NAKRA, H. e BARTON, T. H. “Three-Phase Transformer Transients”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp. 1810-1819, 1974.
- (8) BRONZEADO, H. S. e YACAMINI, R. “Transformer Interaction Caused by Inrush Current”, IPST’97, Seattle, E.U.A., 1997.
- (9) J. PROUSALIDIS, M. *et al.*, “Investigation of Transformer Sympathetic Inrush”, IPST’97, Seattle, E.U.A., 1997.
- (10) COURY D., TAVARES M e CAMPOS P - “Modeling a Power Transformer for Investigation of Digital Protection Schemes” - 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP’98), Atenas, Grécia, Anais, 1998.