

Compensação em Tempo Real dos Efeitos da Saturação em TC de Baixa Remanência

Fagner de A. Pereira, Francisco das C. F. Guerra,
Benemar A. de Souza, Ericson N. A. Santos e
Núbia S. D. Brito
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Campina Grande, PB - Brasil
fagner.pereira@ee.ufcg.edu.br

Ubiratan A. Carmo
Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF
Recife, PE – Brasil
uacarmo@chesf.gov.br

Resumo—Uma plataforma baseada no uso de controladores digitais de sinais (DSC), desenvolvida para estudos do comportamento dinâmico em tempo real de transformadores de corrente de baixa remanência (com entreferro) utilizados em sistemas de proteção e medição é apresentada. O artigo apresenta também, um método de correção da distorção da corrente secundária devido à saturação do núcleo, além da compensação dos erros de relação e de fase decorrentes da inserção de entreferros. Vários casos foram testados e os resultados obtidos mostraram que o método proposto é eficaz na melhoria do desempenho de sistemas de proteção com base na medição de corrente.

Palavras-chave—Distorção, proteção de sistemas elétricos, saturação, simulação em tempo real, TC com entreferro.

I. INTRODUÇÃO

As correntes de curto-circuito nas redes de energia elétrica apresentam uma componente senoidal acrescida de uma componente contínua com decaimento exponencial. A primeira produz um fluxo magnético senoidal no núcleo do TC, enquanto que a segunda, produz um fluxo de módulo inicialmente crescente que pode levar o núcleo a um elevado estado de saturação. Esses problemas podem causar severas distorções nas correntes fornecidas aos relés de proteção, levando ao surgimento dos seguintes problemas [1]:

- Relés podem operar inadequadamente;
- Relés podem não ser sensíveis às distorções que reduzem o valor *RMS* da corrente secundária;
- A operação do relé pode ser atrasada, pelo motivo citado no item anterior;
- Localizadores de faltas podem não mostrar a indicação correta;
- Estimadores fasoriais podem indicar valores imprecisos.

Tais ocorrências podem causar danos de natureza térmica e eletrodinâmica, perda da coordenação nos relés de proteção, dificuldade de localização do ponto de ocorrência do defeito e, em casos mais graves, a perda da estabilidade do sistema.

Uma forma de se minimizar esses problemas é desenvolver procedimentos que garantam maior grau de exatidão no processo de transformação da corrente, o que vem sendo feito mediante o emprego de várias técnicas e métodos matemáticos provenientes da área de processamento digital de sinais.

A avaliação do estado da arte mostrou que os primeiros trabalhos acerca do uso de técnicas de detecção de saturação e compensação das distorções de correntes secundárias de TCs abordaram esse problema exclusivamente sob o ponto de vista de *hardware* [2], [3]. Com o desenvolvimento dos microprocessadores, técnicas numéricas passaram a ser empregadas mediante o uso de *softwares*. A primeira referência sobre o tema é citada em [4], onde os autores propuseram um método em que o fluxo magnético é obtido por integração numérica da corrente secundária. O método utiliza, ainda, um modelo de histerese que aproxima as trajetórias menores e assimétricas no plano de fase fluxo-corrente de excitação, a qual é somada à corrente secundária distorcida, de modo a se obter a corrente secundária corrigida.

Um desenvolvimento semelhante foi proposto por [5], onde se apresentou também, uma técnica para cálculo do fluxo magnético no núcleo do TC antes da ocorrência do defeito baseada na periodicidade da onda de fluxo em regime senoidal. O algoritmo foi testado em tempo real com o uso de um processador digital de sinais (*DSP*). Segundo os autores, foram obtidos bons resultados. Entretanto, esta técnica não é capaz de lidar com o fluxo associado ao efeito de remanência do núcleo (fluxo residual). Os autores propuseram, também, um método para detectar os instantes em que o núcleo satura. Para isto, foram utilizadas funções-diferença de terceira ordem [6]. Este método foi posteriormente combinado com outro, baseado em funções-diferença de segunda ordem, o qual é destinado a estimar o fluxo inicial total no núcleo do TC [7].

Outra técnica que vem sendo proposta é a transformada *wavelet* discreta. Em [8], ela foi utilizada para detecção da saturação do TC em conjunto com uma técnica de

regressão destinada à correção da onda distorcida de corrente secundária.

Métodos baseados em ajuste de curvas por mínimos quadrados foram propostos em [9], [10] e [11]. Apesar do refinado tratamento matemático, estes métodos requerem pesada carga de processamento numérico, o que pode inviabilizar aplicações em tempo real. Além disso, a técnica proposta em [9] introduz atraso na operação do relé de proteção.

Em [12], um método simples para a reprodução da forma de onda da corrente primária foi proposto. Entretanto, o grau de exatidão do resultado obtido apresenta-se reduzido se a corrente de defeito contém componentes harmônicas e/ou ruído.

Técnicas baseadas em redes neurais artificiais (RNA) para a detecção da saturação e correção das distorções também foram propostas em [13], [14] e [15]. Apesar das suas muitas vantagens, esses métodos requerem treinamento das redes neurais, considerando variações dos seguintes fatores: condições de operação da rede elétrica, tipos de TC, graus de magnetização residual do núcleo e constantes de tempo do sistema primário.

O método proposto neste trabalho é a correção numérica da corrente secundária distorcida com base na estimação do valor da corrente de excitação, que, quando adicionado à corrente secundária medida, fornece o valor da corrente primária refletida ao enrolamento secundário. Em métodos convencionais, a corrente secundária distorcida é integrada para a obtenção do fluxo imposto pela corrente primária. Este fluxo é adicionado ao fluxo remanescente no núcleo e, em seguida, utilizando um modelo de caracterização do núcleo magnético do TC, a corrente de excitação é estimada. Assim, o conhecimento do valor do fluxo remanescente no núcleo, as características da carga do TC e a impedância própria do enrolamento secundário, que na prática não são fáceis de serem obtidos com precisão, são necessários nesta abordagem.

No método proposto, o fluxo é obtido por integração da tensão em um enrolamento terciário. Assim, o conhecimento da impedância do enrolamento secundário não é mais necessário. Além disso, com um núcleo aberto, o valor do fluxo remanescente pode ser ignorado. Dessa forma, a corrente de excitação é determinada diretamente utilizando a curva de saturação do núcleo.

O modelo matemático do TC com entreferro e a plataforma de *hardware* para a simulação em tempo real de um sistema elétrico usado como modelo de validação do algoritmo de correção proposto são apresentados nas seções a seguir. O desenvolvimento do conjunto de *hardware* e *software* para aquisição e processamento do sinal de corrente secundária distorcida também é descrito. Finalmente, a análise dos resultados da execução em tempo real do método de correção proposto e sua aplicabilidade são avaliadas.

II. MODELO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Uma forma de melhorar o desempenho em regime transitório de um TC se dá pela inserção de entreferros no núcleo magnético para reduzir o fluxo residual, como mostrado na características $B - H$ (indução versus campo magnético) da Fig. 1. Esta é uma vantagem em comparação

com TCs convencionais, porque a característica $B - H$ aproxima-se de uma curva singular, simplificando assim, sua modelagem matemática. Nesta abordagem, em métodos de compensação com base na corrente de excitação, é desnecessária a determinação do fluxo residual.

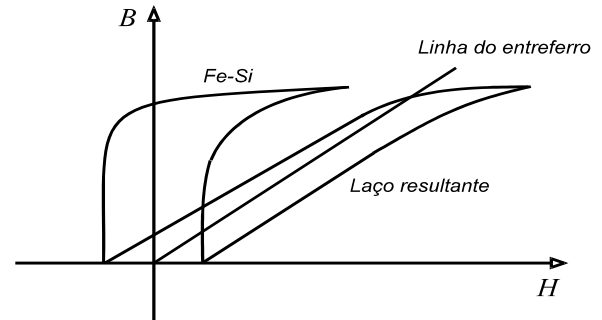


Fig. 1. Efeito da inserção de entreferro em TC com núcleo de (Fe-Si).

As principais vantagens da inserção de entreferros em núcleos magnéticos são [16]: i) redução da constante de tempo secundária do TC, o que implica numa redução da área da secção transversal do núcleo (menor tamanho físico) para as mesmas condições de funcionamento em comparação com o TC de núcleo fechado; ii) influência menor do fator de potência da carga no desempenho em regime transitório do TC em comparação com TC de núcleo fechado; iii) tensão menor nos terminais secundários quando estes estão em aberto.

O circuito elétrico equivalente do TC é mostrado na Fig. 2, no qual o terceiro enrolamento (terciário), confeccionado com fio de pequena secção transversal, é superposto ao secundário com o propósito de fornecer a tensão u_3 , a qual é integrada para determinação do fluxo magnético no núcleo.

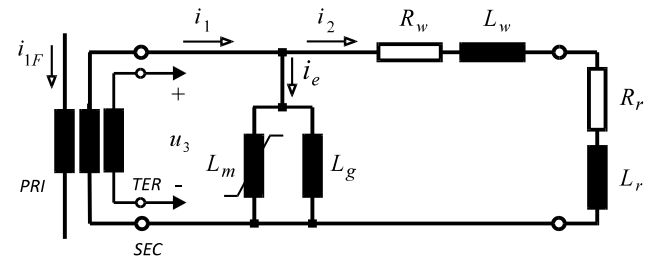


Fig. 2. Circuito elétrico equivalente do TC.

No circuito da Fig. 2 estão indicadas as resistências e indutâncias correspondentes à fiação e à carga (R_w , L_w , R_r , L_r), a indutância não linear associada aos efeitos do núcleo magnético (L_m), bem como a indutância linear associada ao entreferro (L_g). Sendo: i_{1F} a corrente primária de defeito; i_1 a corrente do primário refletida ao secundário; i_e a corrente de excitação; i_2 a corrente secundária; u_3 a tensão induzida no enrolamento terciário.

As propriedades do núcleo magnético são representadas pela Eq. (1), sendo λ o fluxo de enlace no enrolamento secundário e σ , a condutância elétrica relacionada às perdas no núcleo de liga ferrosilício.

$$i_e(t) = f[\lambda(t)] + \sigma \frac{d\lambda(t)}{dt}. \quad (1)$$

A função $f[\lambda(t)]$ descreve a curva de saturação do TC, em termos de valores de pico. Assim, as trajetórias no

plano de fase $\lambda - i_e$ determinadas pela Eq. (1) descrevem laços de histerese. Para o circuito da Fig. 2, pode-se escrever:

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + \int_0^t u_3(t) dt \quad (2)$$

$$i_e(t) = f[\lambda(t)] + \sigma u_3(t) \quad (3)$$

$$i_1(t) = i_e(t) + i_2(t). \quad (4)$$

O termo $\lambda(t_0)$ da Eq. (2) é o fluxo residual no núcleo magnético, λ_R , somado ao fluxo inicial, λ_0 , imposto pela corrente primária. O fluxo λ_R pode ser reduzido a um valor desprezível, como ocorre nos TC da classe TPZ, nos quais há inserção de um grande entreferro ou de vários pequenos entreferros no núcleo. Porém, λ_0 não pode ser desprezado, uma vez que pequenos acréscimos de λ ocasionam grandes acréscimos de i_e quando o TC entra em regime de saturação.

III. MÉTODO PROPOSTO

A montagem eletromecânica para correção da forma de onda da corrente secundária é efetuada de acordo com o diagrama da Fig. 3.

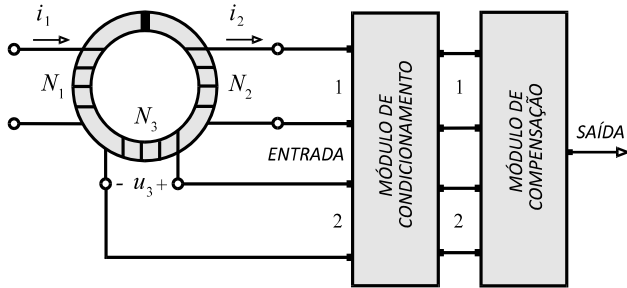


Fig. 3. Diagrama de blocos da montagem eletromecânica para implementação do método de correção.

O módulo de condicionamento de sinais possui duas entradas e duas saídas ligadas às portas correspondentes do módulo de correção. A corrente no enrolamento secundário, com N_2 espiras, é aplicada à entrada 1 do módulo e convertida em tensão proporcional. O enrolamento terciário, com N_3 espiras, é conectado diretamente à entrada 2 e a tensão u_3 é numericamente integrada pelo sistema de correção para fornecer os valores de λ . Uma vez que não existe fluxo de corrente no terciário, a integração de u_3 fornece uma medida adequada do fluxo magnético no núcleo do TC.

Inicialmente, o sistema executa a integração numérica da tensão u_3 obtendo, após alguns ciclos, o valor instantâneo do fluxo no núcleo do TC. Ao mesmo tempo, o valor da corrente secundária é amostrado e enviado diretamente para a saída. A condição de falta é detectada quando a corrente secundária excede o valor correspondente a 150% da corrente nominal, limiar comumente usado em esquemas de proteção de sobrecorrente.

Neste processo, três amostras consecutivas de corrente são testadas a fim de evitar operações incorretas devido à presença de ruído no sinal. Durante a condição de falta, cada valor de λ , calculado pela Eq. (2), é usado para determinar o valor correspondente da corrente de excitação

através da utilização da curva de saturação do TC e o parâmetro σ , como estabelecido na Eq. (3). Para cada nova amostra, a corrente secundária é adicionada à corrente de magnetização de acordo com a Eq. (4) para fornecer a corrente corrigida.

IV. A PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

O sistema primário simulado é mostrado na Fig. 4, constituído de uma linha de transmissão típica de 230 kV.

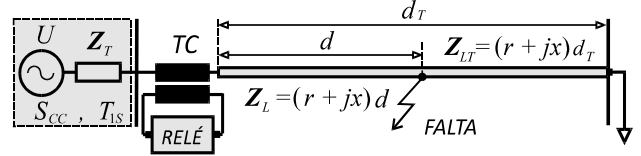


Fig. 4. Sistema elétrico considerado no estudo.

O circuito monofásico equivalente para simulação de uma falta fase-terra a uma distância d da barra emissora é apresentado na Fig. 5.

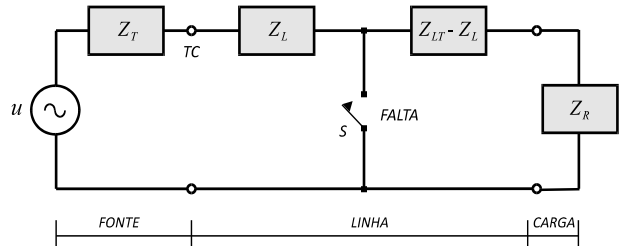


Fig. 5. Circuito monofásico equivalente do sistema mostrado na Fig. 4.

Para o circuito da Fig. 5, pode-se escrever:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{u(t) - Ri(t)}{L}. \quad (5)$$

As constantes R e L são, respectivamente, a resistência e a indutância totais entre a fonte de tensão e o ponto da falta; i é a corrente no circuito. Aplicando-se o método de Euler à essa equação, obtém-se:

$$i_k = i_{k-1} + h \frac{di}{dt} \Big|_{k-1}, \quad (6)$$

sendo k a ordem da amostra e h , o passo de integração usado na simulação.

Para o circuito da Fig. 2, pode-se ainda escrever:

$$\frac{d\lambda}{dt} = R_2 i_2(t) + L_2 \frac{di_2(t)}{dt}. \quad (7)$$

$$i_2(t) = i_1(t) - i_e(t). \quad (8)$$

$$i_e = f(\lambda). \quad (9)$$

Combinando as Eqs. (7), (8) e (9), obtém-se:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R_2[i_1(t) - f(\lambda)] + L_2 \frac{di_1(t)}{dt}}{1 + L_2 \frac{df(\lambda)}{d\lambda}}. \quad (10)$$

O valor da amostra do fluxo magnético é calculado por:

$$\lambda_k = \lambda_{k-1} + h \frac{d\lambda}{dt} \Big|_{k-1}. \quad (11)$$

Os dados do sistema simulado são: tensão nominal, U_N :

230 kV; corrente nominal, I_N : 800 A; comprimento da linha, L_T : 85 km; resistência série, r : 0,0319 Ω /km; reatância série, x : 0,3311 Ω /km; potência de curto circuito na barra de 230 kV, S_{CC} : 7,2 GVA; constante de tempo primária, T_{1S} : 35 ms; impedância de Thévenin da fonte de tensão, $Z_T = 0,56 + j 7,35 \Omega$; impedância equivalente da carga do sistema primário, $Z_R = 166 \Omega$; distância entre a falta e o TC, $d = 5$ km.

O TC possui as seguintes características: corrente primária: 900 A; corrente secundária: 5 A; seção transversal do núcleo: $1,91 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; comprimento médio do caminho magnético: 0,50 m; comprimento do entreferro: 4 mm; resistência do enrolamento secundário: 0,25 Ω ; reatância do enrolamento secundário: desprezível; carga nominal: 1 Ω . A curva de saturação do TC é mostrada na Fig. 6.

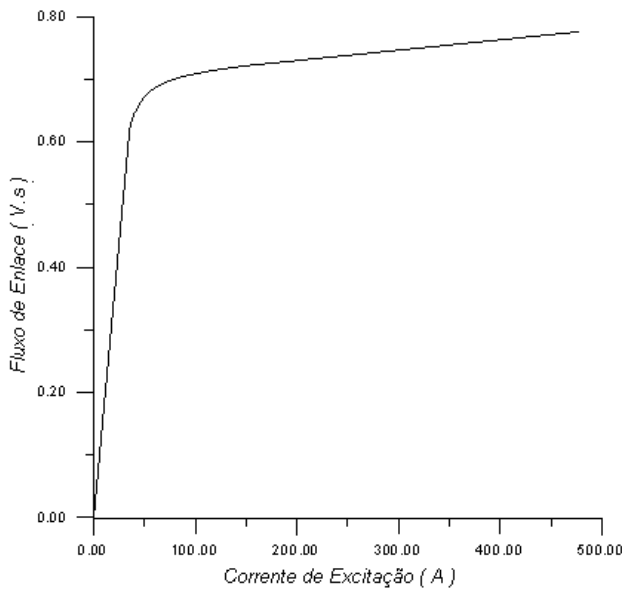


Fig. 6. Curva de saturação do TC com entreferro.

Simulações em tempo real foram realizadas utilizando uma plataforma de *hardware* baseada no controlador digital de sinais de 32 bits TMS320F28335, com unidade aritmética em ponto flutuante, fabricado pela *Texas Instruments*, três conversores digital-analógico DAC7621 de 12 bits paralelos, fabricados pela *Burr-Brown*, e três filtros passa-baixas de segunda ordem, tipo *Butterworth*, com frequência de corte em 5 kHz. Nas simulações, a corrente primária é fornecida apenas para fins de comparação com a corrente corrigida.

O diagrama de blocos da plataforma de simulação é mostrado na Fig. 7.

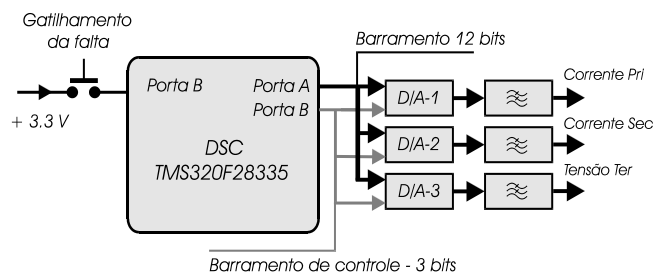


Fig. 7. Diagrama de blocos da plataforma de simulação.

Os cálculos foram realizados considerando uma frequência de 20 kHz. O primeiro conversor (D/A-1) fornece o sinal de corrente primária, o segundo conversor (D/A-2) fornece o sinal de corrente secundária do TC e o terceiro (D/A-3) fornece a tensão no enrolamento terciário. O DSC calcula as correntes primária e secundária e a tensão no enrolamento terciário, faz o escalonamento das grandezas para uma resolução de 12 bits e escreve os valores resultantes no barramento de dados, um de cada vez. A simulação é iniciada em condições de estado estacionário. O regime de falta é simulado quando o botão "Gatilhamento da Falta" da Fig. 7 é pressionado.

O sistema foi montado a partir do kit de desenvolvimento eZdspTM F28335, da *Spectrum Digital Incorporated*, ligado aos conversores D/A, montados separadamente em placas de circuito impresso dedicadas. A programação do DSC foi feita usando o ambiente de desenvolvimento Code Composer Studio 3.3 na linguagem C++.

V. A PLATAFORMA DE CORREÇÃO

O diagrama de blocos da plataforma de *hardware* usada para correção das distorções na corrente secundária é apresentado na Fig. 8.

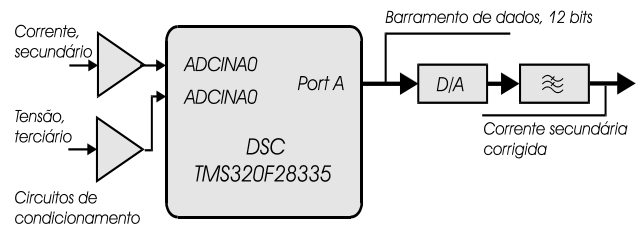


Fig. 8. Diagrama de blocos da plataforma de correção.

A plataforma é formada por um controlador digital de sinais TMS320F28335, dois circuitos de condicionamento de sinais de entrada, um conversor D/A (DAC7621) e um filtro passa-baixas tipo *Butterworth* com frequência de corte de 5 kHz conectado à saída.

Duas entradas do conversor analógico-digital de 12 bits do DSC são utilizadas (ADCINA0, ADCINA1). A primeira realiza a aquisição e conversão de um sinal de tensão proporcional à corrente no secundário do TC. A segunda lê a tensão no enrolamento terciário. As aquisições são feitas em uma frequência de amostragem de 20 kHz.

Esta plataforma também foi montada a partir do *kit* de desenvolvimento eZdspTM F28335.

VI. RESULTADOS

Nas simulações, foram considerados dois valores de carga no secundário do TC: $1,0 + j 1,0 \Omega$ e $2,4 + j 0,7 \Omega$. Para os casos analisados, o ângulo de incidência do defeito foi de 0° .

Para avaliar o desempenho do algoritmo, o erro transitório, ε_T , foi calculado a cada instante de amostragem [7] por:

$$\varepsilon_T = \frac{k_N i_2 - i_{1F}}{\sqrt{2} I_{1F}}, \quad (12)$$

Sendo: k_N a relação de espiras do TC; i_2 o valor da amostra

da corrente secundárias; i_{1F} o valor da amostra da corrente primária; I_{1F} o seu valor RMS em regime permanente de falta.

A corrente primária e a corrente secundária distorcida e corrigida são mostradas nas Figs. 9 e 10. Os valores RMS instantâneos das correntes são mostrados nas Figs. 11 e 12. Os erros transitórios antes e após a correção são mostrados nas Figs. 13 e 14.

O valor máximo do módulo do erro transitório, antes e após o processo de correção, para cada carga considerada é apresentado na Tabela I.

TABELA I
ERRO TRANSITÓRIO MÁXIMO

Carga (Ω)	$ \varepsilon_T $ - distorcida (%)	$ \varepsilon_T $ - corrigida (%)
$1,0 + j 1,0$	130,48	11,18
$2,4 + j 0,7$	179,19	6,65

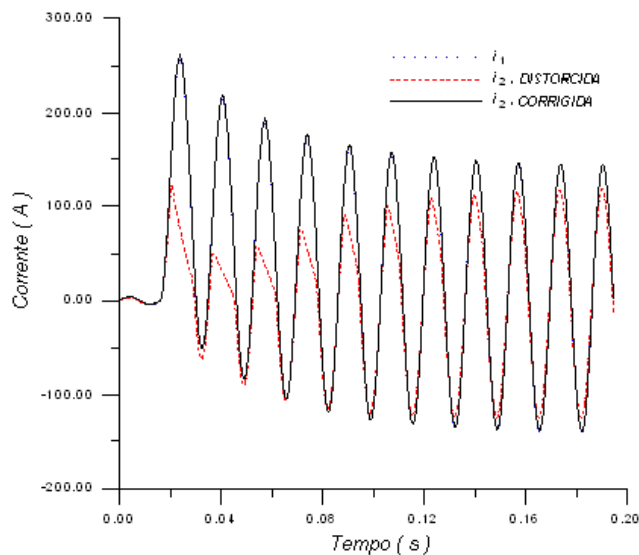


Fig. 9. Correntes i_1, i_2 (distorcida, corrigida) – Carga: $1,0 + j 1,0 \Omega$.

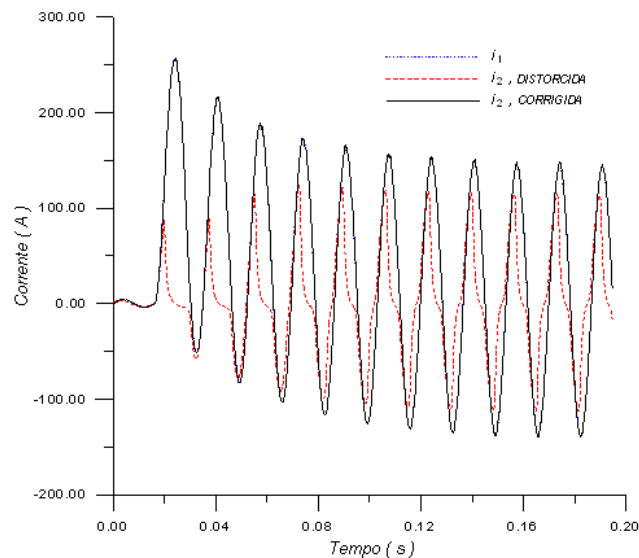


Fig. 10. Correntes i_1, i_2 (distorcida, corrigida) – Carga: $2,4 + j 0,7 \Omega$.

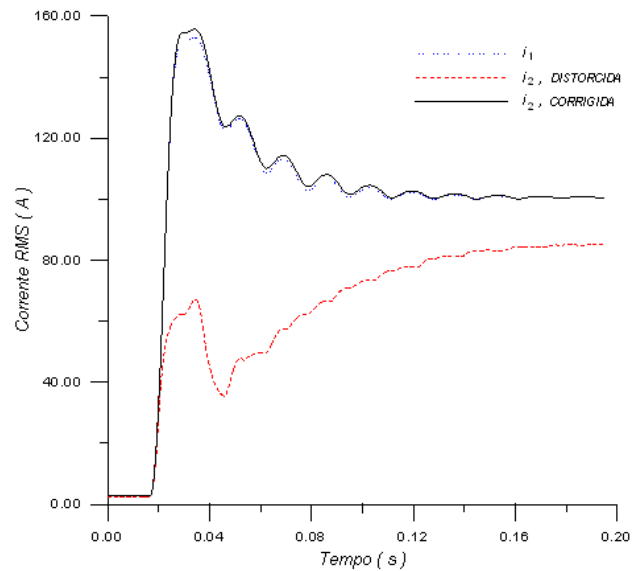


Fig. 11. Correntes RMS i_1, i_2 (distorcida, corrigida) – Carga: $1,0 + j 1,0 \Omega$.

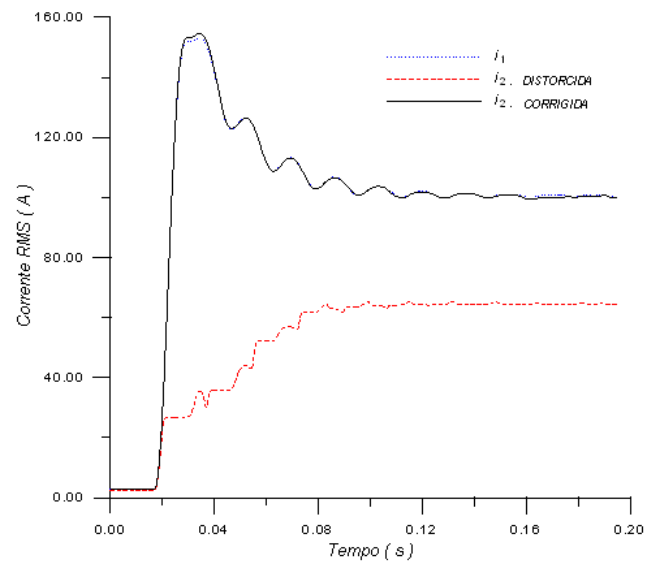


Fig. 12. Correntes RMS i_1, i_2 (distorcida, corrigida) – Carga: $2,4 + j 0,7 \Omega$.

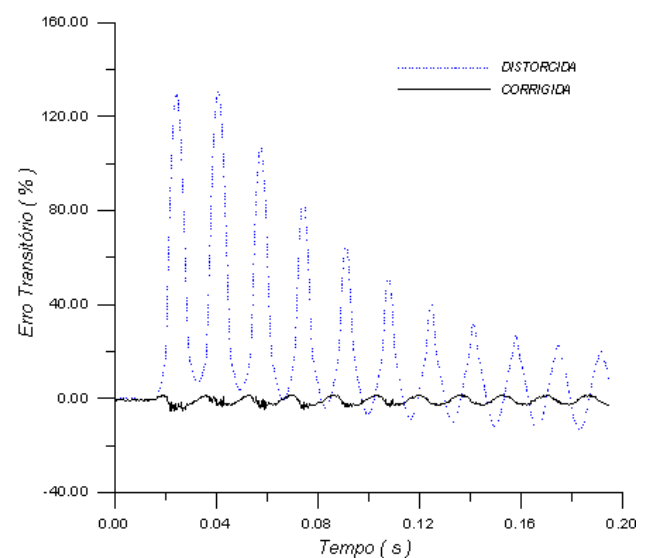


Fig. 13. Erros transitórios – Carga: $1,0 + j 1,0 \Omega$.

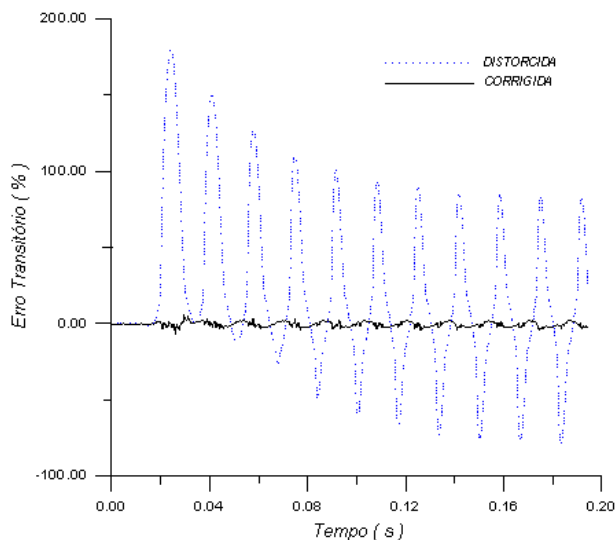


Fig. 14. Erros transitórios – Carga: $2,4 + j 0,7 \Omega$.

VII. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados indicam que o método proposto corrige a corrente secundária distorcida de forma satisfatória e que os erros introduzidos pelo entreferro são também significativamente reduzidos.

O sucesso da correção da corrente secundária depende da determinação precisa do fluxo inicial no instante da ocorrência do defeito. Em outros métodos, este fluxo é determinado por estimativa, o que pode causar erros significativos no processo de correção. Na técnica proposta, o fluxo inicial é medido a partir da integração da tensão do enrolamento terciário do TC. Além disso, o entreferro reduz o fluxo residual para um valor insignificante. A perda de precisão causada pelo aumento da corrente de excitação é compensada pelo processamento numérico do método. Assim, é possível utilizar o mesmo tipo de TC nos esquemas de protecção e de medição.

O método proposto evita o sobredimensionamento do TC. A inserção do entreferro permite ainda uma redução adicional no tamanho do núcleo, porque a constante de tempo do circuito secundário, o fluxo residual e a indução magnética diminuem, considerando que o TC seja submetido à mesma corrente de falta no circuito primário de um TC de núcleo fechado. Outra vantagem desta técnica é que não é necessário o conhecimento das impedâncias do circuito secundário para calcular a tensão de excitação secundária. Esta prática também produz erros significativos na estimação da corrente de excitação, porque tais impedâncias nem sempre são conhecidas com precisão, além de que qualquer alteração dos seus valores exige modificações nas configurações do algoritmo.

No método proposto, o TC deve possuir um enrolamento auxiliar. No entanto, isto não é um problema significativo, porque este tipo de TC já é comercialmente disponível: Muitos TCs são fabricados com dois ou mais enrolamentos de baixa corrente. Além disso, estas características podem ser especificadas na proposta de aquisição desses dispositivos com praticamente nenhum aumento do custo, pois o enrolamento pode ser construído com fiação de pequena espessura, já que é usado somente para medição da tensão induzida, permitindo o cálculo do fluxo magnético no núcleo de ferro.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco – Chesf, sob o projeto nº 0048-035 ANEEL / 2010.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] F. C. F. Guerra and W. S. Mota, "Current Transformer Model," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 187-194, Jan. 2007.
- [2] D. A. Bradley, G. B. Gray, and D. O'Kelly, "Transient compensation of current transformers," IEEE Trans. Power App. Sys., vol. PAS-97, no. 4, pp. 1264-1271, 1978.
- [3] L. Masson, "Circuit for dynamic control of magnetic flux in current transformers," IEEE Trans. Power App. Sys., vol. PAS-98, no. 6, pp. 1990-1995, 1979.
- [4] T. Conrad and D. Oeding, "A method to correct the distorted secondary currents of current transformers," in Proc. PSCC, pp. 311-315, 1987.
- [5] Y. C. Kang, S. H. Kang, J. K. Park, A. T. Johns, and R. K. Aggarwal, "Development and hardware implementation of a compensating algorithm for secondary current of current transformers," IEE Proc. Power Appl., vol. 143, no. 1, pp. 41-49, Jan. 1996.
- [6] Y. C. Kang, S. H. Ok, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "Design and evaluation of an algorithm for detecting current transformer saturation," IEE Proc. Gener. Transm. and Dist., vol. 151, no. 1, pp. 27-35, Jan. 2004.
- [7] Y. C. Kang, U. J. Lim, S. H. Kang, and P. A. Crossley, "Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT," IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 4, pp. 1642-1649, Oct. 2004.
- [8] F. Li, Y. Li, and R. K. Aggarwal, "Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers," IEE Proc. Gener. Transm. and Dist., vol. 149, no. 4, pp. 497-500, Jul. 2002.
- [9] J. Pan, K. Vu, and Y. Hu, "An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects," IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 4, pp. 1623-1628, Oct. 2004.
- [10] K. M. El-Naggar, and M. I. Gilany, "A discrete dynamic filter for detecting and compensating CT saturation," Elect. Power Syst. Research, vol. 77, pp. 527-533, 2006.
- [11] A. Hooshyar and M. Sanaye-Pasand, "Accurate measurement of fault currents contaminated with decaying DC offset and CT saturation" vol. 27, no. 2, pp. 773-783, Apr. 2012.
- [12] A. Wiszniewski, W. Rebizant, and L. Schiel, "Correction of current transformer transient performance," IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 2, pp. 624-632, Apr. 2008.
- [13] D. C. Yu, J. C. Cummins, Z. Wang, H. J. Yoon, and L. A. Kojovic, "Correction of current transformer secondary currents due to saturation using artificial neural networks," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 2, pp. 189-194, Apr. 2001.
- [14] H. Khorashadi-Zadeh and M. S. Pasand, "Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs," IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 1, pp. 73-79, Jan. 2006.
- [15] E. C. Segatto and D. V. Coury, "Redes neurais artificiais recorrentes aplicadas na correção de sinais distorcidos pela saturação de transformadores de corrente," Revista Controle & Automação, vol. 17, no. 4, Out./Nov./Dec. 2006.
- [16] U. D. Annakkage, P. G. McLaren, E. Dirks, V. Jayasinghe, A. D. V. Parker, "A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp. 57-61, 2000.