



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 13
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

ENERGIZAÇÃO CONTROLADA DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS: ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE "INRUSH"

Roberto Apolônio* José Carlos de Oliveira Herivelto S. Bronzeado Arnulfo B. de Vasconcellos

UFMT

UFU

CHESF

UFMT

RESUMO

Este informe técnico está relacionado com as técnicas para a modelagem de transformadores trifásicos, proposição de uma estratégia para o chaveamento controlado para fins de redução das correntes de *inrush* e validação de um programa computacional para o gerenciamento da aquisição e chaveamento controlado. Estudos computacionais e laboratoriais são apresentados e discutidos para mostrar a fundamentação da estratégia e sua eficiência. Os resultados ressaltam a possibilidade de se construir dispositivos com capacidade para a redução das indesejáveis correntes de *inrush* de transformadores.

PALAVRAS-CHAVE

Chaveamento controlado, Corrente transitória de magnetização, Modelagem de transformadores, Fluxo residual.

1.0 - INTRODUÇÃO

A energização usual de transformadores de potência geralmente resulta em sobrefluxos no núcleo, ocasionando a saturação de uma ou mais colunas (e/ou culatras) do transformador e, como consequência, o surgimento de elevados valores da corrente de magnetização durante a energização desses dispositivos. Essas elevadas correntes, denominadas de correntes de *inrush*, possuem amplo espectro harmônico, incluindo as harmônicas pares, e provocam efeitos indesejáveis ao próprio transformador e ao sistema de potência, tais como: fadiga mecânica nos enrolamentos, deterioração da isolação, má operação do relé diferencial de proteção e, principalmente afundamentos temporários de tensão. Estes dois últimos efeitos afetam diretamente a qualidade da energia elétrica do sistema, enquanto os dois primeiros têm efeito na degradação da vida útil do referido dispositivo.

Os valores alcançados pela corrente transitória de magnetização dependem dos seguintes fatores: o instante sobre a onda de tensão em que ocorre o fechamento das chaves, a amplitude e polaridade do fluxo residual presente no núcleo do transformador, da resistência total do circuito primário, da impedância da fonte de suprimento, da indutância do caminho de ar entre o enrolamento energizado e o núcleo do transformador, e da geometria e do material do núcleo do transformador.

Sob condições de regime permanente o fluxo encontra-se atrasado de 90 graus elétricos em relação à tensão. Para satisfazer as condições de regime permanente do fluxo magnético no núcleo é necessário que o instante sobre a onda de tensão, no qual as chaves são fechadas, produza um fluxo igual àquele presente no núcleo do transformador (1), (2) e (3). Para a implementação da estratégia de energização controlada de transformadores trifásicos é necessário que haja o controle individual do fechamento de cada uma das fases do sistema elétrico que alimenta o transformador. Com o objetivo de realizar o chaveamento controlado de transformadores trifásicos, este informe técnico realiza estudos sobre o procedimento para se calcular o fluxo residual que permanece no

* Av. Fernando Correa da Costa, s/n - CEP 78060-900 – Cuiabá - MT - BRASIL
Tel.: (65) 615-8784 - e-mail: apolonio@cpd.ufmt.br

núcleo do transformador durante a sua desenergização, com base na avaliação da tensão transitória que aparece nos terminais dos seus enrolamentos. Posteriormente, na etapa de energização do transformador, o instante ótimo para o fechamento da primeira chave é avaliado em função do valor e da polaridade do fluxo residual. O instante ótimo para o fechamento das chaves ainda abertas é obtido através da inspeção dos fluxos dinâmicos que se estabelecem no núcleo após o fechamento da primeira chave e dos fluxos presumíveis avaliados em função da tensão de suprimento.

2.0 - MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

Diferentes estratégias têm sido utilizadas para a modelagem de transformadores, que podem ser agrupadas em: modelagem através de elementos finitos, modelagem através do circuito elétrico equivalente (dualidade), modelagem através de equações elétricas e magnéticas e, modelagem através de relutâncias e forças magnetomotriz associadas aos modelos do simulador Saber. A modelagem do transformador trifásico, tipo núcleo envolvido, será realizada com base no uso de relutâncias e forças magnetomotriz e dos recursos disponibilizados pelo simulador Saber. A figura 1 mostra o modelo físico do transformador e o modelo magnético equivalente, cujos detalhes da implementação no Saber estão descritos em (4).

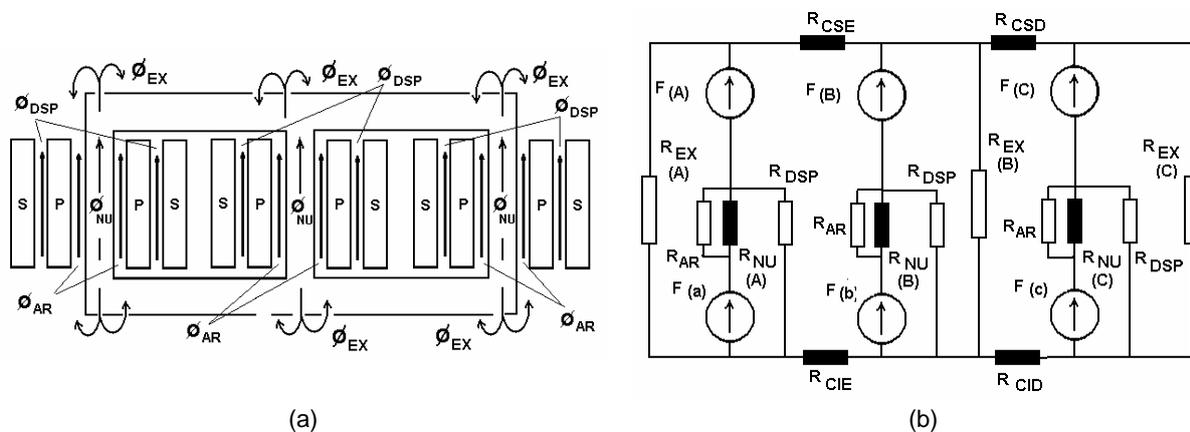


FIGURA 1 - Transformador trifásico tipo núcleo envolvido: (a) Modelo físico do transformador – distribuição dos fluxos; (b) Modelo eletromagnético equivalente.

A escolha dessa abordagem para a implementação computacional de transformadores trifásicos é particularmente vantajosa e necessária, pois permite que as interações entre os fluxos magnéticos das diferentes fases possam ser prontamente levadas em conta. Adicionalmente, as diferentes ligações para os enrolamentos podem ser obtidas facilmente. O modelo do transformador fica completamente caracterizado com a inclusão da histerese ferromagnética do núcleo, essencial para o estabelecimento do fluxo residual durante a etapa de desenergização ou energização do transformador. O modelo de histerese ferromagnética de Jiles-Atherton é utilizado neste trabalho, pois exhibe as principais características necessárias, tais como: a curva inicial de magnetização, saturação da magnetização e remanência (5).

3.0 - FLUXO RESIDUAL

Para a implementação do procedimento de chaveamento controlado de transformadores faz-se necessário o conhecimento do fluxo residual presente no núcleo do dispositivo. Este, como se sabe, é definido pelas condições impostas ao transformador no momento que antecede a sua interrupção (desenergização prévia). Ainda, ao ocorrer a desconexão do equipamento, o fenômeno é acompanhado de um comportamento oscilatório que não deve ser ignorado. O fluxo residual que permanece no núcleo é influenciado por diversos fatores, tais como: as características do material do núcleo, a presença de entreferros no núcleo, a capacitância dos enrolamentos, as características da corrente de corte do disjuntor e a presença de capacitores ou linhas de transmissão conectadas ao transformador.

Para a determinação do fluxo residual no núcleo utiliza-se o procedimento clássico de integração da tensão que aparece nos terminais dos enrolamentos do transformador, cujas características são dependentes das variáveis descritas acima. Conforme já mencionado, a correta estimativa do fluxo residual é extremamente importante para o sucesso da estratégia de chaveamento controlado, pois o fluxo residual define o instante sobre a onda de tensão no qual a(s) chave(s) deve(m) ser fechada(s).

Na etapa de simulação digital, a modelagem da histerese ferromagnética permite que se obtenha o valor do fluxo residual com base no acesso às variáveis do programa. Entretanto, para ensaios com protótipos ou ensaios em

campo, deve-se adotar algum procedimento para o cálculo do fluxo residual com base na tensão transitória que aparece nos terminais dos enrolamentos do transformador durante a sua desenergização.

Para calcular o fluxo residual utiliza-se de um sistema de aquisição de dados para a amostragem dos sinais de tensão nos terminais do transformador durante a sua desenergização. O cálculo do fluxo residual segue as seguintes etapas:

1^a) - o sistema de aquisição de dados continuamente armazena os últimos n períodos dos sinais discretizados das tensões coletadas nos terminais do transformador;

2^a) - um programa especialmente desenvolvido para tal fim, examina as amostras das tensões, determina o final das oscilações ou adicionalmente determina a extinção completa da corrente oscilatória nos enrolamentos do transformador, retrocede alguns períodos, não muitos, para detectar o cruzamento por zero da tensão;

3^a) - o cálculo do fluxo residual é iniciado no instante em que a tensão passa por zero, com a adição de um procedimento para a correção do deslocamento no valor do fluxo residual calculado, gerado pelo fato de que a tensão e o fluxo iniciam-se de zero.

Em se tratando de transformadores trifásicos do tipo núcleo envolvido, a soma dos fluxos das três colunas deverá ser zero.

4.0 - ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO CONTROLADO CONSIDERANDO FLUXO RESIDUAL NO NÚCLEO

O princípio básico para a eliminação do sobrefluxo, ou fluxo assimétrico que surge no núcleo do transformador durante a sua energização, é garantir que o fluxo residual seja igual ao fluxo presumível. O fluxo presumível corresponde ao fluxo que viria a ser criado caso a fonte de suprimento estivesse conectada ao transformador e o mesmo já estivesse atingido as condições de regime permanente. Para um transformador monofásico, com fluxo residual nulo, o instante ótimo para o fechamento da chave ocorre quando a tensão da fonte de suprimento estiver passando pelo seu valor máximo ou valor de pico; condição suficiente para suprimir todo o transitório de energização. Entretanto, um transformador trifásico, construído com um núcleo de três colunas, possui inerentemente interação entre os fluxos das fases. Nesses transformadores, depois que uma fase ou duas, dependendo da ligação dos enrolamentos, é energizada, um fluxo se estabelece pelas outras colunas. A esse fluxo transitório denominaremos de fluxo dinâmico no núcleo. A figura 2 mostra os fluxos dinâmicos (Flx_d) no núcleo após o fechamento da fase (c) de um transformador trifásico ligado em estrela aterrada.

O instante para energização da primeira fase ou duas, dependendo da ligação dos enrolamentos, é ajustado sobre a onda de tensão quando a tensão instantânea v é igual a:

$$v = V_{MAX} \text{ sen } \alpha \quad (1)$$

sendo V_{MAX} a tensão máxima aplicada nos terminais de cada enrolamento do transformador.

Para um transformador trifásico com os enrolamentos ligados em estrela aterrada, a fase conectada a coluna do transformador contendo o maior fluxo residual, em módulo, deverá ser energizada primeiramente. Em se tratando da ligação em delta, as duas fases ligadas à coluna com maior fluxo residual deverão ser energizadas em primeiro lugar. O valor do ângulo α é determinado como segue:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\varphi_{RESIDUAL}}{\varphi_{MAX}} \right) + 90^\circ \quad (2)$$

sendo $\varphi_{RESIDUAL}$ e φ_{MAX} ambos em (Weber).

O φ_{MAX} é dado por:

$$\varphi_{MAX} = \frac{V_{EFICAZ}}{4,442882.n.f} \quad (3)$$

sendo:

V_{EFICAZ} - a tensão eficaz aplicada aos enrolamentos do transformador;

n - o número de espiras do enrolamento, e

f - a frequência do sinal de tensão.

Há teoricamente dois instantes ótimos para o fechamento da primeira fase em função do ângulo α . Para fluxo residual positivo, o primeiro ângulo estará situado entre 90° e 180° , isto é, tensão positiva com derivada negativa; o segundo ângulo estará situado entre 180° e 270° , isto é, tensão negativa e derivada negativa. Neste trabalho, o primeiro ângulo será utilizado para o fechamento da primeira fase.

Após o fechamento da primeira fase, o fluxo gerado por ela irá atingir as outras colunas do transformador, eliminando o fluxo residual lá existente e dando origem ao fluxo dinâmico (Flx_d). A figura 2 ilustra este comportamento para um transformador trifásico ligado em estrela aterrada do lado energizado, no qual a fase (c) foi energizada em primeiro lugar. O instante ótimo para a energização das duas fases ainda abertas foi derivado dos resultados das simulações, através da inspeção dos fluxos presumíveis e dos fluxos dinâmicos que se estabelecem no núcleo após a energização da primeira fase. Na figura 2 estão mostrados os fluxos presumíveis (Flx_p) e os fluxos dinâmicos (Flx_d) das fases (a) e (b). A comparação entre os fluxos presumíveis e dinâmicos das

colunas (a) e (b), em decorrência da energização apenas da fase (c), fornece instantes de tempo repetitivos em que simultaneamente o fluxo presumível e o fluxo dinâmico no núcleo se igualam para as duas fases. Estes instantes são aqueles que poderiam ser designados por “*instantes ótimos*” para o chaveamento simultâneo das duas fases que ainda se encontram abertas.

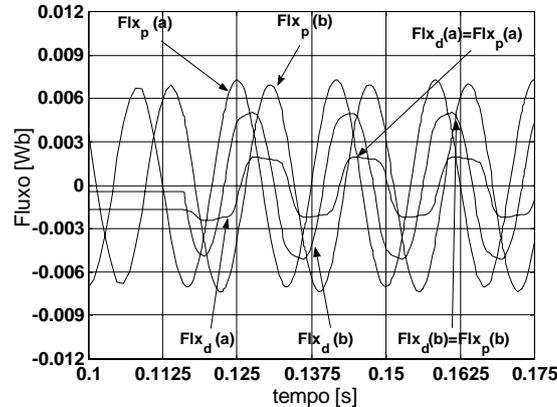


FIGURA 2 - Instantes ótimos para o fechamento das fases ainda abertas; (a) e (b) neste caso.

As simulações mostram que os instantes ótimos para o fechamento das outras fases ainda abertas não dependem da intensidade nem da polaridade do fluxo residual, porém dependem de qual das fases foi primeiramente energizada. A tabela 1 resume os instantes ótimos genéricos em função de qual fase foi energizada em primeiro lugar, considerando que os enrolamentos estão ligados em estrela aterrada/estrela aterrada ou isolada.

TABELA 1. Instante ótimo para o fechamento das duas fases ainda abertas: ligação estrela aterrada/estrela aterrada ou isolada.

B(residual)	1ª fase energizada	TÓTIMO_FECHAMENTO_GENÉRICO
$\pm B_R$	(a)	$t = t_{REF(A)} + n' \cdot \frac{T}{2} + 7,7ms$
$\pm B_R$	(b)	$t = t_{REF(A)} + (n'+1) \cdot \frac{T}{2} + 5,6ms$
$\pm B_R$	(c)	$t = t_{REF(A)} + (n'+2) \cdot \frac{T}{2} + 3,4ms$

NOTA: T – período da tensão de alimentação; $t_{REF(A)}$ – instante de referência por zero (inclinação positiva) da fase (a); n' – número inteiro positivo; define o número de semiciclos de atraso.

A figura 3 mostra os fluxos residuais, dinâmicos e de regime permanente, durante as etapas de energização controlada do transformador.

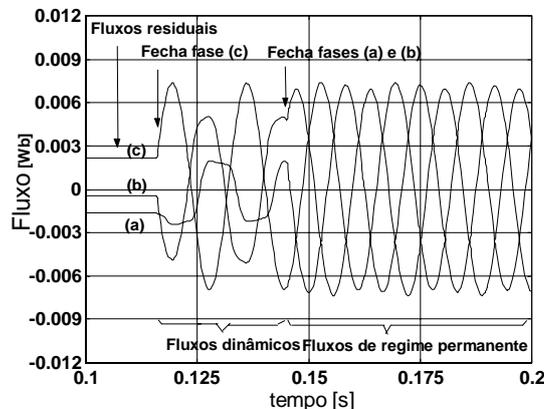


FIGURA 3 - Fluxos residuais, dinâmicos e de regime permanente durante a energização controlada do transformador.

A figura 4 mostra as correntes transitórias de magnetização para o caso descrito. Nela observa-se que as correntes atingem a condição de regime permanente, isto é, as correntes de magnetização a vazio, sem qualquer sobressalto. A figura 5 mostra a tensão nos terminais dos enrolamentos após a seqüência de fechamentos das chaves, sendo a fase (c) fechada primeira e posteriormente as fases (a) e (b) simultaneamente.

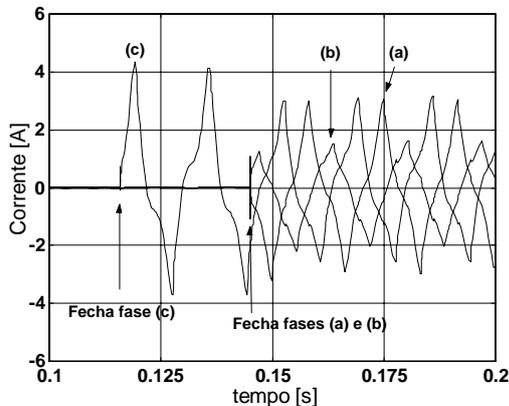


FIGURA 4 - Correntes transitórias de magnetização durante a energização controlada do transformador.

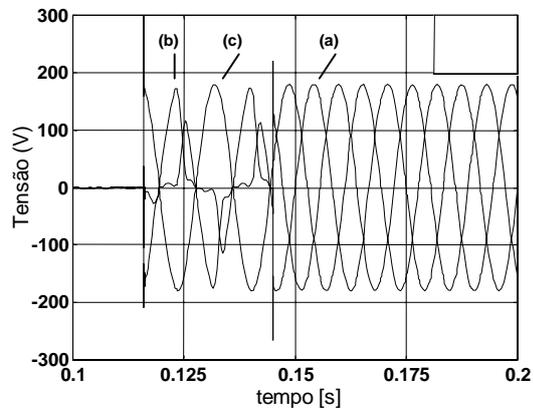


FIGURA 5 - Tensões nos terminais dos enrolamentos do transformador durante as etapas de energização controlada.

5.0 - ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Com o objetivo de validar a estratégia definida anteriormente, realizaram-se testes de energização em um transformador trifásico de pequeno porte. Tais testes permitiram validar os tempos de atraso de fechamento das chaves, cujos valores foram obtidos durante a fase de simulação digital. A fim de avaliar a estratégia de chaveamento controlado apresentada anteriormente, faz-se necessário a implementação de uma estrutura laboratorial, conforme mostrado na forma de diagrama de blocos na figura 6. A figura 7 ilustra, com o uso dos dispositivos reais, a estrutura geral do Sistema de Aquisição de Dados e Chaveamento Controlado (SADACC).

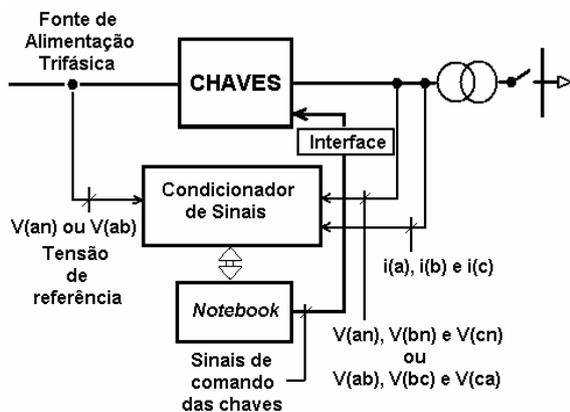


FIGURA 6 - Diagrama de blocos da estrutura do chaveamento controlado.



FIGURA 7 - Ilustração dos dispositivos físicos utilizados na estrutura para o chaveamento controlado.

Os principais componentes do sistema de aquisição e chaveamento controlado são:

- Um transformador trifásico do tipo núcleo envolvido;
- Uma placa de condicionamento de sinais com possibilidade de leitura das tensões e correntes trifásicas, com capacidade de enquadramento dos níveis destes sinais a valores compatíveis com a etapa de digitalização;
- Uma placa de aquisição, que ao receber os sinais já condicionados, realiza a digitalização dos sinais para que os mesmos possam ser processados em tempo real ou posteriormente;
- Um *notebook* que recebe e processa os cálculos necessários a execução da estratégia de chaveamento controlado, bem como a sincronização e emissão dos sinais digitais necessários a abertura e ao fechamento das chaves do circuito de potência;
- Circuitos de interface digital para interligar as saídas do *notebook* ao circuito de comando das chaves para energização ou desenergização do transformador;

- Um conjunto de chaves com comando individual por fase, capaz de fechar e abrir o circuito de potência através de sinais elétricos provenientes do módulo de controle conectados a saída do *notebook*.

Para que o transformador pudesse ser energizado a qualquer tempo e em qualquer seqüência utilizaram-se de três chaves eletrônicas compostas por tiristores bidirecionais cujas características estão descritas na tabela 2, associadas a um circuito de comando acionado pela porta de saída do *notebook*.

TABELA 2. Tiristores bidirecionais (Triacs) de silício.

Parâmetros	TIC263D
Tensão de pico repetitiva de bloqueio (V_{PRB})	400 V
Corrente direta efetiva de onda completa ($I_{DE (EFICAZ)}$)	25 A
Pico de corrente transitória direta – onda senoidal completa (I_{PTD})	175 A
Faixa de temperatura ambiente de operação	-40 a 110 °C

5.1 Energização não controlada (ligação estrela aterrada/estrela aterrada)

A figura 8 mostra as correntes transitórias de magnetização para um dos casos de energização não controlada. A tensão trifásica de suprimento foi aplicada ao transformador no instante da passagem por zero com derivada positiva da fase (a).

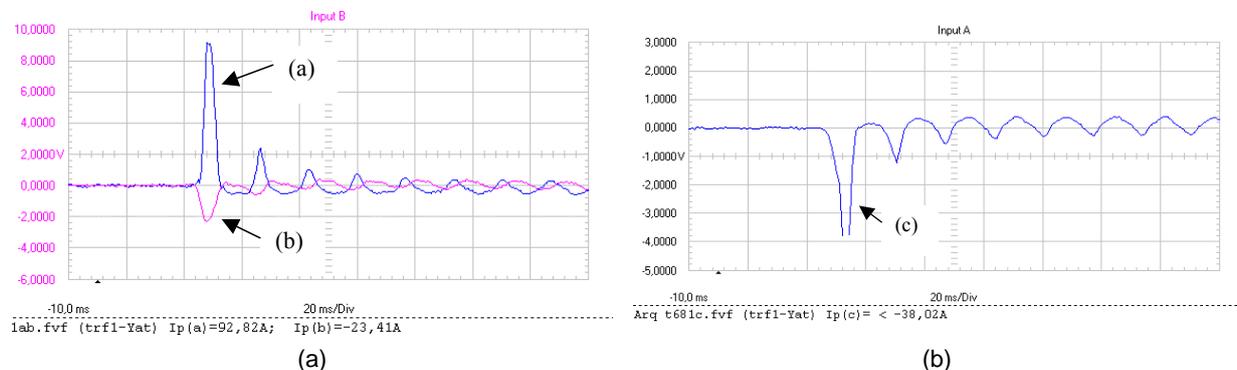


FIGURA 8 – Correntes transitórias de magnetização para energização não controlada; (a) Correntes nas fases (a) e (b); (b) Corrente na fase (c); Escala 20 A/div.

A tabela 3 resume os diversos casos ensaiados em laboratório. Em todos os casos, as chaves das três fases foram fechadas simultaneamente quando a tensão da fase (a) estava passando por zero com derivada positiva. O que difere cada caso são as diferentes condições de fluxo residual presente no núcleo do transformador.

TABELA 3 - Resumo dos ensaios de *inrush*: Conexão estrela aterrada/estrela aterrada; (Energização sem controle do fechamento das chaves).

Caso	Densidade de fluxo residual (T)	Fase com maior pico da corrente de <i>inrush</i>	I_{INRUSH_PICO} (A)	Relação: $I_{INRUSH_PICO} \div I_{NOM_PICO_SENOIDAL}$
1	$B_{r(col.A)} = -0,1598$ $B_{r(col.B)} = 0,5438$ $B_{r(col.C)} = -0,3725$	(a)	92,82	25,02
2	$B_{r(col.A)} = 0,0988$ $B_{r(col.B)} = -0,4983$ $B_{r(col.C)} = 0,3838$	(a)	91,82	24,75
3	$B_{r(col.A)} = -0,4234$ $B_{r(col.B)} = -0,0284$ $B_{r(col.C)} = 0,4630$	(a)	55,02	14,83
4	$B_r = 0,0$ (todas)	(a)	92,62	24,96

NOTA: Corrente nominal eficaz do transformador = 2,62 A e corrente senoidal de pico = 3,71 A.

Os resultados apresentados na tabela 3 mostram que o pico da corrente de *inrush* atinge 25 vezes a corrente nominal senoidal de pico do transformador para este tipo de ligação dos enrolamentos.

5.2 Energização controlada (ligação estrela aterrada/estrela aterrada)

Para o teste de energização controlada em laboratório, as seguintes etapas foram seguidas:

1ª) - Desenergização prévia do transformador, conforme tensões transitórias mostradas na figura 9;

2ª) - Cálculo do fluxo residual no núcleo com informações extraídas da etapa de desenergização, isto é, a partir das tensões transitórias presentes nos enrolamentos do transformador, cujos resultados para os sinais de fluxos estão mostrados na figura 10 e resumidos numericamente na tabela 4;

3ª) - Energização controlada conforme gráficos das tensões e correntes mostradas nas figuras 11 e 12, respectivamente. Neste caso a coluna (a) deteve o maior fluxo residual em módulo, sendo energizada em primeiro lugar, posteriormente fechou-se as chaves das fases (b) e (c) simultaneamente.

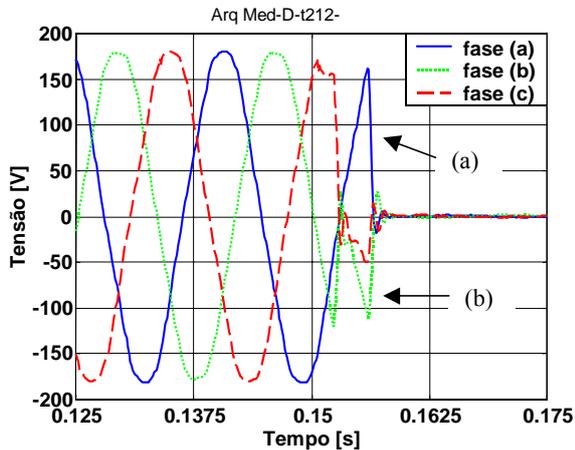


FIGURA 9 - Tensões nos terminais do transformador durante a etapa de desenergização.

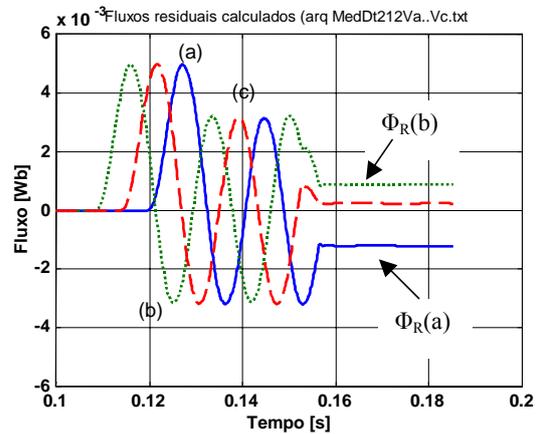


FIGURA 10 - Fluxos residuais no núcleo .

TABELA 4. Principais grandezas extraídas da etapa de desenergização.

	Fase (a)	Fase (b)	Fase (c)
V_{EFICAZ} (V)	128,50	127,76	128,40
Fluxo residual (Wb)	-0,00121	0,000887	0,000243
B_R (Tesla)	-0,4641	0,3398	0,0932
α	$-22,76^\circ$		
α'	$67,24^\circ$		

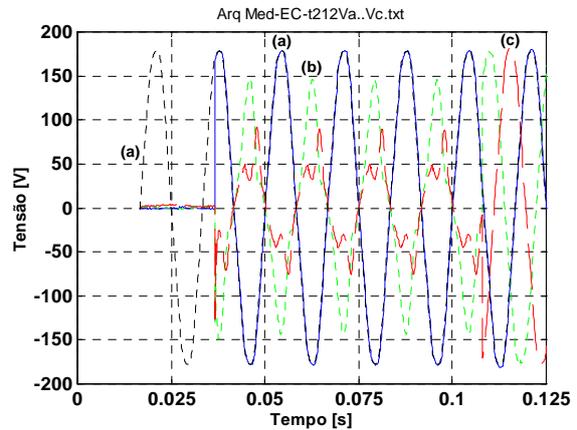
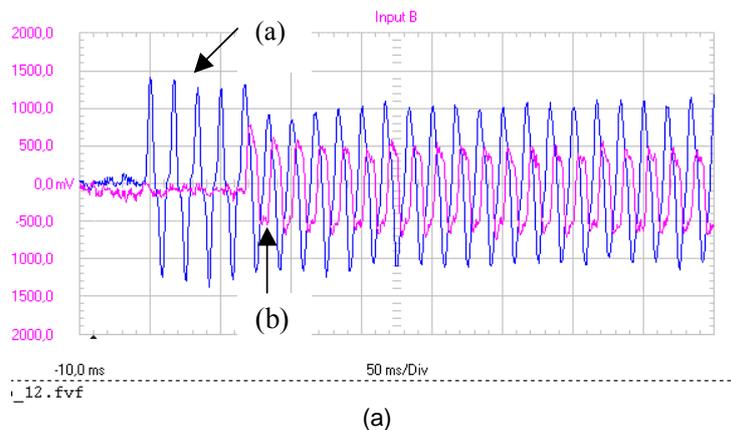


FIGURA 11. Tensões nos terminais do transformador durante as etapas de energização controlada.



(a)

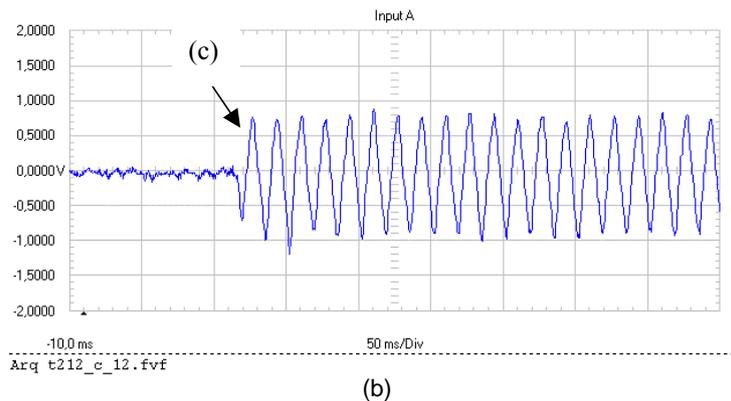


FIGURA 12. Correntes de magnetização das três fases: (a) corrente nas fases (a) e (b); (b) corrente na fase (c).

Os resultados anteriores mostraram que as correntes de excitação em vazio atingem a condição de regime permanente sem qualquer sobre-elevação. Repetidos testes foram realizados utilizando-se da energização controlada, cujos resultados se assemelham àquele apresentado anteriormente, ratificando, portanto, a eficiência da estratégia de chaveamento proposta.

6.0 - CONCLUSÕES

A modelagem do transformador trifásico através do uso de relutâncias e forças magnetomotrizes, convenientemente associadas aos modelos (*templates*) do simulador Saber, mostrou ser bastante eficiente para representar as interações entre os fluxos magnéticos das diferentes fases. O acesso as variáveis magnéticas do modelo permitiu definir os instantes ótimos de fechamento das fases/chaves ainda abertas durante a energização controlada. Os resultados das simulações e os testes em laboratório para um transformador trifásico ligado em estrela aterrada do lado energizado, mostraram a eficiência do procedimento de energização controlada, sem o surgimento das elevadas correntes transitórias de magnetização. Os fundamentos da energização controlada basearam-se na necessidade de se igualar o fluxo residual e o fluxo presumível da primeira fase a ser energizada, definindo assim o primeiro instante de fechamento e, posteriormente, a igualdade entre os fluxos dinâmicos e os fluxos presumíveis para a definição do instante para o fechamento das chaves ainda abertas. O procedimento de energização controlada pode ser estendido a qualquer tipo de ligação dos enrolamentos, simplesmente utilizando-se os instantes ótimos para o fechamento das chaves/fases para essas novas ligações. Estes instantes de tempo ótimos também deverão ser obtidos utilizando-se as simulações digitais.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BRUNKE, J. H. and FRÖHLICH, K. J., Elimination of transformer inrush currents by controlled switching – part I: theoretical considerations, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 16, No. 2, April 2001, pp. 276-280.
- (2) BRUNKE, J. H. and FRÖHLICH, K. J., Elimination of transformer inrush currents by controlled switching – part II: Application and performance considerations, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 16, No. 2, April 2001, pp. 281-285.
- (3) PORTALES, E. and BUI-VAN, Q., New control strategy of inrush transient during transformer energization at Toulustouc hydropower plant using a double-break 330 kV circuit breaker, **International Conference on Power Transients-IPST**, New Orleans, USA, pp. 1-6.
- (4) APOLONIO, R., OLIVEIRA, J. C., BRONZEADO, H. S. e VASCONCELLOS, A. B., The use of Saber Simulator for three-phase non-linear magnetic devices simulation: steady-state analysis, **The 7th Brazilian Power Electronics Conference**, Fortaleza, Ceará – Brazil, pp. 524-529.
- (5) JILES, D.C. and ATHERTON, D.L., Theory of ferromagnetic hysteresis, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 61, North-Holand, Amsterdam, 1986, pp. 48-60.