



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

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DO CICLO DE HISTERESE NO MODELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS NO PROGRAMA ATP

Elise Saraiva*
UFU

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves
UFU

Herivelto de Souza Bronzeado
CHESF

RESUMO

No estudo da energização suave de transformadores é imprescindível considerar a magnetização residual do núcleo ferromagnético. Esta condição é obtida com a implementação da curva de histerese na modelagem do transformador, que usualmente não é fornecida pelos fabricantes. O programa ATP possui um modelo de indutor não-linear que permite a implementação da curva e uma sub-rotina chamada "HYSTERESIS", que gera a curva de um material de aço silício de grãos orientados típico. Esse Informe Técnico propõe a apresentação da metodologia para implementação do ciclo de histerese, com base na curva gerada pelo ATP e dados do transformador.

PALAVRAS-CHAVE

Energização Suave, Modelagem de Transformadores, ATP, Ciclo de Histerese.

1.0 - INTRODUÇÃO

Para se estudar a energização suave de transformadores, realizada através do fechamento controlado dos pólos do disjuntor, é imprescindível levar em consideração a condição de magnetização residual do núcleo ferromagnético. Esta condição é obtida com a utilização do ciclo de histerese do núcleo magnético, tornando-se, portanto, imperativo a implementação deste fenômeno na modelagem do transformador. Usualmente, a curva de histerese não é fornecida pelos fabricantes de transformadores, sendo mais comum a apresentação da curva de magnetização B-H da chapa utilizada na fabricação do núcleo.

O programa ATP, muito utilizado no setor elétrico, possui um modelo de indutor não-linear que permite a implementação da curva de histerese, conhecendo-se ponto a ponto a curva de histerese do material empregado no núcleo. Esse modelo, denominado de "indutor pseudo não-linear com histerese, tipo 96", será utilizado para o desenvolvimento da metodologia proposta. Segundo o manual de utilização do ATP (1), esse elemento, permite a representação do ciclo de histerese desde que o usuário tenha disponível em mãos os dados relativos ao maior laço do ciclo. Caso o usuário não possua esses dados, o programa ATP disponibiliza uma sub-rotina chamada de "HYSTERESIS", que requer como dado de entrada apenas o ponto de saturação positivo, dado pelos valores de pico da corrente (I) e do fluxo total concatenado (λ). Com este ponto, o ATP gera os pontos (Corrente-Fluxo), relativos à parte inferior da curva do maior laço do ciclo de histerese de um material ARMCO Mh aço silício de grãos orientados (1), que será utilizada como base neste trabalho.

A modelagem do transformador utilizada neste Informe Técnico é baseada no circuito magnético, levando em consideração os caminhos que os fluxos magnéticos percorrem, seja pelo ar, ou pelo material ferromagnético do núcleo (2), (3).

Aplicando-se o princípio da dualidade ao circuito magnético do transformador obtém-se o circuito elétrico dual que é modelado no ATP (3), (4), (5).

Nesse circuito cada bobina (fonte de f.m.m.) é representada por um transformador ideal e os possíveis caminhos para o fluxo magnético são representados por indutâncias lineares ou não lineares conforme o meio, ar ou ferro. As resistências dos enrolamentos são inseridas em cada transformador ideal. As perdas no ferro são obtidas pela área do ciclo de histerese e por resistências em paralelo com cada indutor não linear.

2.2 Características do transformador

As características construtivas do transformador modelado são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – Características do transformador trifásico de três colunas, 100 MVA, 230/138 kV.

Tipo de ligação nos enrolamentos		Alta / Baixa tensão	estrela
Número de espiras			
Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4
394	756	98	64
Resistência das bobinas			
Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4
0,132 Ω	0,6883 Ω	0,0438 Ω	0,0608 Ω
Área		Coluna / Culatra	0,3775 m ²
Densidade de fluxo magnético		Coluna / Culatra	1,61 Tesla
Comprimento médio do caminho magnético		Coluna	2,46 m
		Culatra	1,607 m
Área		Coluna / Culatra	0,3775 m ²
Corrente a vazio		0,588 %	
Imp. % de curto circuito		9,32 %	
Imp.% de seqüência zero		8,86 %	
Perdas totais no ferro		53,34 kW	
Frequência de operação		60 Hz	

O material utilizado é do tipo aço ao silício de grão orientado, da ACESITA, do tipo E-004, com espessura de 0,27mm (10). Para esse material, obteve-se do fabricante somente a curva de magnetização B-H, não sendo disponível o ciclo de histerese.

3.0 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

O cálculo dos parâmetros que representam o núcleo magnético, ou seja, os indutores lineares e não lineares devem ser determinados com referência a uma base de tensão única e arbitrária, com isso, todas as grandezas e parâmetros devem ser referidos a essa base. Nesse caso, a base de tensão adotada é de 10 kV.

3.1 Procedimento para representar o ciclo de histerese

Para gerar o ciclo de histerese de cada coluna ou culatra, a perda por histerese de cada uma dessas partes foi calculada a partir da perda total no ferro, fornecida pelo fabricante, levando-se em consideração a distribuição equitativa entre as perdas por histerese e Foucault (8).

A distribuição da perda por histerese entre as colunas (P_{H_col}) e culatras (P_{H_cul}), é feita na proporção dos respectivos comprimentos médios dos caminhos magnéticos de cada coluna e culatra (l_{col} e l_{cul}) e o caminho magnético total do núcleo (l_{total}), uma vez que a seção magnética do núcleo é homogênea. Esses dados são facilmente obtidos na Tabela 1.

$$P_{H_col} = \frac{P_H}{l_{total}} \times l_{col} \quad \text{e} \quad P_{H_cul} = \frac{P_H}{l_{total}} \times l_{cul}$$

3.1.1 Determinação do ciclo de histerese

Para a determinação do ciclo de histerese, primeiramente, necessita-se obter o valor da indução magnética nominal do núcleo do transformador (6), que pode ser determinada como a seguir:

$$\lambda = \frac{V_n \times \sqrt{2}}{2 \times \pi \times f}; \quad \phi = \frac{\lambda}{N}; \quad B_n = \frac{\phi}{S_m}$$

onde:

- λ – Fluxo total concatenado produzido pelo enrolamento de alta tensão (ou baixa) [Wb-espiras].
- V_n – Tensão (fase-neutro) nominal do enrolamento de alta tensão (ou baixa) [kV]
- f – Freqüência da rede [Hz].
- ϕ – Fluxo magnético [Wb].
- N – Número de espiras do enrolamento de alta tensão (ou baixa) [espiras].
- B – indução magnética nominal [T].
- S_m – Área da seção magnética [m²].

Após calcular a indução magnética nominal (B_n), e de posse da curva de magnetização B-H, encontra-se o respectivo valor do campo magnético nominal (H_n).

Para o cálculo da permeabilidade magnética incremental ($\Delta\mu_n$) para o ponto nominal (B_n, H_n) é necessário obter na curva de magnetização B-H um ponto anterior (B_1, H_1) e um posterior (B_2, H_2) aos pontos nominais de indução magnética.

$$\Delta\mu_n = \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1}$$

Obtido o valor da permeabilidade magnética incremental para o núcleo de ferro, podem-se encontrar os valores das relutâncias das colunas e das culatras. Esses cálculos são mostrados na seqüência, lembrando que tanto os comprimentos médios dos caminhos magnéticos (l_{col} e l_{cul}), quanto a área da seção magnética foram retirados da Tabela 1.

$$\mathfrak{R}_{col} = \frac{l_{col}}{\Delta\mu_n \times S_m} \quad \text{e} \quad \mathfrak{R}_{cul} = \frac{l_{cul}}{\Delta\mu_n \times S_m}$$

Os valores das correntes (I_{col} e I_{cul}), necessários à produção de f.m.m. para gerar o fluxo nominal, são calculados a seguir. Entretanto, é importante observar que esses valores devem ser referidos à base de tensão adotada de 10kV.

$$I_{col} = \frac{\mathfrak{R}_{col} \times \phi}{N} \left(\frac{V_{base}}{V_n} \right) \quad \text{e} \quad I_{cul} = \frac{\mathfrak{R}_{cul} \times \phi}{N} \left(\frac{V_{base}}{V_n} \right)$$

Os pontos nominais de fluxo total e corrente equivalente para colunas (λ, I_{col}) e culatras (λ, I_{cul}), na base de 10 kV, são então encontrados.

Como já foi dito anteriormente, para gerar os pontos inferiores do ciclo de histerese, das colunas e culatras, com o auxílio da sub-rotina "HYSTERESIS" do ATP é necessário encontrar o ponto de saturação da chapa do transformador (1). Esse ponto é obtido com a ajuda da curva de magnetização B-H da chapa, da seguinte maneira: traça-se uma reta que tangencia a parte linear da curva de magnetização B-H, no sentido da direita para a esquerda, o ponto de saturação é aquele ponto no qual essa reta deixa de coincidir com a curva, como pode ser visto na Figura 2.

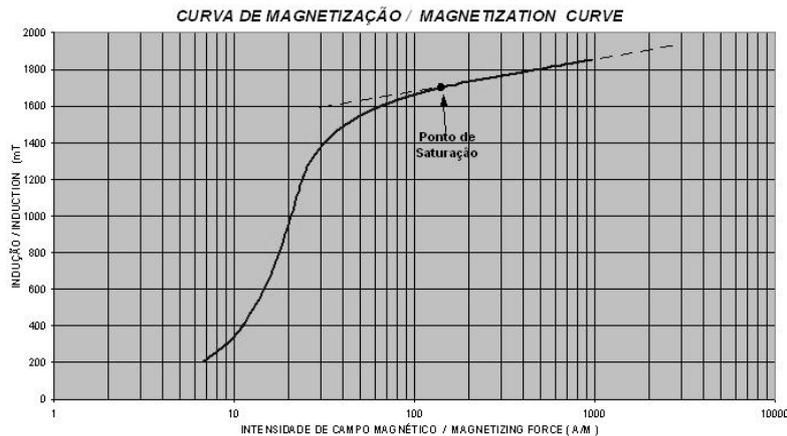


FIGURA 2 – Determinação do ponto de saturação, através da curva de magnetização B-H da chapa.

Tais valores devem ser referidos em unidades de fluxo total [Wb-espiras] e corrente de pico [A], para que a sub-rotina "HYSTERESIS" possa gerar os pontos da curva inferior do ciclo de histerese. Esta referência é feita com base nos valores nominais de fluxo e corrente determinados, tanto para as colunas (λ, I_{col}) como para as culatras (λ, I_{cul}), ou seja:

$$\lambda_{sat} = \lambda_n \times \frac{B_{sat}}{B_n}; \quad I_{sat_col} = I_{col} \times \frac{H_{sat}}{H_n}; \quad I_{sat_cul} = I_{cul} \times \frac{H_{sat}}{H_n}$$

Desta forma, os pontos de saturação para as colunas (λ_{sat} , I_{sat_col}) e as culatras (λ_{sat} , I_{sat_cul}) são utilizados pela sub-rotina “HYSTERESIS” para gerar os respectivos pontos da curva inferior do ciclo de histerese.

Nesse instante é interessante observar que os valores de corrente (I_{cul}) e perda por histerese (P_{H_cul}), obtidos até agora, representam apenas uma culatra, e como no modelo do transformador as duas culatras de um mesmo lado (superior e inferior) conduzem a mesma fase de fluxo magnético, e estas, no circuito elétrico dual, por simplicidade são representadas por uma indutância equivalente, a corrente e a perda devem ser multiplicadas por 2 (3).

Uma vez obtidos os pontos da parte inferior do ciclo de histerese, procedeu-se a simulação de um indutor saturável com histerese representando apenas uma coluna do transformador (6). Nessa simulação o indutor foi excitado em regime permanente com sua tensão nominal a fim de determinar a potência dissipada pelo ciclo de histerese. Os resultados dessa simulação mostraram que o ciclo de histerese construído estava dissipando uma potência muito maior do que aquela prevista nas considerações anteriores. Esse fato conduziu a ajustes dos valores dos pontos gerados pela rotina “HYSTERESIS” de forma a se obter um ciclo de histerese mais “fino” e que dissipasse o mesmo valor de potência previsto para a perda por histerese na coluna. O ajuste foi feito somente nos valores da corrente (campo magnético) e na proporção devida da redução da potência dissipada. Observa-se que os pontos relativos à excitação nominal ou maior foram preservados. Outro aspecto importante a ser citado é que a rotina “HYSTERESIS” determina somente um ponto após o ponto de saturação, para a representação de toda região saturada da curva de magnetização. Tendo em vista que o objetivo principal desse trabalho é analisar as correntes de “inrush”, e estas somente ocorrem quando o material magnético está na região saturada, fez-se uma melhoria na representação dessa parte no ciclo de histerese acrescentando-se mais pontos extraídos da curva B-H (6).

A Figura 3 mostra o resultado obtido por esse procedimento. Nessa figura o ciclo externo é o gerado pela rotina “HYSTERESIS” do ATP e o ciclo interno, hachurado, é o obtido depois do referido ajuste. Ajustado o ciclo de histerese para as colunas, o mesmo procedimento é aplicado para obtenção do ciclo de histerese para as culatras.

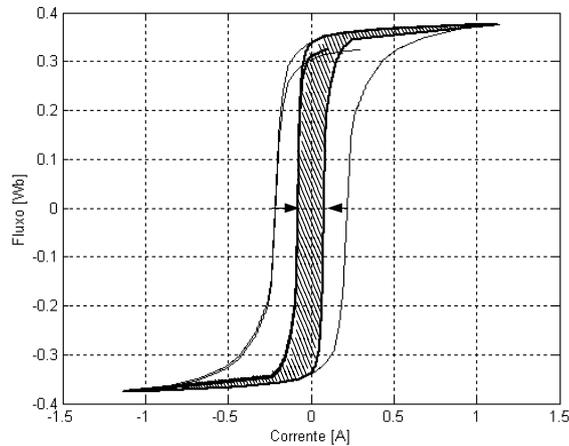


FIGURA 3 – Ciclo de histerese gerado pelo ATP e ciclo de histerese ajustado (hachurada).

A perda por correntes de Foucault será representada por resistores em paralelo com os indutores não lineares (3), determinados por:

$$R_{F_col} = \frac{V^2}{P_{F_col}} \quad \text{e} \quad R_{F_cul} = \frac{V^2}{P_{F_cul}}$$

O valor da resistência da perda de Foucault, para a culatra, será dividida pelo fator 2, para representar as duas culatras de um mesmo lado.

3.1.2 Cálculo das indutâncias lineares

Os cálculos dessas indutâncias serão realizados com base na distribuição de fluxo no ar, dentro do transformador. Portanto, para efetivação desses cálculos os dados geométricos do transformador são imprescindíveis e para calcular tais indutâncias utilizou-se a expressão a seguir.

$$L_n = \frac{N_n^2 \times \mu_o \times S_n}{l_n}$$

Onde:

l_n – comprimento médio do caminho magnético percorrido pelo fluxo a ser representado pela indutância L_n .

N_n – número de espiras da bobina que o produz considerando a base de tensão adotada (10 kV).

S_n – área de ar por onde flui o fluxo analisado.

μ_o – permeabilidade magnética do ar $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

A Tabela 2 mostra um resumo dos valores dos parâmetros do modelo do transformador no qual é considerado o ciclo de histerese.

TABELA 2 – Parâmetros do modelo de transformador trifásico de três colunas utilizados no programa ATP, considerando a histerese.

Transformador ideal representativo das bobinas					Representação do Ciclo de Histerese		
Relação de Transformação [kV]					λ	I_{col}	I_{cul}
Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4				
63,805/10	122,43/10	15,87/10	10,364/10		-4.660E+01	-4.807E+03	-3.140E+03
Resistência das bobinas [Ω]					-4.194E+01	-3.140E+02	-2.051E+02
Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4		-3.762E+01	-9.936E+00	-1.298E+01
$R_1 = 0,132$	$R_2 = 0,6883$	$R_3 = 0,0438$	$R_4 = 0,0608$		-3.611E+01	-8.024E-02	-1.213E-01
Indutores lineares [mH]					-3.471E+01	2.674E-02	4.046E-02
L_{col1}	L_{12}	L_{23}	L_{34}	L_o	-3.029E+01	1.551E-01	2.346E-01
0,46434	1,15272	0,05293	0,00420	0,63471	-1.864E+01	2.139E-01	3.236E-01
Pontos utilizados para gerar o ciclo de Histerese					3.029E+01	5.830E-01	8.820E-01
		I [A]		λ [Wb]	3.471E+01	1.043E+00	1.578E+00
Colunas		88,328		39,6102	3.634E+01	1.953E+01	2.164E+01
Cultras		115,3994		39,6102	3.751E+01	4.625E+01	3.021E+01
Resistências representativas das perdas por Foucault [Ω]					3.867E+01	5.520E+01	7.212E+01
$R_{F_{col}}$	21.052,63				3.961E+01	8.832E+01	1.153E+02
$R_{F_{cul}}$	16.108,25				4.194E+01	3.140E+02	2.051E+02

4.0 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1 Simulações em regime permanente

Com o objetivo de verificar o desempenho do modelo do transformador, realizou-se simulações em regime permanente representativas da operação em vazio, em curto circuito com suprimento trifásico e em curto circuito com suprimento monofásico.

A Tabela 3 mostra uma síntese dos resultados obtidos pelas simulações e as diferenças percentuais quando estes são comparados com as informações fornecidas pelo fabricante do transformador.

TABELA 3 – Síntese dos resultados obtidos pela simulação e a respectiva diferença percentual entre os dados fornecidos pelo fabricante.

Parâmetros	Valor Simulado	Valor do Fabricante	Diferença Percentual
Corrente de magnetização %	0,554 %	0,588 %	5,78 %
Impedância de dispersão %	9,312 %	9,32 %	0,086 %
Impedância de seqüência zero %	8,587 %	8,86 %	3,08 %
Perda no ferro	53,01 kW	53,34 kW	0,62 %

Os resultados da Tabela 3 mostram que a modelagem do transformador apresentou resultados considerados satisfatório nas simulações em regime permanente.

4.2 Simulações de energização

Apresenta-se a seguir os resultados de duas simulações de energização do transformador: a primeira, com fluxo residual nas colunas e cultras, o transformador é energizado simultaneamente nas suas três fases em um instante aleatório; a segunda é feito um chaveamento controlado considerando os instantes ótimos para o fechamento de cada pólo do disjuntor.

4.2.1 Energização aleatória

Considera-se neste caso que o transformador tem os seguintes fluxos residuais: colunas externas e culatras – 0,25 pu; coluna central 0,5 pu.

A Figura 4 mostra as correntes nas três fases do transformador.

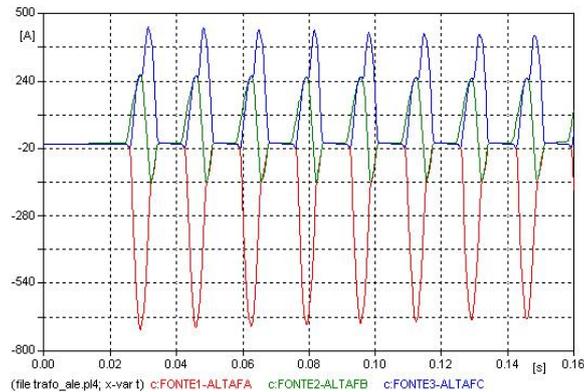


FIGURA 4 – Correntes nas três fases do transformador com energização aleatória.

4.2.2 Energização controlada

Neste caso, considera-se a mesma condição de fluxo magnético residual anterior e que o primeiro pólo do disjuntor a ser fechado é aquele relativo à fase da coluna central (B) e, a fonte de tensão a ser aplicada é dada por: $V_a = V_m \cos(\omega t - 120^\circ)$; $V_b = V_m \cos(\omega t)$; $V_c = V_m \cos(\omega t + 120^\circ)$, sendo assim o instante ótimo para o fechamento do primeiro pólo é obtido por:

$$t_o = \left[\frac{\pi - \text{sen}^{-1}\left(\frac{\omega \lambda_o}{U_m}\right)}{\omega} \right] + kT_o [ms]$$

onde,

- λ_o – valor do fluxo residual (positivo);
- $\omega = 2\pi f$ – freqüência angular do sistema;
- U_m – valor da amplitude da tensão aplicada;
- T_o – período.
- k – 0, 1, 2, 3,

Após o fechamento do primeiro pólo do disjuntor, tem-se o estabelecimento de fluxo magnético nas colunas externas equivalente à metade do fluxo da coluna central e com o sentido trocado. Comparando-se os fluxos que serão estabelecidos nos enrolamentos pelas tensões aplicadas com os fluxos das colunas tem-se a definição do instante ideal para o fechamento dos outros pólos. A Figura 5 ilustra essa situação destacando os instantes ideais para o fechamento dos outros pólos.

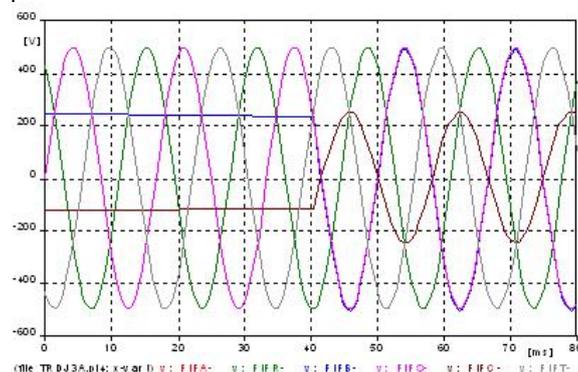


FIGURA 5 – Fluxos estabelecidos nos enrolamentos pelas tensões aplicadas e fluxos das colunas.

Definidos os instantes de fechamentos dos pólos do disjuntor apresenta-se a seguir as correntes nas três fases do transformador obtidas pela simulação de uma energização controlada obedecendo aos seguintes instantes para o

fechamento dos pólos do disjuntor: pólo relativo à coluna central: $t_0 = 40,277$ ms; pólos relativos às colunas externas: 79,167 ms

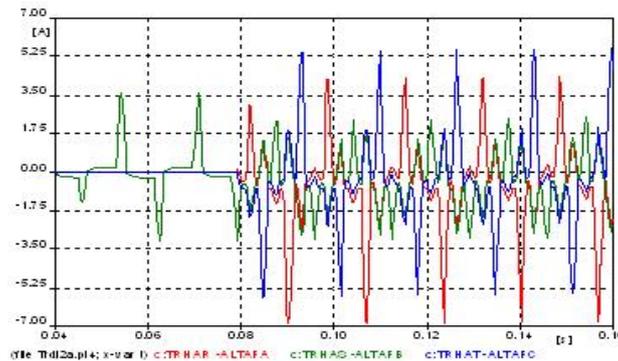


FIGURA 6 – Correntes nas três fases do transformador com energização controlada.

5.0 - CONCLUSÃO

A modelagem baseada na distribuição de fluxo magnético no núcleo do transformador propicia um melhor detalhamento do seu acoplamento magnético, que é negligenciado nos modelos que utiliza um banco três de transformadores monofásicos para a representação de um transformador trifásico. Esse acoplamento magnético é imprescindível na análise dos efeitos da corrente de energização e energização suave dos transformadores.

Após proceder a implementação do ciclo de histerese no modelo de transformador trifásico de três colunas, pode-se verificar que o modelo, quando submetido às simulações em regime permanente, apresenta resultados satisfatórios, uma vez que as diferenças percentuais obtidas nas referidas simulação não ultrapassa 5,78%.

Além disto, o modelo evidencia a necessidade de se considerar o ciclo de histerese para o estudo de energização suave de transformadores, pois a magnetização residual, obtida com a utilização do ciclo de histerese do núcleo magnético, influencia nos valores da correntes de energização “Inrush”.

A chamada energização suave é realizada com o chaveamento controlado que determina o instante ideal para o fechamento de cada pólo do disjuntor a fim de evitar a saturação do núcleo do transformador e por conseqüência as elevadas correntes de “Inrush”. Para o sucesso do chaveamento controlado é necessário o conhecimento do fluxo magnético em cada coluna do transformador e o fluxo que será produzido pela tensão aplicada ao respectivo enrolamento.

Os resultados das simulações confirmam as expectativas de corrente obtidas pelo chaveamento controlado.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LEUVEN EMTP CENTER (LEC) - Alternative Transients Program (ATP) – RULE BOOK, July/1987.
- (2) YACAMINI, R. and BRONZEADO, H. – “Transformer inrush calculation using a coupled electromagnetic model”, IEE Proc.Sci.Meas.Technol., V.141, no 6, November/1994.
- (3) FANDI, J. C. O. – “Modelagem de Transformadores de Três Colunas para Estudos de Corrente de Energização”, Dissertação de Mestrado - UFU - Uberlândia -2003.
- (4) CHERRY, E. C. – “The Duality Between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuits”, Proc. Of the Physical Society, V.(B) 62, pages 101-111, February/1949.
- (5) SLEMON, G. R. – “Equipamentos Magnetelétricos: Transdutores, Transformadores e Máquinas”, **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.**, 1974.
- (6) SARAIVA, E. – “Modelagem de Transformadores de Três Colunas com Base na Distribuição de Fluxos Magnéticos no Núcleo, Considerando o Efeito do Ciclo de Histerese”, Dissertação de Mestrado - UFU - Uberlândia -2004.
- (7) McPHERSON, G. and LARAMORE, R. D. – “An Introduction to Electrical Machines and Transformers”, John Wiley & Sons, 1990.
- (8) ABNT, Rio de Janeiro - NBR5380 – “Transformador de Potência– Método de Ensaio”, junho/1993.
- (9) MATSCH, L. W. and MORGAN, J. D. – “ Electromagnetic and Eletromechanical Machines”, John Wiley & Sons, 1986.
- (10) ACESITA – Catálogo de Aço ao Silício de Grãos Orientados