



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

GSC 12
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

MODELAGEM DO TRANSFORMADOR REGULADOR DE TENSÃO PARA ESTUDOS DINÂMICOS UTILIZANDO O SOFTWARE ATP

José de Melo Camargo *
AES Eletropaulo

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves
UFU – Uberlândia

Milton Itsuo Samesina
UFU – Uberlândia

Elise Saraiva
UFU – Uberlândia

Alexandre Rocco
Univ. Santa Cecília

Alexandre Shozo Onuki
Univ. Santa Cecília

RESUMO

O estudo consiste em apresentar um modelo que represente um transformador regulador de tensão com comutação automática, a fim de permitir a realização de estudo de estabilidade dinâmica de um sistema elétrico, verificando o comportamento da tensão, corrente, frequência, potência ativa e reativa, em função das perturbações que este sistema está exposto.

Com isso, o modelo torna-se adequado para estudos dinâmicos tendo capacidade de simular perturbações de microssegundos até regime permanente que afetam a qualidade de energia do sistema elétrico.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem de Transformador, ATP, Estudo Dinâmico.

1.0 - INTRODUÇÃO

As modelagens de transformador disponível na literatura nacional e internacional contemplam a regulação de tensão utilizando um comutador manual, relacionando o número de taps do mesmo e seu nível de tensão correspondente. Ao realizar-se uma simulação, escolhe-se o tap, e analisa-se seus resultados.

Este modelo proposto tem o objetivo de permitir a realização de estudos dinâmicos do sistema elétrico, quanto ao comportamento da tensão, corrente e potência em diversas condições operativas e de ocorrências do sistema elétrico que o transformador regulador está exposto, bem como a variação de carga que o mesmo está alimentado.

Este estudo abrange os transformadores reguladores aplicados nas subestações transformadoras dos sistemas de subtransmissão e distribuição de energia. Para as subestações que utilizam autotransformadores parte deste estudo poderá ser aplicado, contudo deve ser realizado um estudo mais detalhado para sua modelagem.

O software ATP é uma ferramenta de grande flexibilidade e importância na realização de estudos de transitórios em sistema de potência, ou mesmo de estudos em regime permanente, onde a topologia da rede ou o problema a ser estudado não permite uma simples representação monofásica. O ATP possui modelo de reator pseudo não-linear saturável, tipo 98, que será utilizado no modelo proposto do transformador regulador. Esse elemento segundo Rulebook (1), permite representar a saturação do ramo de magnetização associado a um transformador ideal.

A modelagem do transformador desenvolvida baseia-se no circuito magnético considerando os caminhos que os fluxos magnéticos percorrem pelo ar ou pelo material ferromagnético do núcleo (2). Aplicando-se o princípio da dualidade ao circuito magnético obtêm-se o circuito elétrico dual que é implementado no ATP (3).

2.0 - TRANSFORMADOR REGULADOR

O transformador regulador a ser modelado é um transformador trifásico de potência 32/40 MVA com comutação automática de taps no enrolamento de alta tensão podendo ser operado na tensão nominal de 84 kV ou 131,6 kV.

2.1 Características Elétricas

As características elétricas do transformador a ser modelado são apresentadas na Tabela 1 obtida através dos dados de placa de identificação do equipamento.

TABELA 1 – Características elétricas do transformador regulador

Enrolamento	Potência (kVA)		Tensão Nominal (V)	Corrente (A)		Ligação
	ONAN	ONAF		ONAN	ONAF	
Alta Tensão	32.000	40.000	131.636	140,4	175,4	Estrela
			84.000	219,9	274,9	Delta
Baixa Tensão	32.000	40.000	13.800	1.338,8	1.673,8	Estrela aterrada
Terciário	10.667	13.333	7.967	446,3	557,9	Delta

2.2 Características construtivas

O transformador regulador trifásico foi projetado para operar nas tensões de 84 kV ou 131,6 kV, para atender esta condição operativa possui as seguintes características construtivas.

- a. O núcleo do transformador é constituído de laminados planos de aço ao silício para fins elétricos, de grão orientado, com envelhecimento máximo admissível de 5% conforme NBR 9119. O núcleo é do tipo envolvido utilizando chapa M4 e com material isolante entre lâminas do núcleo do tipo carlite, fabricação Acesita com as características apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 – Características do núcleo do transformador

Seção do núcleo	Coluna / Culatra	0,1304 m ²
Densidade de fluxo magnético	Coluna / Culatra	1,763 T
Comprimento médio do caminho magnético	Coluna	2,205 m
	Culatra	2,386 m

- b. O transformador possui cinco enrolamentos por fase com a seguinte funcionalidade:

- Enrolamento terciário: Este enrolamento tem o objetivo de permitir a circulação de correntes de seqüência zero quando o transformador for ligado em estrela – estrela. O enrolamento terciário está localizado ao lado do núcleo e possui 139 espiras;
- Enrolamento baixa tensão: Enrolamento do tipo concentrico em várias camadas uniformes, cobrindo o comprimento do núcleo. Este enrolamento é montado envolvendo o enrolamento terciário, possuindo 130 espiras;
- Enrolamento alta tensão: Este enrolamento é dividido em dois enrolamento iguais de 620 espiras, essa divisão do enrolamento deve-se para permitir que o comutador de taps esteja eletricamente instalado no meio dos enrolamentos e não na extremidade do enrolamento, permitindo assim que existe um amortecimento dos transitórios de tensão até o comutador do transformador;
- Enrolamento complementar alta tensão: Este enrolamento propicia o transformador a operar na tensão de 84 kV. Na operação de 131,6 kv este enrolamento não é energizado em carga. O mesmo está envolvendo o enrolamento de alta tensão e possui 131 espiras;
- Enrolamento regulação: Enrolamento composto por 8 bobinas independentes com 136 espiras por bobina. O mesmo está localizado envolvendo o enrolamento complementar de alta tensão. Cada bobina deste enrolamento corresponde aos taps para conexão ao comutador sob carga. Os pontos extremos deste enrolamento são conectados a um chaveamento do comutador onde permite alterar o sentido da corrente no enrolamento permitindo assim o transformador possuir o dobro de taps.

2.3 Ensaio Elétricos do Transformador

Quando da fabricação deste equipamento foram realizados os ensaios de tipo e rotina pelo fabricante. Através dos resultados destes ensaios calculam-se alguns parâmetros do transformador que será implementado no modelo proposto.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios realizados, que são:

- Ensaio de relação de transformação;

- Ensaio de perdas a vazio e corrente de excitação;
- Ensaio de perdas em carga e impedância de curto-circuito;
- Ensaio de medição da impedância de seqüência zero.

TABELA 3 – Resultado dos ensaios do transformador para tap 9

Ensaio	Ligação Alta Tensão	
	Estrela	Delta
Corrente a vazio	0,09%	0,09%
Perdas a vazio	20310 W	20130 W
Impedância de curto-circuito	19,13%	20,09%
Perdas em carga	149420 W	144825 W
Impedância de seqüência zero	7,71%	25,35%

3.0 - COMUTADOR SOBRECARGA

Todo transformador regulador possui um sistema de comutação sobrecarga, podendo este acessório ser instalado no enrolamento de baixa tensão ou alta tensão. Esse sistema de comutação automática é composto por três sistemas descritos a seguir.

3.1 Seletor de Derivação

O comutador de sobrecarga é construído em módulos de unidades monofásicas formando assim o comutador trifásico. Cada unidade monofásica é constituída por placa de resina epoxi.

- Placa de resina epoxi onde são montados as buchas de passagem entre o transformador e o comutador e os contatos fixos onde são conectados os taps do enrolamento de regulação.
- Chave seletora que consiste de contato de contato fixo e um contato móvel. O contato móvel consiste do contato mestre e dois contatos de transição. No contato de transição são instalados resistores feitos de arames montados sobre uma bobina isolante.

A seqüência de chaveamento é projetado para o ciclo de transmissão simétrico, isto significa que o chaveamento do contato mestre interrompe depois do resistor de transição estar conectado no próximo tap. A taxa de interrupção de carga realiza-se no primeiro zero de corrente após a separação dos contatos, proporcionando um tempo do arco de aproximadamente 6 milissegundos em 50 Hz. A Figura 1 mostra a seqüência de chaveamento.

- A Figura 1.(a) mostra o contato mestre H está conduzindo a corrente de carga e os contatos de transição M2 e M1 estão abertos.
- A Figura 1.(b) mostra o contato de transição M2 está sobre o contato fixo 1 e o contato mestre H está interrompido. O resistor de transição no contato M2 conduz a corrente de carga.
- A Figura 1.(c) mostra o contato de transição M1 está sobre o contato fixo 2. A corrente de carga é dividida entre os contatos de transição M1 e M2. A corrente de circulação é limitada pelo resistor.
- A Figura 1.(d) mostra o contato de transição M2 interromper no contato fixo 1. O resistor de transição e o contato de transição M1 conduz a corrente de carga.
- A Figura 1.(e) mostra o chaveamento do contato mestre H está sobre o contato fixo 2. O contato de transição M1 está aberto no contato fixo 2, o contato mestre H conduz a corrente de carga.

3.2 Seletor de Comutação

A chave seletora de comutação é utilizada para duplicar a quantidade de taps do transformador utilizando o mesmo enrolamento regulação, impondo um sentido contrário da corrente e consequentemente uma diminuição do fluxo resultante. A seqüência de chaveamento quando o seletor de comutação R muda para chavear para mais ou menos é mostrado na Figura 2. O contato do seletor arma ao alcançar o contato fixo 12 após o chaveamento do contato fixo 11. O contato fixo 12 é suficientemente largo para cobertura total entre as duas posições do seletor de comutação.

O contato armado da chave de derivação tem o movimento mais além sobre o contato 12 sem qualquer interrupção ou qualidade da corrente. Ao mesmo tempo o contato armado da chave comutadora R, tem movimento direto do contato B para o contato C, invertendo o sentido da corrente no enrolamento de regulação.

4.0 - MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

4.1 Modelo do Transformador

Os transformadores trifásicos são do tipo núcleo envolvido com três colunas. Estes transformadores são projetados para a utilização em sistemas equilibrados e por consequência, a somatória dos fluxos magnéticos

produzidos pelos enrolamentos das três fases é nula. Entretanto carregamento desequilibrado pode ocasionar o surgimento de fluxos que quando somados nas três fases não se anulam.

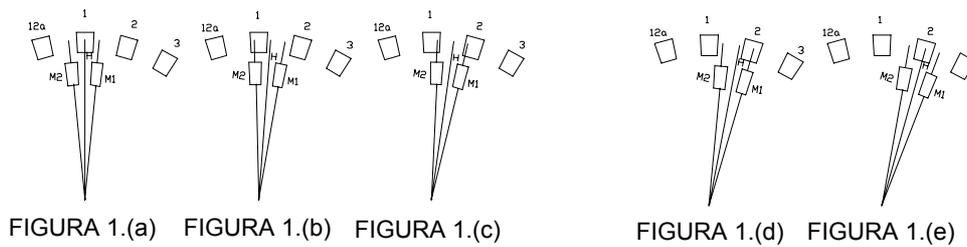


FIGURA 1 – Seqüência de chaveamento do seletor de derivação

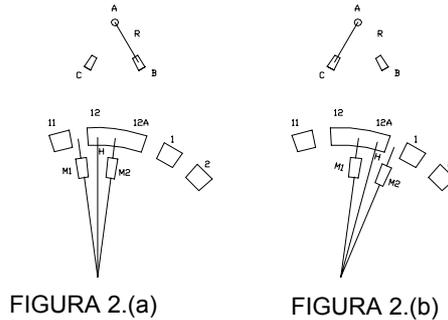
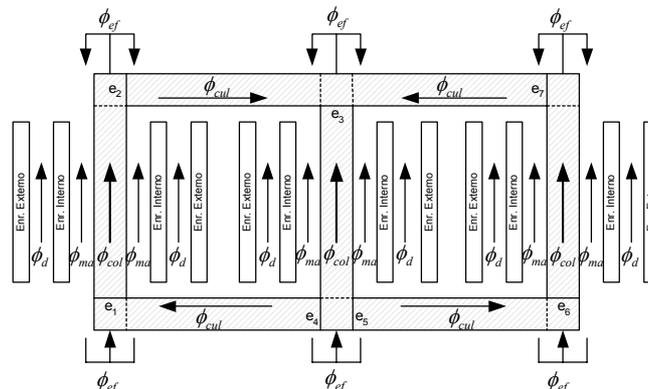


FIGURA 2 – Seqüência de chaveamento do seletor de comutação

Estes fluxos, chamados fluxos de seqüência zero, não possuem um caminho magnético através do núcleo, portanto estes fluxos circulam através do circuito magnético formado por ar e tanque do transformador. Este circuito é de alta relutância implicando em baixa impedância de magnetização.

Fazendo um corte transversal no núcleo de um transformador, como mostrado na Figura 3, observa-se que através da alimentação do enrolamento do transformador por uma fonte de tensão alternada, há a circulação de uma corrente também alternada neste mesmo enrolamento. Com a circulação dessa corrente, surgem os fluxos magnéticos, cuja forma de onda é também alternada e que tem como caminho principal o material ferromagnético da coluna do núcleo envolvido pelo enrolamento energizado (ϕ_{col}). Já uma pequena parcela do fluxo produzido percorre o caminho de ar existente entre a coluna e o enrolamento interno (ϕ_{ma}). Ambos os fluxos (ϕ_{col}) e (ϕ_{ma}) enlaçam os dois enrolamentos da mesma fase, o que os denomina de fluxo mútuo.

O fluxo (ϕ_{col}) caminha por toda a coluna atravessando o entreferro a ela associada e após atravessar tal entreferro, este fluxo continua caminhando através do material magnético, sendo que, uma pequena parcela continua para fora da coluna e se fecha pelo caminho correspondente ao ar e tanque do transformador (ϕ_{ef}), enquanto a maior parcela de (ϕ_{col}) percorre o caminho magnético das culatras (ϕ_{cul}).



O fluxo (ϕ_{cul}) caminha por toda a culatra e também atravessa o entreferro associado a ela. Outro fluxo que surge no núcleo do transformador é o chamado fluxo de dispersão (ϕ_d), que caminha pelo ar entre os enrolamentos de mesma fase (2) e (4).

Determinado os fluxos magnéticos e suas relutâncias desenvolve-se o circuito magnético aplicado-se o princípio da dualidade para a transformação do circuito magnético do transformador em um circuito elétrico equivalente a ser modelado no ATP, mostrado na Figura 4.

Como mostrado na Figura 4, os fluxos descritos acima são representados por indutâncias e os enrolamentos por transformadores ideais sendo seu primário a representação elétrica do modelo e o secundários com tensão de base de 10 kV a representação do circuito magnético. O enrolamento regulação também é representado por 8 transformadores ideais que são somadas ou subtraídas em relação ao enrolamento de alta tensão conforme a posição do tap.

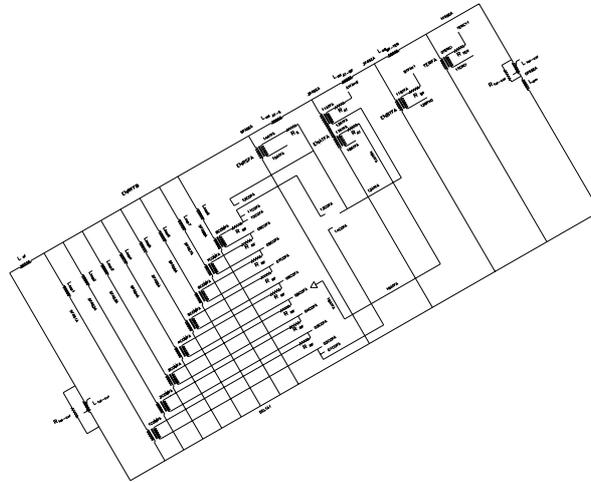


FIGURA 4 – Circuito elétrico equivalente do transformador, representação da fase A

O transformador possui dois níveis de tensão nominal no enrolamento de alta tensão, 84 kV ou 131,6 kV. Para atender esta condição de operação existe uma quantidade específica de espiras que são determinadas pelo tipo de ligação, delta e estrela respectivamente, com isso temos que adequar o modelo na forma de ligar o enrolamento complementar de alta tensão e nos valores dos fluxos de dispersão entre enrolamentos, ver Figura 4.

4.2 Curva de Magnetização

A não linearidade utilizada para representar o material magnético do núcleo foi à curva de magnetização $B \times H$ da chapa, sendo o ciclo de histerese desconsiderado. O modelo se mostra bastante satisfatório para o estudo de energização (Inrush) (4), no qual o transformador trabalha acima do ponto de saturação, que por definição é o ponto onde o ciclo de histerese deixa de ser representado por uma curva dupla e passa a ser representado pela própria curva de magnetização.

Pelo fato de desconsiderar o ciclo de histerese o modelo não representa bem o transformador quando o mesmo está operando abaixo do ponto de saturação, uma vez que para tal ponto, o ciclo de histerese deve ser considerado. Para maior proximidade do que acontece no material do núcleo e para representar a perda por histerese, a qual no modelo realizado foi representada por uma resistência em paralelo com a indutância representativa do material do núcleo, ver Figura 4.

É interessante ressaltar que o ciclo de histerese se torna importante quando se deseja estudar fenômenos relacionados com fluxo residual. Para a representação do ciclo de histerese em tal modelo, basta trocar o indutor pseudo não linear tipo 98 pelo tipo 96 disponível no ATP.

5.0 - VALIDAÇÃO DO MODELO DO TRANSFORMADOR

A validação do modelo do transformador regulador implementado no software ATP foi realizada comparando os ensaios de fabricação do transformador com a realização das simulações computacionais dos mesmos ensaios seguindo os métodos de ensaio descrito na NBR 5380. Estas simulações foram realizadas para a condição de ligação do transformador em estrela ou delta.

5.1 Ensaio de Relação de Transformação

Nesta simulação energizou-se o transformador com uma fonte constante de tensão equilibrada no valor de 13,8 kV nos terminais de baixa tensão do transformador, obtendo-se uma diferença percentual em relação a relação teórica conforme mostra a Figura 5 tap a tap. Analisando os resultados obtidos conclui-se que a relação obtida através da simulação e o cálculo teórico foi dentro dos limites impostos pela norma técnica.

5.2 Ensaio de Perdas a Vazio e Corrente de Magnetização

Esta simulação repetiu-se as condições do ensaio a vazio com o transformador sendo alimentado por uma fonte constante de tensão equilibrada no valor de 13,8 kV nos terminais de baixa tensão, com o terminal Xo isolado. A simulação foi realizada com o comutador no tap central.

Analisando os valores obtidos nesta simulação, nota-se que a corrente de magnetização obtida foi da ordem de 1,48 A correspondendo a 0,088% da corrente nominal com um conteúdo 5ª harmônica predominante de 0,566 A equivalente a 38,8% da fundamental.

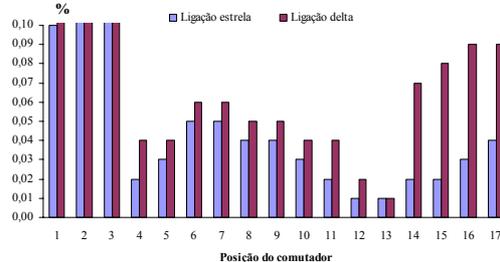


FIGURA 5 – Gráfico comparativo da diferença percentual da relação de transformação em módulo

5.3 Ensaio de Perdas em Carga e Impedância de Curto-circuito

Esta simulação repetiu-se as condições do ensaio de perdas em carga com o transformador alimentado por uma fonte constante no terminais de alta tensão e com os terminais de baixa tensão curto-circuitado, obtendo-se um diferença percentual da impedância de curto-circuito conforme mostra a Figura 6.

Analisando os valores obtidos observa-se que o valor da indutância de dispersão têm uma contribuição direta com o valor da impedância dispersão entre enrolamentos e as diferenças obtidas estão correlacionadas em função dos valores inseridos no modelo, obtidos do ensaio, e da somatoria de fluxos conforme o tap que está sendo analisado.

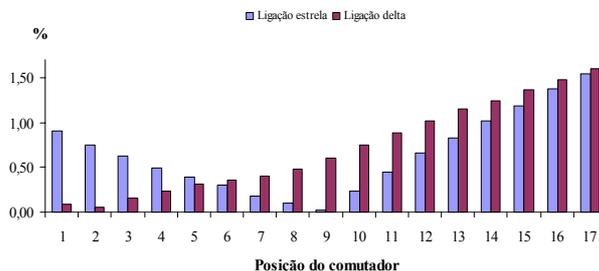


FIGURA 6 – Gráfico da diferença percentual da impedância de curto-circuito em módulo

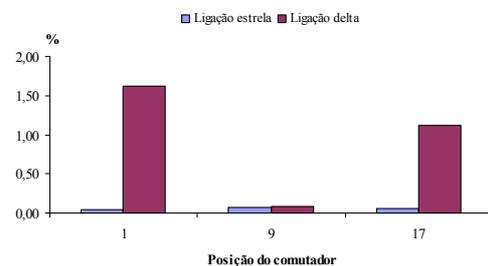


FIGURA 7 – Gráfico da diferença percentual da impedância de seqüência zero em módulo

5.4 Ensaio de Medição da Seqüência Zero

Esta simulação repetiu-se as condições do ensaio de medição da impedância de seqüência zero com o transformador alimentado por uma fonte monofásica entre os terminais X_1 , X_2 e X_3 curto circuitado e o terminal Xo, obtendo-se um diferença percentual conforme mostra a Figura 7. Neste ensaio observou que quando o transformador está ligado em delta apresenta um fluxo de dispersão entre bobinas 3,3 vezes maior para o transformador ligado em estrela, isso em função da ligação do enrolamento de alta tensão.

6.0 - DESEMPENHO DO MODELO DO TRANSFORMADOR

Analisou-se o desempenho deste modelo proposto inserido na modelagem de uma subestação e sendo analisado os fenômenos que ocorrem quando da atuação do sistema de comutação automática para a operação em vazio e em carga do transformador.

6.1 Operação em Vazio do Transformador

O estudo foi realizado obtendo-se os oscilogramas com a comutação automática de um tap do transformador e observou-se que essa comutação curto-circuita o enrolamento do tap a ser comutado obtendo-se uma corrente com valor máximo de até 200 A como mostra a Figura 9.(d) enquanto nas outras duas fases é devido ao

transitório da corrente de energização, Figura 9.(c), essa corrente altera também o oscilograma da corrente de magnetização aumentando a mesma em até 10 vezes, ver Figura 9.(a). A Figura 9.(b) mostra o comportamento da tensão quando da abertura do contato do tap e observa-se um pequeno transitório na tensão da fase A devido a corrente elevada que aparece na mesma devido ao curto-circuito deste tap.

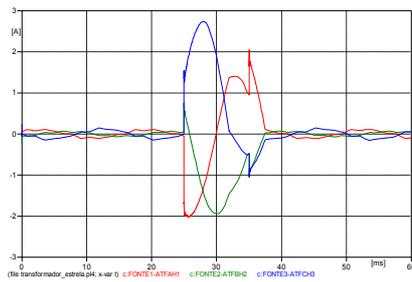


FIGURA 9.(a) – Corrente de magnetização

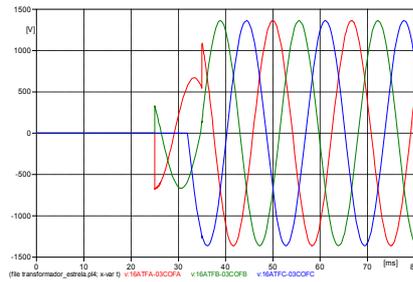


FIGURA 9.(b) – Comportamento da tensão no tap

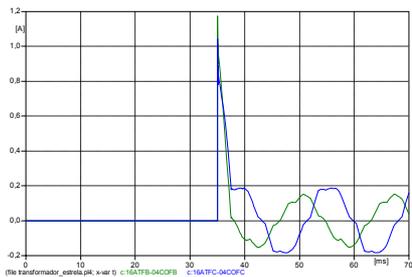


FIGURA 9.(c) – Corrente fechamento do tap, fase B e C

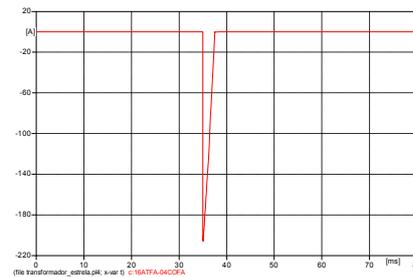


FIGURA 9.(d) – Corrente fechamento do tap, fase A

FIGURA 9 – Oscilogramas com a operação em vazio do transformador

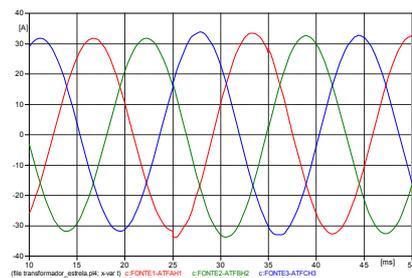


FIGURA 10.(a) – Corrente primária

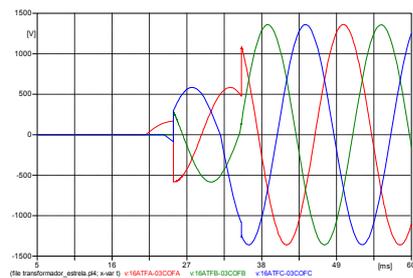


FIGURA 10.(b) – Comportamento da tensão no tap

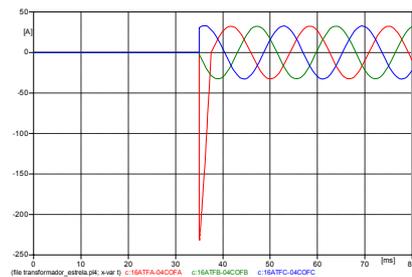


FIGURA 10.(c) – Corrente no fechamento do tap

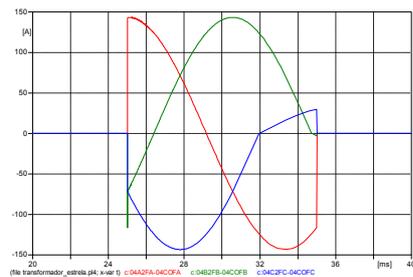


FIGURA 10.(d) – Corrente no resistor de transição

FIGURA 10 – Oscilogramas com a operação em carga do transformador

6.2 Operação em Carga Transformador

Com a operação em carga do transformador, obteve-se os oscilogramas com a comutação automática de um tap e observou-se que a contribuição na corrente de carga primária é da ordem de 3,7%, Figura 10.(a), enquanto que no tap de fechamento a corrente teve um pico de 227 A, Figura 10.(c), comparando com o pico obtido em vazio, Figura 9.(d) o comportamento foi semelhante e quando da passagem do resistor de transição a corrente foi na ordem de 143 A de pico, conforme mostra a Figura 10.(d). A Figura 10.(b) mostra o comportamento da tensão quando da abertura do contato obtendo-se o mesmo comportamento quando da operação em vazio.

7.0 - CONCLUSÃO

Observou-se em ambas simulações a vazio e em carga, que o comportamento da variação da tensão na baixa tensão é de 1,2% por um período de até 3 ciclos devido ao comutador ter um tempo de comutação de até 50 ms aproximadamente.

O modelo proposto nesta metodologia atendeu as expectativas de sua eficiência baseado nos resultados das simulações de validação realizada. Propiciando resultados satisfatórios para a realização de estudos dinâmicos com transitórios de curta duração.

O modelo também permitirá realizar-se estudos com relação aos efeitos das frequências de energização e aperfeiçoar as especificações dos equipamentos e sistemas elétricos de potência, onde o mesmo será aplicado. Isto permitirá realiza-se estudos de falhas em ocorrências do sistema elétrico cobrindo uma lacuna existente nas empresas do setor na busca de uma melhor eficiência e qualidade de energia.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LEUVEN EMTP CENTER (LEC) – Alternative Transients Program (ATP) – RULE BOOK, julho/1987.
- (2) LYNCE R. C., MARCELO; SARAIVA, ELISE e SOUZA B., HERIVELTO – Proposta de Metodologia para Implementação do Ciclo de Histerese no Modelo de Transformadores Trifásicos no Programa ATP – XVIII SNPTEE, Curitiba, 2005.
- (3) 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.
- (4) FANDI, JULIANA C.O. – Modelagem de Transformador de Três Colunas para Estudos de Corrente de Energização. Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Uberlândia, 2003.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

José de Melo Camargo

Nascido em São Paulo, em 24 de outubro de 1959.

Graduação (1955) em Engenharia Elétrica: UMC – São Paulo

Empresa: Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo, desde 1986

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

Nascido em Ituiutaba, MG, em 03 de outubro de 1951.

Doutorado (1995): Unicamp Campinas SP; Mestrado (1985): UFU Uberlândia-MG e Graduação em Engenharia Elétrica (1975): UFU Uberlândia-MG

Empresa: Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

Milton Itsuo Samesina

Nascido em Ipuã, SP, em 18 agosto de 1952.

Graduação (1977) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Uberlândia

MESTRE 919840 E doutor (1990) 3M Engenharia Elétrica pela USP - SP

PROFESSOR TITULAR NA FACULDADE DE Engenharia Elétrica da UFU

Alexandre Rocco

Nascido em São Paulo, SP, em 25 de março de 1954.

Graduação (1978) em Engenharia Elétrica: FEI- FAC. Eng Industrial

Mestrado em 1988 (UNICAMP), Doutorado em 1998 (EPUSP)

Empresas: ELETROPAULO (1979 a 1998), EPTEE (1998 a 2000), ENERQ/USP (2000 a 2003)

UNISANTA a partir de 1987

Alexandre Shozo Onuki

Nascido em Santos, SP, em 20 de Julho de 1967.

Graduação (1999) em Engenharia Elétrica: Universidade Santa Cecília

Empresas: COSIPA (1989 a 2001)

PROFESSOR TITULAR NA FACULDADE DE Engenharia Elétrica da UNISANTA

Elise Saraiva

Nascida em Uberlândia, MG, em 19 de novembro de 1976.

Mestrado (2004): UFU Uberlândia-MG e Graduação em Engenharia Elétrica (2001): UFU Uberlândia-MG

Atualmente é aluna de doutorado pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU.