



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LISSANDRO BRITO VIENA

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES NO PROGRAMA ATP
PARA O ESTUDO DO FENÔMENO DA FERRORESSONÂNCIA

Salvador-BA

2010

LISSANDRO BRITO VIENA

**MODELAGEM DE TRANSFORMADORES NO PROGRAMA ATP
PARA O ESTUDO DO FENÔMENO DA FERRORESSONÂNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira

Co – orientador: Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira

Salvador-BA

2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo incentivo, apoio e compreensão.

Ao orientador e co-orientador, professores Fernando Augusto Moreira e Niraldo Roberto Ferreira, respectivamente, por todo apoio, presteza e incentivo em todos os momentos, na troca de informações e experiências, durante a dura jornada na elaboração desse trabalho.

Ao Engenheiro Nelson Clodoaldo de Jesus (GSI Consultoria) pela parceria na realização desta pesquisa, principalmente nas sugestões sobre a utilização do programa ATP e na troca de experiências.

À Capes pela bolsa de estudo durante o primeiro ano do curso de mestrado.

Às empresas WEG e a RHEDE TRANSFORMADORES pelo fornecimento de informações sobre os transformadores que foram simulados.

Aos professores José Mário Araújo e Alexandre César Castro pelos ensinamentos durante o curso de graduação e pelo encaminhamento ao curso de Mestrado em Engenharia Elétrica.

E, finalmente a Deus, pois sem ele seria impossível a realização deste trabalho.

RESUMO

A ferrorressonância é um fenômeno oscilatório não-linear que pode ocorrer quando o transformador está conectado em elementos que provêem capacitância, tais como linhas aéreas, circuitos subterrâneos e capacitores shunt sob certas condições no sistema de potência. A não-linearidade é introduzida em virtude das características magnéticas do núcleo do transformador e devido a estas características, diversas respostas em regime permanente ou transitório podem ocorrer para vários valores dos parâmetros do sistema, diferentemente da ressonância envolvendo indutância linear, em que existe apenas uma combinação possível de valores de elementos do circuito capaz de produzir sobretensão.

A principal característica desse fenômeno é que ele pode produzir sobretensões elevadas que perduram no sistema por muitos ciclos, podendo causar danos aos equipamentos elétricos. O valor da sobretensão depende de muitos fatores, tais como conexão dos enrolamentos, tipo de núcleo do transformador, nível de carga conectada no secundário do transformador, valor da capacitância do circuito e o tipo de manobra executada no primário do transformador. Esse trabalho analisou, através do software de simulação ATP utilizando os modelos de transformadores Saturable, BCTRAN e Híbrido, a ocorrência do fenômeno da ferrorressonância envolvendo um circuito subterrâneo e transformadores de distribuição. Foi feito um estudo variando-se o comprimento do circuito, o tipo de manobra, além de usar transformadores com potência nominal diferente. Também foi avaliada a influência da carga na resposta do sistema.

Palavras-chave: Ferrorressonância, Sobretensões, Transitórios Eletromagnéticos, Transformadores, Distribuição de Energia Elétrica, ATP.

ABSTRACT

Ferroresonance is an oscillatory and non-linear phenomenon that may occur when a transformer is connected to elements that may provide capacitance to the system, such as overhead transmission lines, underground cables and shunt capacitors under certain conditions in the power system. The non-linearity is introduced due to the magnetic characteristics of the transformer core and several steady-state and transient responses may occur for several system parameter values, differently from resonance which involves linear inductance, where only one possible combination for the circuit element values capable of producing overvoltage exists.

The main characteristic of this phenomenon is that it may produce very high overvoltages that may persist for several cycles, possibly causing damages to electrical equipments. The overvoltage values depend on several factors, such as the winding connections, the type of transformer core, the value of the load connected to the secondary of the transformer, the value of the circuit capacitance and the type of switching performed on the transformer primary. This dissertation analyses the phenomenon of ferroresonance involving underground circuits and distribution transformers using the ATP simulation software and the following transformer models: Saturable, BCTRAN and Hybrid. In the study, the length of the distribution line has been varied as well as the type of switching performed. Also, transformers with different rated powers have been considered. The influence of the load in the system response has also been evaluated.

Keywords: Ferroresonance, Overvoltages, Electromagnetic Transients, Transformers, Electric Power Distribution, ATP.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 3. 1: Esquema de um núcleo de transformador.	14
Fig. 3. 2: Esboço da forma de onda de tensão e fluxo.	15
Fig. 3. 3: Esboço da curva de saturação.	16
Fig. 3. 4: Esboço da corrente de magnetização.	17
Fig. 3. 5: Núcleo do transformador real.	18
Fig. 3. 6: Circuito equivalente monofásico.	19
Fig. 3. 7: Circuito monofásico referido ao lado primário.	20
Fig. 3. 8: Esquema do teste de circuito aberto.	20
Fig. 3. 9: Circuito simplificado do teste a vazio.	21
Fig. 3. 10: Representação do teste de curto-circuito.	22
Fig. 3. 11: Circuito equivalente do teste de curto-circuito.	23
Fig. 3. 12: Núcleo monofásico de três colunas.	25
Fig. 3. 13: Núcleo monofásico de duas colunas.	26
Fig. 3. 14: Núcleo trifásico de três colunas.	26
Fig. 3. 15: Foto de núcleo do tipo três colunas.	27
Fig. 3. 16: Foto de núcleo de três colunas com junção de 45°.	27
Fig. 3. 17: Foto de núcleo com os respectivos enrolamentos montados.	28
Fig. 3. 18: Representação do núcleo de cinco colunas.	29
Fig. 3. 19: Representação de três núcleos monofásicos.	31
Fig. 3. 20: Representação do núcleo trifásico.	32
Fig. 4. 1: Circuito LC simples.	38
Fig. 4. 2: Diagrama fasorial para um circuito LC.	39
Fig. 4. 3: Circuito LC com a resistência inserida.	39
Fig. 4. 4: Solução gráfica do circuito LC.	40
Fig. 4. 5: Gráfico do valor da tensão na indutância em função da corrente.	42
Fig. 4. 6: Solução gráfica com vários valores de capacitâncias.	43
Fig. 4. 7: Caso linear.	44
Fig. 4. 8: Enrolamento em delta com uma fase energizada.	47
Fig. 4. 9: Rede equivalente referente à Fig. 4.8.	48

Fig. 4. 10: Enrolamento em delta com duas fases energizadas.	48
Fig. 4. 11: Circuito equivalente referente à Fig. 4.10.	49
Fig. 4. 12: Enrolamento em estrela isolada com uma fase energizada.	49
Fig. 4. 13: Circuito equivalente referente à Fig. 4.12.	50
Fig. 4. 14: Enrolamento em estrela aterrada com sistema de capacitância isolada e uma fase energizada.	50
Fig. 4. 15: Circuito equivalente da Fig. 4.14.	51
Fig. 4. 16: Enrolamento em estrela aterrada com duas fases energizadas e sistema de capacitância isolada.	51
Fig. 4. 17: Disjuntor com capacitor de equalização alimentando um TP.	52
Fig. 5. 1: Núcleo trifásico de transformador com dois enrolamentos.	61
Fig. 5. 2: Representação do circuito estrela de transformadores de N- enrolamentos.	70
Fig. 5. 3: Caixa de diálogo do BCTRAN.	75
Fig. 5. 4: Tela principal de entrada de dados do XFMR.	77
Fig. 5. 5: Capacitâncias entre núcleo, enrolamentos e tanque.	78
Fig. 5. 6: Tela do híbrido para configuração cilíndrica.	80
Fig. 5. 7: Configuração cilíndrica dos enrolamentos.	80
Fig. 5. 8: Enrolamento do tipo panqueca.	81
Fig. 5. 9: Esquema do núcleo de três colunas.	82
Fig. 5. 10: Esquema do núcleo de cinco colunas.	82
Fig. 6. 1: Curva de saturação do transformador de 75 kVA 13800 – 220/120 V.	90
Fig. 6. 2: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio - (SATURABLE – 75 kVA).	96
Fig. 6. 3: Componentes harmônicos da corrente em vazio (Fase A) (Modelo SATURABLE – 75 kVA).	97
Fig. 6. 4: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de alta tensão) - (SATURABLE – 75 kVA).	97
Fig. 6. 5: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de baixa tensão) - (SATURABLE – 75 kVA).	98
Fig. 6. 6: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio (modelo BCTRAN) – 75 kVA.	98

Fig. 6. 7: Espectro de frequência da forma de onda da corrente da Fase A (BCTRAN – 75 kVA).....	99
Fig. 6. 8: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de alta tensão) - (BCTRAN – 75 kVA).....	99
Fig. 6. 9: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de baixa tensão) - (BCTRAN – 75 kVA)	100
Fig. 6. 10: Formas de onda da corrente do ensaio em vazio (lado de baixa tensão) – (Híbrido – 75 kVA)	100
Fig. 6. 11: Espectro de frequência da forma de onda da corrente da Fase A – lado de baixa tensão (Híbrido – 75 kVA).....	101
Fig. 6. 12: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de alta) - (Híbrido – 75 kVA)	101
Fig. 6. 13: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de baixa) - (Híbrido – 75 kVA)	102
Fig. 6. 14: Curva de saturação do transformador de 500 kVA.....	103
Fig. 6. 15: Comportamento das perdas do transformador – 500 kVA.	103
Fig. 6. 16: Formas de onda da corrente da simulação do ensaio a vazio (Modelo SATURABLE) – 500 kVA.....	107
Fig. 6. 17: Espectro de frequência da corrente da Fase A do ensaio a vazio (Modelo SATURABLE – 500 kVA).....	107
Fig. 6. 18: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de alta tensão (Modelo SATURABLE – 500 kVA).	108
Fig. 6. 19: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de baixa tensão (SATURABLE – 500 kVA).....	108
Fig. 6. 20: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio (BCTRAN – 500 kVA).....	109
Fig. 6. 21: Espectro de frequência da corrente da Fase A (BCTRAN – 500 kVA).....	109
Fig. 6. 22: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de alta tensão (BCTRAN – 500 kVA).	110
Fig. 6. 23: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de baixa tensão (BCTRAN – 500 kVA).	110
Fig. 6. 24: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio lado de baixa tensão (Híbrido – 500 kVA).....	111

Fig. 6. 25: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de alta tensão (Híbrido – 500 kVA).....	111
Fig. 6. 26: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de baixa tensão (Híbrido – 500 kVA).....	111
Fig. 6. 27: Diagrama unifilar do circuito subterrâneo.	112
Fig. 6. 28: Tensões na Fase A no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA)..	113
Fig. 6. 29: Correntes na Fase B no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA).	114
Fig. 6. 30: Tensões na Fase A no primário do transformador - (BCTRAN – 75 kVA).	114
Fig. 6. 31: Correntes da Fase B no primário do transformador - (BCTRAN – 75 kVA).....	115
Fig. 6. 32: Tensões na Fase A no primário do transformador - (Híbrido – 75 kVA).....	115
Fig. 6. 33: Correntes da Fase B no primário do transformador - (Híbrido – 75 kVA).....	116
Fig. 6. 34: Tensões na Fase A no primário do transformador - (SATURABLE – 500 kVA).	118
Fig. 6. 35: Correntes na Fase B no primário do transformador - (SATURABLE – 500 kVA).	118
Fig. 6. 36: Tensões na fase A no primário do transformador - (BCTRAN – 500 kVA).	119
Fig. 6. 37: Correntes na Fase B no primário do transformador - (BCTRAN – 500 kVA).....	119
Fig. 6. 38: Tensões na Fase A no primário do transformador - (Híbrido - 500 kVA).....	120
Fig. 6. 39: Tensões na Fase A no primário do transformador - (Híbrido – 500 kVA).	121
Fig. 6. 40: Correntes na Fase B no primário do transformador - (Híbrido – 500 kVA).....	121
Fig. 6. 41: Tensões na Fase A no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA)..	123
Fig. 6. 42: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA).	124
Fig. 6. 43: Tensões na Fase B (abertura simultânea) no primário do transformador – SATURABLE.	124
Fig. 6. 44: Corrente na Fase C no circuito ferorressonante - (SATURABLE – 75 kVA). ...	125
Fig. 6. 45: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador – BCTRAN.	126
Fig. 6. 46: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador – BCTRAN.	126
Fig. 6. 47: Corrente na Fase C no circuito ferorressonante – BCTRAN.	127

Fig. 6. 48: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador – HÍBRIDO.....	127
Fig. 6. 49: Tensões na Fase B (abertura simultânea) no primário do transformador – HÍBRIDO.....	128
Fig. 6. 50: Tensões na Fase A no primário (abertura simultânea).....	129
Fig. 6. 51: Forma de onda de tensão para 50 m (abertura simultânea) – Fase A – SATURABLE.....	130
Fig. 6. 52: Forma de onda de tensão para 100 m (abertura simultânea) – Fase A – SATURABLE.....	130
Fig. 6. 53: Forma de onda de tensão para 300 m (abertura simultânea) – Fase A – SATURABLE.....	130
Fig. 6. 54: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea) – SATURABLE – 500 kVA.....	131
Fig. 6. 55: Tensões na Fase A no primário (abertura simultânea) – BCTRAN – 500 kVA...	131
Fig. 6. 56: Forma de onda de tensão para 50 m (abertura simultânea) – Fase A – BCTRAN.....	132
Fig. 6. 57: Forma de onda de tensão para 100 m (abertura simultânea) – Fase A – BCTRAN.	132
Fig. 6. 58: Forma de onda de tensão para 300 m (abertura simultânea) – Fase A – BCTRAN.....	133
Fig. 6. 59: Corrente na fase C no primário do transformador (abertura simultânea) – BCTRAN – 500 kVA.....	133
Fig. 6. 60: Tensões na Fase A no primário (abertura simultânea) – Híbrido – 500 kVA.....	134
Fig. 6. 61: Forma de onda de tensão para 50 m (abertura simultânea) – Fase A – Híbrido	134
Fig. 6. 62: Forma de onda de tensão para 100 m (abertura simultânea) – Fase A – Híbrido.....	135
Fig. 6. 63: Forma de onda de tensão para 300 m (abertura simultânea) – Fase A – Híbrido.....	135
Fig. 6. 64: Visualização de onda quadrada da Fig. 6. 63.....	136
Fig. 6. 65: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea – 50 m) Híbrido – 500 kVA.....	136

Fig. 6. 66: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea – 100 m) Híbrido – 500 kVA.....	137
Fig. 6. 67: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea – 300 m) Híbrido – 500 kVA.....	137
Fig. 6. 68: Formas de onda da tensão na Fase A com 1% de carga – 75 kVA – SATURABLE.	139
Fig. 6. 69: Formas de onda de tensão na Fase B – 75 kVA – SATURABLE.	139
Fig. 6. 70: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga – 75 kVA- BCTRAN.	140
Fig. 6. 71: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga – 75 kVA – BCTRAN....	140
Fig. 6. 72: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga – 75 kVA – Híbrido.	141
Fig. 6. 73: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga 75 kVA – Híbrido.....	141
Fig. 6. 74: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga 500 kVA – SATURABLE.....	142
Fig. 6. 75: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga 500 kVA – SATURABLE.....	142
Fig. 6. 76: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga 500 kVA – BCTRAN.	143
Fig. 6. 77: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga 500 kVA – BCTRAN.	143
Fig. 6. 78: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga 500 kVA – Híbrido	144
Fig. 6. 79: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga 500 kVA – Híbrido	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 6. 1: Pontos utilizados na construção da curva de saturação – 75 kVA	91
Tabela 6. 2: Pontos da curva de saturação em pu – 75 kVA	91
Tabela 6. 3: Pontos da curva de saturação referente ao lado de alta tensão – 75 kVA	91
Tabela 6. 4: Pontos do indutor não-linear – 75 kVA.....	93
Tabela 6. 5: Pontos da curva de saturação 500 kVA conforme fabricante.....	104
Tabela 6. 6: Pontos da curva de saturação do transformador de 500 kVA em pu.....	104
Tabela 6. 7: Pontos da curva de saturação em coordenadas de fase.....	104
Tabela 6. 8: Pontos obtidos a partir da rotina saturation – 500 kVA	105
Tabela 6. 9: Valores de picos das sobretensões em pu – 75kVA	116
Tabela 6. 10: Valores de picos das sobretensões em pu – 500kVA	122
Tabela 6. 11: Valores das sobretensões em pu – Abertura Fases A e B – 75 kVA.....	128
Tabela 6. 12: Valores das sobretensões em pu – Abertura Fases A e B – 500 kVA.....	137

LISTA DE ABREVIATURAS

TNA.....	<i>Transient Network Analyzer</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Fluxo concatenado
Φ	Fluxo no núcleo do transformador
$v_p(t)$	Tensão senoidal aplicada no primário
I_m	Corrente de magnetização
I_{PC}	Componente primária da corrente de carga
R_P	Resistência do enrolamento primário
R_S	Resistência do enrolamento secundário
X_{LP}	Reatância de dispersão do enrolamento primário
X_{LS}	Reatância de dispersão do enrolamento secundário
X_M	Reatância de magnetização
R_C	Resistência de perdas no núcleo
I_o	Corrente de excitação
PC	Perdas obtidas no ensaio a vazio
V_{CC}	Tensão de curto-circuito
Z_{eqp}	Impedância equivalente referida ao primário
X_{eqp}	Reatância equivalente referida ao primário
R_{eqp}	Resistência equivalente referida ao primário
ω	Frequência angular
C_{H-C}	Capacitância entre o enrolamento de alta e o núcleo
C_{L-C}	Capacitância entre o enrolamento de baixa e o núcleo
C_{H-T}	Capacitância entre o enrolamento de alta e o tanque
C_{L-T}	Capacitância entre o enrolamento de baixa e o tanque
ϵ_o	Permissividade do espaço livre
ϵ_r	Permissividade relativa do dielétrico
d_{H-i}	Diâmetro interno do enrolamento de alta
d_{L-o}	Diâmetro externo do enrolamento de baixa
d_{f-f}	Distância entre fases

SUMÁRIO

Conteúdo

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Justificativa	3
1.4 Estrutura da dissertação.....	4
Capítulo 2.....	6
Revisão bibliográfica	6
2.1 Estudos sobre ferorrressonância	7
2.1.1 (Auer; Schultz, 1954).....	7
2.1.2 (Hopkinson, 1965).....	7
2.1.3 (Hopkinson, 1968).....	8
2.1.4 (Walling; Barker, 1993)	8
2.1.5 (Dugan et al., 2001).....	9
2.1.6 (Parks et al., 2002)	9
2.1.7 (Dugan, 2003)	9
2.1.8 (Walling, 2003)	10
2.1.9 (Valverde et al., 2007).....	10
2.1.10 (Buigues et al., 2007)	10
2.1.11 (Chaudhary et al., 2009).....	11
2.2 Modelagem de transformadores.....	11
2.2.1 <i>Saturable Transformer Component</i>	11
2.2.2 Modelo BCTRAN	11
2.2.3 Modelo híbrido (XFMR)	12

Capítulo 3	13
Teoria sobre transformador de potência	13
3.1 Introdução	13
3.2 Princípios de funcionamento e circuito equivalente	13
3.2.1 Transformador real	17
3.2.1.1 Testes convencionais	20
3.3 Núcleo magnético e características	24
3.3.1 Tipos de núcleo	24
3.4 Transformadores trifásicos	30
Capítulo 4	35
O Fenômeno da ferorressonância	35
4.1 Introdução	35
4.2 Análise do fenômeno	38
4.2.1 Ressonância	38
4.3 Configurações típicas	44
4.3.1 Ferorressonância em transformadores trifásicos	45
4.3.2 Chaveamento monopolar de transformadores com primário em delta	47
4.3.3 Chaveamento monopolar de transformadores com primário em estrela isolada	49
4.3.4 Chaveamento monopolar de transformadores com primário em estrela aterrada	50
4.3.5 Capacitância de contato de disjuntor alimentando uma barra com transformador de potencial	51
4.4 Classificação dos modos ferorressonantes	52
4.5 Ferorressonância em transformadores de potência	53
4.5.1 Transformadores monofásicos	54
4.5.2 Comportamento magnético de transformadores trifásicos	55

4.6 Sintomas e consequências	56
Capítulo 5	59
Modelagem de transformadores	59
5.1 Aspectos teóricos da representação matricial de transformadores.....	59
5.2 Modelos de transformadores do ATP	69
5.2.1 <i>Saturable Transformer Component</i>	69
5.2.2 Rotina Suporte BCTRAN	73
5.2.3 <i>Hybrid Transformer Model</i>	75
Capítulo 6	88
Análise e simulação.....	88
6.1 Introdução	88
6.2 Cálculo dos parâmetros dos transformadores	88
6.2.1 Transformador de 75 kVA	89
6.2.2 Transformador de 500 kVA	102
6.3 Simulações	112
6.3.1 Abertura monopolar (Fase A) – Transformador de 75 kVA.....	112
6.3.1.1 Caso 1 – Modelo SATURABLE.....	113
6.3.1.2 Caso 2- Modelo BCTRAN.....	114
6.3.1.3 Caso 3- Modelo Híbrido.....	115
6.3.2 Abertura Monopolar (Fase A) – Transformador de 500 kVA	117
6.3.2.1 Caso 1 – Modelo SATURABLE.....	117
6.3.2.2 Caso 2 – Modelo BCTRAN	118
6.3.2.3 Caso 3 – Modelo Híbrido	120
6.3.3 Abertura (Fases A e B) – Transformador de 75 kVA	123
6.3.3.1 Caso 1 - Modelo SATURABLE	123
6.3.3.2 Caso 2 – Modelo BCTRAN	125
6.3.3.3 Caso 3 – Modelo Híbrido	127

6.3.4 Abertura (Fases A e B) – Transformador de 500 kVA	128
6.3.4.1 Caso 1 – Modelo SATURABLE	129
6.3.4.2 Caso 2 – Modelo BCTRAN	131
6.3.4.3 Caso 3 – Modelo Híbrido	134
6.4 Efeitos da carga no secundário do transformador	138
6.4.1 Transformador de 75 kVA	138
6.4.1.1 Modelo SATURABLE	138
6.4.1.2 Modelo BCTRAN	139
6.4.1.3 Modelo Híbrido	140
6.4.2 Transformador de 500 kVA	141
6.4.2.1 Modelo SATURABLE	141
6.4.2.2 Modelo BCTRAN	142
6.4.3.3 Modelo Híbrido	143
Capítulo 7	145
Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	145
7.1 Conclusões	145
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	146
REFERÊNCIAS	147

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

A presença de distúrbios eletromagnéticos nos sistemas elétricos de potência decorrentes de vários fatores não raramente causa problemas graves em várias partes dos sistemas, tais como linhas de transmissão, transformadores e geradores. Esses distúrbios são originados, dentre outros, por operações de chaveamento, curto-circuito e descargas atmosféricas, que por sua vez resultam em sobretensões ou em sobrecorrentes transitórias ou mesmo permanentes.

O estudo do comportamento dos componentes da rede elétrica, quando da ocorrência de um transitório, não é tarefa fácil, pois a modelagem dos diversos componentes deve levar em consideração qual a faixa de frequência do transitório sob estudo e a relação de dependência de alguns parâmetros com a frequência. No caso específico do transformador, equipamento que desempenha um papel de fundamental importância na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, além de fazer parte das instalações industriais e comerciais, existem muitos modelos que são utilizados para estudar os diferentes tipos de transitórios eletromagnéticos. Segundo (MARTINEZ; MORRIS, 2005), a depender do tipo de transitório a ser estudado, certos modelos apresentam melhores desempenhos quando comparados a outros. Por exemplo, a representação do núcleo é importante para simulação de ferorressonância e corrente de inrush, mas pode ser desprezada para simulação de transitórios gerados por descargas atmosféricas. As ferramentas para análise de transitórios eletromagnéticos são normalmente divididas em simuladores analógicos e simuladores digitais. Simuladores analógicos, conhecidos como TNA (“Transient Network Analyzer”) são modelos analógicos nos quais os componentes de um sistema sob estudo tais como, transformadores, linhas de transmissão, pára-raios e disjuntores são representados por modelos em escala reduzida. Os modelos reproduzem a resposta dos protótipos reais, embora

não se assemelhem fisicamente. As linhas de transmissão são geralmente representadas por unidades π de circuitos RLC concentrados que simulam um determinado comprimento de linha. O TNA apresenta como principais vantagens: rapidez na obtenção da resposta, flexibilidade em operações repetitivas e inexistência de soluções computacionalmente instáveis. As desvantagens apresentadas quando se utiliza o TNA são: tamanho limitado pela disponibilidade de modelos físicos, limitação quanto à frequência (somente simula transitórios da ordem de alguns kHz), complexidade nos ajustes pré-estudos, inflexibilidade nas mudanças de configuração e alto custo de instalação.

A partir das décadas de sessenta e setenta é que surgiram alguns programas digitais para simulação e cálculo de transitórios. O programa de transitórios eletromagnéticos ATP (“Alternative Transients Program”), o qual é um dos simuladores da família de programas do tipo EMTP (“Electromagnetic Transients Program”), será utilizado ao longo desse trabalho na análise dos modelos de transformadores para o estudo do fenômeno da ferorrressonância. Esse programa foi desenvolvido por H. W. Dommel, (DOMMEL; 1969, 1986) com a finalidade de simular transitórios eletromagnéticos, em que a representação da rede é feita através da composição de modelos individuais como nos sistemas reais, e por tratar-se de modelos analíticos, pode-se modelar os componentes dos sistemas de potência com maior precisão.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar os modelos de transformadores disponíveis no ATP com ênfase no fenômeno da ferorrressonância. O ATP é uma das versões do EMTP mais utilizadas atualmente. Pretende-se com este trabalho:

1. Apresentar os modelos disponíveis no ATP para simulação de transitórios em transformadores;
2. Apresentar os trabalhos de pesquisa decorrentes dos estudos do fenômeno da ferorrressonância;
3. Avaliar o desempenho dos modelos de transformadores existentes no ATP no estudo da ferorrressonância;

1.3 Justificativa

A simulação de transitórios eletromagnéticos, dentre eles os que são causados pelo fenômeno da ferorrressonância, é fundamental para os estudos da coordenação de isolamento e para a concepção do projeto de equipamentos e de sua proteção. Além disso, quando se trata deste tipo de fenômeno, questões ligadas à operação e a configuração da rede elétrica são importantes, pois podem conduzir o sistema a um estado ferorrressonante em função do tipo de operação de chaveamento ou método para eliminação de faltas na rede. Como operação comum destaca-se, em sistemas de distribuição, a abertura ou fechamento monopolar de um circuito que alimenta um transformador levemente carregado através de um cabo subterrâneo. Esse tipo de operação pode ocasionar o surgimento do fenômeno da ferorrressonância.

Pesquisas sobre o fenômeno de ferorrressonância em transformadores estão sendo conduzidas desde 1920 (CHAUDHARY et al., 2009 apud BOUCHEROT, 1920), embora os primeiros artigos sobre ressonância em transformadores tenham surgido por volta de 1907 (CHAUDHARY et al., 2009 apud BETHENOD, 1907). Contudo, o interesse real sobre esse fenômeno se intensificou quando foi comprovado que o uso de capacitores série para regulação de tensão causava ferorrressonância em sistemas de distribuição, resultando em sobretensões elevadas (CHAUDHARY et al., 2009 apud BUTLER; CONCORDIA, 1937). Essas sobretensões, muitas vezes, são responsáveis pela queima de pára-raios, além de poderem provocar danos a diversos equipamentos e aos consumidores. Para que o surgimento do fenômeno possa ser evitado e, quando da sua ocorrência, seus efeitos minimizados, é importante a análise através da simulação das condições da rede considerando os diversos eventos que podem estar relacionados com sua ocorrência.

Outro aspecto importante que conduziu ao desenvolvimento desse trabalho foi a utilização do modelo híbrido de transformador, o qual foi recentemente incorporado ao ATP (PRIKLER; HOIDALEN, 2009). Esse tipo de modelo possibilita ao usuário informar os dados geométricos do transformador e também os dados convencionais a partir das medições resultantes dos ensaios de curto-circuito e a vazio. Entretanto, essa potencialidade nem sempre é explorada devido à dificuldade em encontrar empresas que possam fornecer medidas das dimensões e tipos de materiais que constituem seus produtos. Trata-se também de um modelo que ainda está em fase de experimentação e que exige por parte do usuário certos cuidados.

1.4 Estrutura da dissertação

Este capítulo introduziu de maneira sucinta o fenômeno da ferorrressonância mostrando a importância da realização das simulações nas etapas de planejamento e operação de uma rede elétrica. As simulações realizadas através de simuladores digitais permitem que sejam identificadas na fase de projeto ou na própria fase de operação, situações que possam conduzir ao aparecimento do fenômeno, bem como é possível se utilizar modelos de componentes elétricos para tentar conhecer a resposta do sistema. Pode-se ainda variar um ou mais parâmetros de um modelo de componente elétrico para saber como a resposta se comporta em virtude de tal variação. Para alcançar a etapa de simulação e interpretação dos resultados, é necessário conhecer os principais componentes envolvidos, o fenômeno e o *software* computacional. Essas etapas foram definidas ao longo dos capítulos desse trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica das publicações mais importantes relacionadas com o fenômeno da ferorrressonância, além de se introduzir os modelos de transformadores presentes no ATP (*Alternative Transients Program*).

No capítulo 3 é apresentada a teoria sobre os transformadores de potência, que pode ser considerado o componente mais importante entre aqueles que fazem parte do estudo realizado nesse trabalho. São apresentados nesse capítulo os aspectos construtivos dos tipos de núcleos utilizados na construção de transformadores, os testes convencionais cujos resultados servem como dados de entrada em alguns modelos de transformadores disponíveis no ATP e as características das ligações dos enrolamentos de transformadores trifásicos, as quais podem influenciar no comportamento da rede em condição de ferorrressonância.

No capítulo 4 é desenvolvida a fundamentação teórica do fenômeno da ferorrressonância, o qual é o tema em estudo. São abordados conceitos relacionados com a ressonância linear e a ferorrressonância, procurando fazer inicialmente uma abordagem gráfica com um circuito LC simples, sem a presença de elementos resistivos. Entretanto, a abordagem gráfica se torna praticamente inviável quando envolve transformadores trifásicos, linhas com acoplamentos e perdas no circuito. Nesse capítulo são apresentadas as principais configurações de circuitos que são propícias à ocorrência do fenômeno, detalhando algumas interações possíveis entre as capacitâncias do circuito e as indutâncias não-lineares do núcleo do transformador.

No capítulo 5 são apresentados os principais modelos de transformadores disponíveis no ATP, tais como STC (*Saturable Transformer Component*), o BCTRAN e o modelo híbrido. Procura-se mostrar nesse capítulo como são as formas de entrada de dados de cada modelo e a metodologia utilizada para o cálculo dos parâmetros.

No capítulo 6 são realizadas diversas simulações procurando mostrar as respostas da rede elétrica em função do tipo de manobra realizada (abertura monopolar ou simultânea de chaves), da potência nominal do transformador e do modelo de transformador empregado. Procurou-se também validar os modelos de transformadores estudados através de testes de circuito aberto e de curto-circuito e mostrou-se de forma detalhada a rotina de cálculo necessária à implementação dos modelos de transformadores no ATP.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e propostas que podem ser feitas no sentido de comparar o desempenho de cada modelo de transformador para um determinado conjunto de parâmetros da rede.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Os sistemas elétricos de potência, em virtude da presença de capacitâncias e indutâncias, podem constituir circuitos ressonantes em função de condições particulares de sua operação ou de sua configuração. Com o objetivo de evitar essas situações, os sistemas elétricos devem ser projetados de maneira que a forma de operação ou a interação entre os diversos componentes não conduzam ao aparecimento do fenômeno. Entretanto, algumas vezes devido a falhas na concepção do projeto ou situações que não foram previamente estudadas, podem ocorrer problemas quando o sistema entra em operação. Nessa situação, é necessária a adoção de alguma medida corretiva para que o problema não se manifeste. Destacam-se como medidas preventivas para evitar ou atenuar os efeitos do fenômeno, a adoção de manobra tripolar ou manobra monopolar com o transformador parcialmente carregado. As ressonâncias podem envolver a conexão de componentes indutivos e capacitivos em série ou em paralelo, sendo os valores máximos das sobretensões e sobrecorrentes limitados somente pelas resistências dos componentes. Uma particularidade desse fenômeno é que sua ocorrência pode se dar para diferentes valores de capacitâncias devido à presença de elementos não-lineares, como transformadores e reatores. Essa não linearidade é consequência do núcleo de material ferromagnético presente em tais equipamentos.

Muitos estudos foram realizados com o objetivo de avaliar os impactos causados pelo fenômeno da ferrorressonância e os motivos que levam ao aparecimento desse fenômeno. Dentre eles, destacam-se aqueles destinados a avaliar a influência do instante de chaveamento, a presença do fluxo residual, valores de capacitâncias e valor da fonte de tensão no comportamento temporal de possíveis sobretensões. Não raro, as sobretensões de natureza temporária persistem por vários ciclos podendo danificar o pára-raios, equipamento responsável pela proteção dos outros componentes do sistema elétrico.

Para o estudo desse fenômeno, devem-se utilizar ferramentas computacionais para simulação de transitórios, tais como o ATP ou outros programas similares. Essas ferramentas são capazes de reproduzir e, em muitas situações, prevê através da modelagem dos componentes reais, as circunstâncias em o que fenômeno pode aparecer. Dentre os diversos componentes, o transformador pode ser considerado como um dos mais difíceis de ter seu comportamento reproduzido em simuladores digitais. Isto ocorre dentre outros fatores, devido à presença da não linearidade do núcleo magnético, acoplamento entre fases, os diversos tipos de núcleos e enrolamentos, além da dificuldade de obtenção de alguns parâmetros que servem de entrada para alguns modelos de transformadores.

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os modelos de transformadores presentes no ATP, além dos principais estudos realizados na área da ferorrressonância. Também se destacam as principais contribuições e limitações dos trabalhos encontrados na literatura.

2.1 Estudos sobre ferorrressonância

2.1.1 (Auer; Schultz, 1954)

Nesse trabalho, os autores reproduziram, a partir de um TNA, as condições em que um circuito de distribuição rural 14,4/24,9 kV apresentava sobretensões. O sistema consistia de um longo cabo alimentado por uma fonte com neutro solidamente aterrado. Os bancos de transformadores monofásicos eram conectados em estrela isolada no lado primário. O resultado obtido relacionou os valores de sobretensões sustentadas com o comprimento da linha para os transformadores com diferentes potências nominais, em função de chaveamento monopolar e de duas fases simultâneas. Nessa época, ainda não existiam os *softwares* para cálculo de transitórios eletromagnéticos.

2.1.2 (Hopkinson, 1965)

Nesse trabalho, o autor analisou a possibilidade de se obter possíveis sobretensões ferorrressonantes durante chaveamentos monofásicos em bancos de transformadores de distribuição. Quando ocorre a energização do banco por meio de dispositivos unipolares em

tensões de distribuição mais elevada, as capacitâncias internas de banco estrela isolada – delta podem produzir um circuito ressonante com as características de saturação do banco produzindo elevadas sobretensões sustentadas. Foi utilizado o TNA para estudar as condições necessárias para ocorrência do fenômeno e as medidas de prevenção. Esse estudo determinou que o uso do resistor de neutro pode contribuir para limitar as sobretensões.

2.1.3 (Hopkinson, 1968)

O autor estudou o aparecimento de possíveis sobretensões em banco de transformadores monofásicos delta-estrela durante chaveamento monofásico como função da potência do transformador e comprimento do circuito. Segundo o autor, o método utilizado para limitar as sobretensões ferromagnéticas é reduzir o comprimento do circuito. O comprimento permitido é influenciado pelo tamanho do transformador, tensão nominal, conexão do enrolamento como também o tipo de linha, se aérea ou subterrânea. O autor concluiu que para bancos de menor porte em tensões mais elevadas, o comprimento permitido torna-se menor até mesmo para linha aérea. Entretanto, esse estudo considerou que a linha apresentava apenas capacitância *shunt*.

2.1.4 (Walling; Barker, 1993)

Esse trabalho teve como principal objetivo mostrar a relação entre a possibilidade de ocorrência do fenômeno da ferromagnética e as perdas no núcleo do transformador. Segundo os autores, perdas a vazio reduzidas têm resultado no aumento da probabilidade de ferromagnética em transformadores de distribuição trifásicos que usam núcleos de aço silício do tipo enrolado. Inúmeros testes foram realizados e com base nestes concluiu-se que as sobretensões eram diretamente relacionadas à razão entre a susceptância capacitiva e as perdas no núcleo. Os testes foram realizados em transformadores na faixa de potência de 150 a 500 kVA. O comprimento do cabo foi incrementado de 6 m para os testes em 24,94 kV e 35 kV e 21 m para testes em 12,47 kV. Posteriormente foi disponibilizada a relação entre a sobretensão e o comprimento do cabo.

2.1.5 (Dugan et al., 2001)

Nesse trabalho, os autores estudaram um caso real de ferrorressonância em sistema de distribuição subterrâneo. Eles analisaram a resposta da rede para várias condições de carregamento do transformador. Concluíram que a carga mínima de 20% era necessária para evitar o surgimento do fenômeno, a qual é bem superior à regra típica de 5% utilizada em muitas situações. O modelo de transformador utilizado foi o modelo convencional através do circuito T. A indutância de saturação é obtida através dos pontos $V(\text{rms}) \times I(\text{rms})$ fornecidos pelo fabricante e posteriormente transformada em fluxo de pico x corrente de pico através de rotina apropriada.

2.1.6 (Parks et al., 2002)

Nesse trabalho o autor simulou um sistema de distribuição com compensador série que, após a ocorrência de uma falta, resultou em sobretensões que poderiam ser oriundas do fenômeno da ferrorressonância, provocando danos aos pára-raios e resultando em perigo para os equipamentos dos consumidores. O *software* utilizado para reprodução das formas de onda gravadas foi o PSCAD/EMTDC.

2.1.7 (Dugan, 2003)

Uma importante contribuição desse trabalho é sobre o relato de que muitas empresas vieram a ter problemas decorrentes do fenômeno da ferrorressonância quando começaram a construir sistemas de distribuição subterrâneos em 34,5 kV. Segundo o mesmo autor, nos sistemas de distribuição de classe de tensão 15 kV esse problema ainda não tinha acontecido.

Outro elemento importante é que muitas empresas nos Estados Unidos utilizam transformadores estrela aterrada – estrela isolada nas classes de tensão de 25 e 35 kV. Caracteriza-se então, uma situação que pode conduzir à ferrorressonância. O autor, entretanto, informa que a ferrorressonância não é característica do sistema de 25 kV ou de 35 kV, mas pode ocorrer em qualquer tensão com uma combinação apropriada de capacitância do cabo, tipo de conexão do transformador e perdas. Algumas medidas preventivas podem ser utilizadas, tais como: utilizar disjuntores ao invés de fusíveis, abrir ou fechar as fases

simultaneamente sempre que possível e assegurar que o transformador está carregado enquanto é chaveado.

2.1.8 (Walling, 2003)

Nesse trabalho, o autor mostrou que experiências de campo indicam que os eventos envolvendo ferrorressonância ocorrem mais facilmente com transformadores de distribuição de baixas perdas, quando comparados com transformadores de níveis de perdas convencionais. Vários testes foram realizados com um grande número de transformadores e mostraram uma relação direta entre as perdas no núcleo do transformador e capacitância necessária para manter as condições ferrorressonantes. Uma importante contribuição desse trabalho é que para vários transformadores testados foi feito um gráfico da capacitância crítica do cabo versus a reatância de magnetização do transformador e a correlação foi incerta, ou seja, a relação sugerida por (HOPKINSON, 1967) não foi bem aceita para os novos transformadores.

2.1.9 (Valverde et al., 2007)

Nesse trabalho foi proposto um modelo de *software* para simular o fenômeno da ferrorressonância em transformadores de potencial. Os autores realizaram uma análise gráfica do fenômeno praticando diversas alterações nos valores da fonte de tensão e da capacitância e verificando o comportamento das sobretensões decorrente de cada caso. Além disso, mostrou-se a influência do instante de chaveamento nas possíveis sobretensões existentes. Diversos métodos de identificação do fenômeno, tais como espectro de frequência, plano de fase e diagrama de Poincaré foram utilizados na análise do fenômeno.

2.1.10 (Buigues et al., 2007)

Nesse trabalho foi apresentada a teoria que envolve o fenômeno da ferrorressonância estabelecendo as condições pelas quais o fenômeno é desencadeado. Além disso, apresenta

também os principais sintomas e consequências, bem como as medidas de prevenção adequadas para atenuar ou eliminar os efeitos causados pelo fenômeno.

2.1.11 (Chaudhary et al., 2009)

Nesse trabalho, os autores abordaram os principais aspectos relacionados com o fenômeno da ferorrressonância, bem como a necessidade de se elaborar um modelo correto de transformador para estudar tal fenômeno. Nesse estudo também se destacou que o tipo de núcleo e o tipo de ligação dos enrolamentos resultam em respostas diferentes da rede, além de terem sido discutidas as diferentes técnicas de modelagem e sugestões de implementação. Em síntese, trata-se de um trabalho que aborda de forma geral o fenômeno, explicando os principais pontos críticos que devem ser levados em consideração no momento da simulação.

2.2 Modelagem de transformadores

2.2.1 *Saturable Transformer Component*

Modelo utilizado para representar transformadores monofásicos e trifásicos (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). É baseado na representação do circuito em estrela com o ramo primário sendo tratado como um ramo R-L desacoplado. Os efeitos da saturação e histerese são modelados pela adição de um indutor não linear extra no ponto estrela. Possui algumas limitações, pois não pode ser usado para mais do que três enrolamentos, embora sejam raros transformadores com mais de três enrolamentos e a indutância magnetizante, com a resistência em paralelo, é conectada ao ponto estrela, o qual nem sempre é o ponto topologicamente correto.

2.2.2 Modelo BCTRAN

O BCTRAN é uma rotina suporte desenvolvida por (BRANDWAJN; DOMMEL, 1982; DOMMEL, 1986) para produzir a representação linear através das matrizes $[A]$ - $[R]$ ou $[R]$ - $[\omega L]$ de transformadores trifásicos e monofásicos de múltiplos enrolamentos, para os

tipos de núcleo do tipo envolvido e envolvente a partir dos dados dos testes de curto circuito e a vazio. As perdas por excitação podem ser levadas em conta neste modelo, embora estas possam ser desprezadas para transformadores monofásicos e trifásicos de baixa relutância.

2.2.3 Modelo híbrido (XFMR)

Modelo de transformador considerado topologicamente correto desenvolvido para simulação de transitórios de baixa e média frequências. A diferença principal entre esse modelo e os citados anteriormente é que ele leva em consideração a topologia do núcleo e os efeitos de saturação são colocados internamente ao modelo, pois eles são baseados no princípio da dualidade. Neste caso, são incluídos os efeitos da saturação para cada coluna individual do núcleo, efeitos de dispersão e acoplamento magnético. Estes modelos são baseados no desenvolvimento de um circuito magnético a parâmetros concentrados, o qual representa o caminho do fluxo no núcleo e nos enrolamentos sendo posteriormente convertido em um circuito elétrico equivalente usando o princípio da dualidade (MORK, 2007).

Capítulo 3

Teoria sobre transformador de potência

3.1 Introdução

O transformador é um equipamento estático que transfere energia de um circuito para outro através da indução eletromagnética sem variação da frequência. Esse equipamento que pode ligar dois circuitos com níveis de tensão diferentes tem sido um instrumento de uso universal no sistema de corrente alternada, para transmissão e distribuição de energia elétrica. Vários componentes do sistema de potência tais como, geradores, linhas de transmissão, redes de distribuição e principalmente as cargas operam com seus próprios níveis de tensão apropriados. O transformador, então, ocupa posições estratégicas ao longo do sistema de potência, sendo responsável pela interconexão dos circuitos em vários níveis de tensão.

O transformador recebe a energia elétrica através de um enrolamento chamado de primário, converte em energia magnética a qual é re-convertida em energia elétrica útil para outros circuitos (enrolamento secundário, enrolamento terciário). Dessa forma, o enrolamento primário e o secundário não são conectados eletricamente, e sim acoplados magneticamente. O transformador é designado como elevador ou abaixador, o que depende se a tensão do enrolamento secundário é maior ou menor do que a tensão do enrolamento primário, respectivamente. Ele pode ser usado como abaixador ou elevador a depender da necessidade e aplicação. Consequentemente, seus enrolamentos são denominados de enrolamento de alta tensão / baixa tensão em detrimento de enrolamento primário e secundário.

3.2 Princípios de funcionamento e circuito equivalente

O princípio de funcionamento do transformador é baseado na indução eletromagnética, no qual uma tensão é induzida numa bobina se existe nela um fluxo concatenado variante no

tempo. A teoria básica sobre o funcionamento do transformador pode ser encontrada em (CHAPMAN, 1991; SEN, 1996). O valor da tensão induzida é dada pela seguinte equação:

$$e_{\text{ind}} = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Em que λ é o fluxo concatenado no enrolamento no qual a tensão é induzida e é igual à soma do fluxo Φ que passa através de cada espira do respectivo enrolamento, com um total de N espiras. O valor do fluxo concatenado é encontrado a partir da seguinte equação:

$$\lambda = N\Phi \quad (3.2)$$

A Fig. 3.1 mostra um transformador monofásico consistindo de dois enrolamentos, enrolados sobre um núcleo magnético e concatenado por um fluxo mútuo Φ .

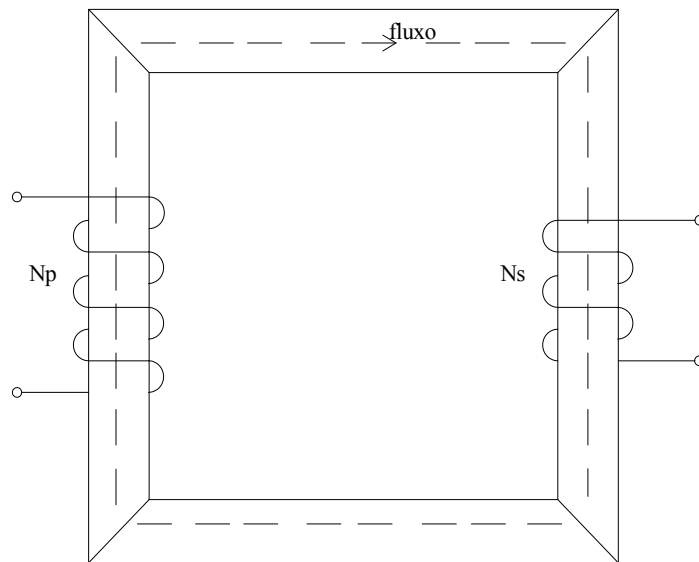


Fig. 3. 1: Esquema de um núcleo de transformador.

Supondo que o transformador esteja operando em vazio com o primário conectado a uma fonte de tensão senoidal $v_p(t)$ de frequência f Hz, uma pequena corrente denominada de corrente de excitação flui pelo enrolamento primário com a finalidade de estabelecer o fluxo mútuo no núcleo. Nesse caso, para fins de simplificação considera-se o núcleo sem perdas e

que todo fluxo está confinado no núcleo, ou seja, não há dispersão. Se o núcleo for considerado de permeabilidade infinita, então a corrente necessária para estabelecer o fluxo no núcleo é desprezível, ou seja, a força magnetomotriz líquida necessária para estabelecer o fluxo no núcleo é zero.

Se a tensão no enrolamento primário é dada por:

$$v_p(t) = V_m \cos \omega t \quad (3.3)$$

e desprezando os efeitos do fluxo de dispersão, o valor do fluxo mútuo no núcleo é dado pela integral da tensão aplicada ao enrolamento correspondente:

$$\Phi(t) = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (3.4)$$

$$\Phi(t) = \frac{V_m}{\omega N_p} \sin \omega t \quad (3.5)$$

O esboço das formas de onda da tensão e fluxo magnético é mostrada na Fig. 3.2. Ambas são senoidais com a mesma frequência da fonte de potência.

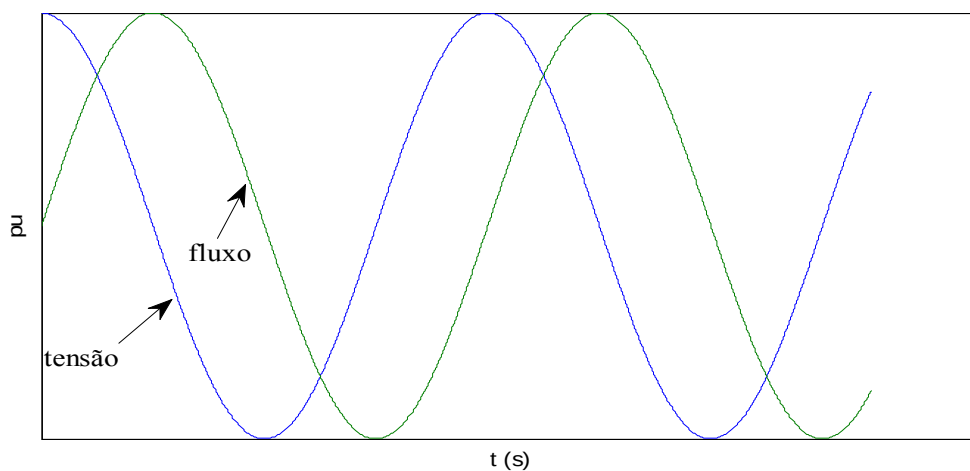


Fig. 3. 2: Esboço da forma de onda de tensão e fluxo.

Verifica-se, de acordo com a eq. (3.5), que o valor da tensão de pico é responsável por estabelecer o valor de pico correspondente do fluxo magnético. A partir da curva de saturação do núcleo, fluirá um valor de corrente correspondente capaz de produzir o valor do fluxo de pico especificado. Se o valor de corrente necessário para produzir um dado fluxo magnético são comparados ao valor do fluxo no núcleo, então o resultado pode ser mostrado em um gráfico que relaciona essas duas grandezas. O gráfico mostrado na Fig. 3.3 apresenta um esboço da curva de saturação simplificada com duas regiões: uma região não saturada e outra saturada, que corresponde à reta com menor inclinação.

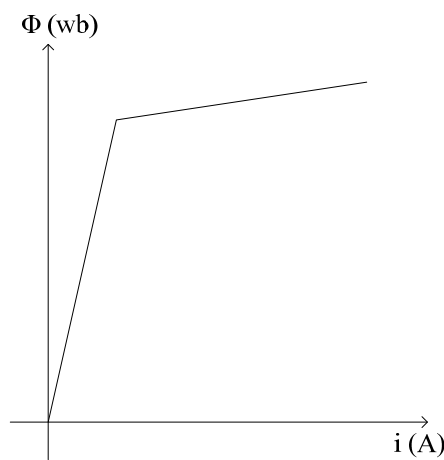


Fig. 3. 3: Esboço da curva de saturação.

A curva de saturação desempenha um papel importante no comportamento do transformador, sobretudo em condições transitórias. Verifica-se que, devido à não linearidade introduzida pelo núcleo ferromagnético a corrente de magnetização no transformador é não-senoidal com forte presença de componentes de elevadas frequências. Um esboço da corrente de magnetização é mostrado na Fig. 3.4.

Um tipo de característica importante que a não-linearidade impõe no comportamento do transformador é que quando o fluxo de pico alcança o ponto de saturação no núcleo, o que acontece em muitos projetos de transformadores com tensão nominal aplicada, um pequeno aumento no fluxo de pico requer um grande aumento na corrente de magnetização de pico (CHAPMAN, 1991; HEATHCOTE, 2007). Isto pode ser verificado em fenômenos que geram desequilíbrios no sistema elétrico e que, portanto, causam um aumento da tensão aplicada ao transformador e consequentemente aumento da corrente circulante em seu enrolamento. Tem-se também que a componente fundamental da corrente de magnetização se atrasa em relação à

tensão aplicada por 90° e componentes de frequências superiores podem ter valores maiores que o da componente fundamental.

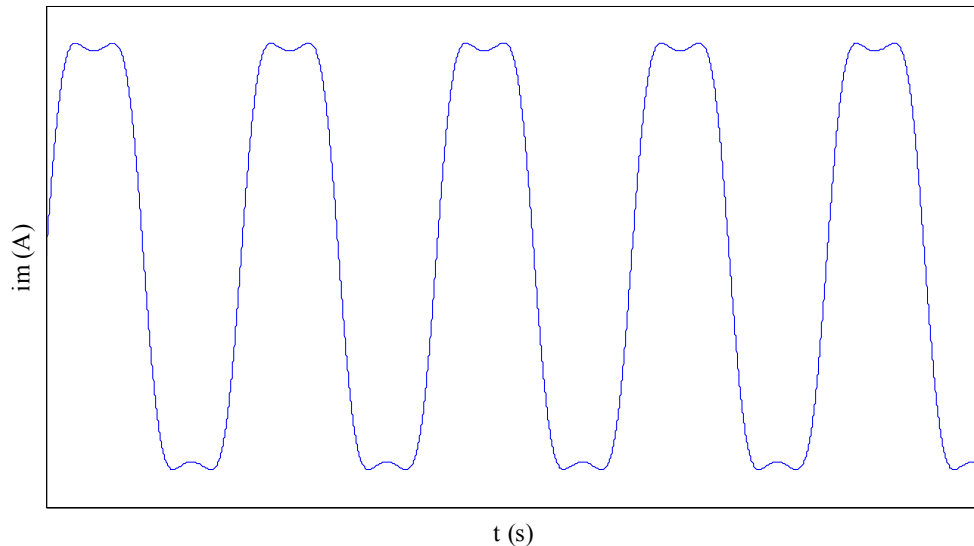


Fig. 3. 4: Esboço da corrente de magnetização.

Supondo que o enrolamento secundário seja conectado a uma carga, a corrente que flui produzirá uma força magnetomotriz que irá se opor ao fluxo mútuo tendendo a reduzi-lo. Em virtude da tensão aplicada ser mantida constante, a tensão induzida e consequentemente o fluxo mútuo permanecem constantes. Contudo, isto é somente possível se pelo enrolamento primário circular uma corrente para neutralizar o efeito desmagnetizante que a corrente secundária produz.

Dessa maneira, a corrente primária total é a soma vetorial da corrente sem carga, isto é, a componente de magnetização I_m , desde que as perdas do núcleo são desprezadas e a corrente de carga I_{PC} , a qual é a corrente secundária referida ao primário.

3.2.1 Transformador real

Os princípios discutidos acima levaram em consideração que o transformador possuía permeabilidade infinita e resistência dos enrolamentos desprezíveis. Entretanto, para um transformador real esses dois parâmetros assumem outros valores. A partir disso, é necessário um complemento acerca das afirmações feitas anteriormente.

A Fig. 3.5 ilustra um tipo de núcleo de um transformador real mostrando o fluxo de dispersão de cada enrolamento.

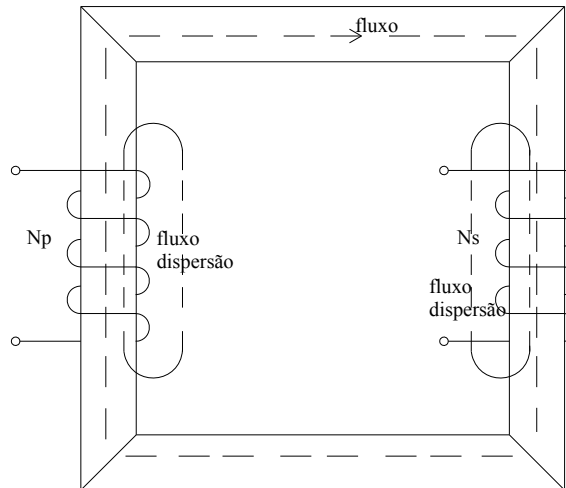


Fig. 3. 5: Núcleo do transformador real.

Quando um material magnético é submetido a um ciclo de magnetização em função da tensão aplicada ocorrem dois tipos de perdas, denominadas de perdas por histerese e perdas por correntes parasitas. Essas perdas estão sempre presentes no transformador, uma vez que o fluxo magnético no núcleo é de natureza alternada.

As perdas por histerese podem ser minimizadas pelo emprego de bons materiais para o núcleo e as perdas por correntes parasitas pelo uso de lâminas finas isoladas. A corrente total que circula pelo enrolamento primário com o transformador a vazio consiste de duas componentes: a primeira é a corrente de magnetização I_m , responsável pela produção do fluxo magnético mútuo e a segunda é a corrente de perdas no núcleo, que leva em consideração a potência ativa fornecida pela fonte para suprir as perdas por correntes parasitas e por histerese. A componente de perdas no núcleo está em fase com a tensão induzida e adiantada da componente de magnetização por 90° .

O transformador operando em vazio, ou seja, com enrolamento secundário em aberto, comporta-se como um circuito altamente indutivo devido ao núcleo magnético, e dessa maneira a corrente a vazio se atrasa em relação à tensão aplicada com um ângulo levemente menor que 90° .

A Fig. 3.6 apresenta o circuito equivalente do transformador de potência real o qual serve para muitos estudos na área de sistemas de potência, acompanhada das explicações dos parâmetros presentes nesse circuito.

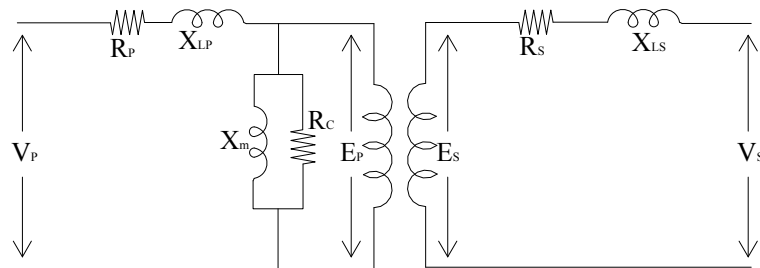


Fig. 3. 6: Circuito equivalente monofásico.

R_p e R_s são as resistências dos enrolamentos primário e do secundário, respectivamente. O ramo de magnetização é composto por uma reatância de magnetização X_m em paralelo com uma resistência R_c que representa as perdas no núcleo do transformador. As forças eletromotrizes induzidas no primário e no secundário são representadas por E_p e E_s respectivamente. Para o caso do transformador real, uma porção do fluxo que concatena o enrolamento primário não concatena o enrolamento secundário. Essa componente do fluxo é proporcional a corrente do enrolamento primário e é responsável por uma queda de tensão, a qual é levada em consideração por uma reatância indutiva X_{LP} (reatância de dispersão) e é colocada em série com a resistência R_p do enrolamento primário do transformador real.

De maneira similar, a reatância de dispersão X_{LS} é acrescida ao enrolamento secundário com o objetivo de considerar a queda de tensão devido ao fluxo de dispersão que concatena apenas o enrolamento secundário. O transformador ideal pode ser retirado deste tipo de representação, se todas as quantidades forem referidas ao lado primário ou ao lado secundário. Uma vez que as quantidades estão referidas ao lado primário, o valor de reatância e resistência podem ser escritos da seguinte forma:

$$X'_{LS} = X_{LS}(N_p/N_s)^2 \quad (3.6)$$

$$R'_s = R_s(N_p/N_s)^2 \quad (3.7)$$

O circuito equivalente é o equivalente em T mostrado na Fig. 3.7, válido geralmente para análise em regime permanente na frequência do sistema de potência. Para elevadas frequências, os efeitos capacitivos devem ser levados em consideração.

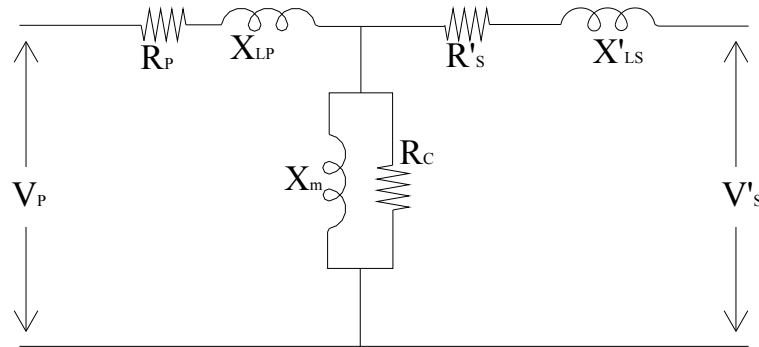


Fig. 3. 7: Circuito monofásico referido ao lado primário.

3.2.1.1 Testes convencionais

Os parâmetros do circuito equivalente podem ser determinados pelo teste sem carga ou a vazio e pelo teste de curto-circuito (IEEE STANDARD TEST CODE FOR LIQUID-IMMERSED DISTRIBUTION, POWER, AND REGULATING TRANSFORMERS, 1999; IEEE STANDARD TEST CODE FOR DRY-TYPE DISTRIBUTION AND POWER TRANSFORMERS, 2001). O teste de circuito aberto determina os parâmetros do ramo paralelo (shunt). O diagrama esquemático do teste de circuito aberto é mostrado na Fig. 3.8:

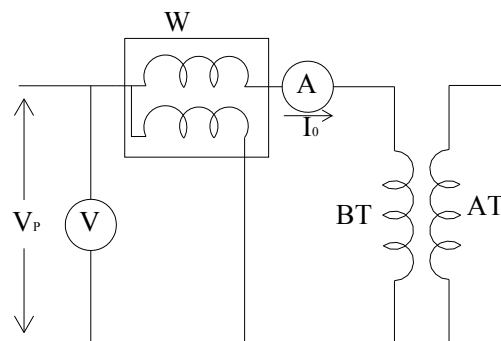


Fig. 3. 8: Esquema do teste de circuito aberto.

A tensão nominal V_P é aplicada ao enrolamento de baixa tensão enquanto o enrolamento de alta tensão é mantido aberto. O amperímetro A registra o valor da corrente de

excitação I_0 e o voltímetro registra o valor da tensão de operação. O wattímetro registra as perdas no núcleo e a perda na resistência do enrolamento primário. Desde que essa perda é muito pequena, ela se torna desprezível quando comparada com as perdas no núcleo. Dessa forma, as perdas que o wattímetro registra podem ser consideradas como as perdas no núcleo (IEEE GUIDE FOR TRANSFORMER LOSS MEASUREMENT, 2002).

A corrente a vazio assume um pequeno valor quando comparada com a corrente nominal, na faixa de 0,2 a 2%. Para transformadores com potência elevada (por exemplo, acima de 300 MVA) esse valor pode ser de aproximadamente 0,2% (KULKARNI; KHAPERDE; 2004).

O circuito equivalente simplificado do teste a vazio é mostrado na Fig. 3.9.

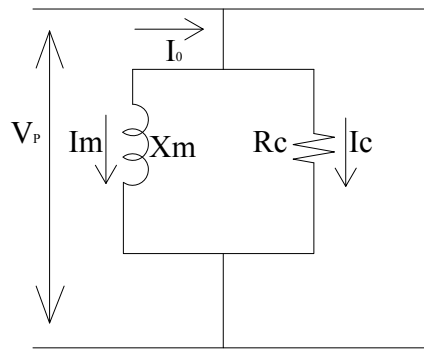


Fig. 3. 9: Circuito simplificado do teste a vazio.

A potência medida pelo wattímetro é expressa como:

$$P_C = V_p I_0 \cos \theta_0 \quad (3.8)$$

Dos valores medidos de tensão, corrente e potência, o valor do fator de potência sem carga pode ser calculado a partir da equação abaixo:

$$\cos \theta_0 = \frac{P_C}{V_p I_0} \quad (3.9)$$

A componente de magnetização I_m e a componente de perdas no núcleo I_c são dadas respectivamente por:

$$I_m = I_o \sin \theta_o \quad (3.10)$$

$$I_c = I_o \cos \theta_o \quad (3.11)$$

A resistência de perdas R_C e a reatância de magnetização X_m que constituem os parâmetros do ramo em derivação podem ser encontradas, respectivamente, por:

$$R_C = \frac{V_p^2}{P_C} \quad (3.12)$$

$$X_m = \frac{V_p}{I_m} \quad (3.13)$$

Os valores encontrados em (3.12) e (3.13) são referenciados ao lado de baixa, desde que os equipamentos de medição foram colocados nesse lado. Esses valores podem ser referenciados ao lado de alta tensão AT usando a relação de transformação α^2 em que α é a relação de espiras.

O teste de curto-circuito é realizado para medir as perdas nominais e a impedância de dispersão do transformador. Nesse teste, geralmente o enrolamento de baixa tensão BT é curto circuitado e a tensão é aplicada ao enrolamento de alta tensão até circular a corrente nominal em ambos os enrolamentos. A Fig. 3.10 mostra o diagrama esquemático desse teste associado ao circuito equivalente:

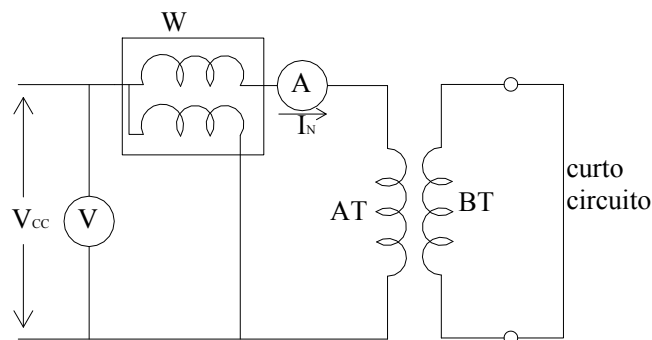


Fig. 3. 10: Representação do teste de curto-circuito.

A Fig. 3.11 mostra o circuito equivalente simplificado do teste de curto-circuito.

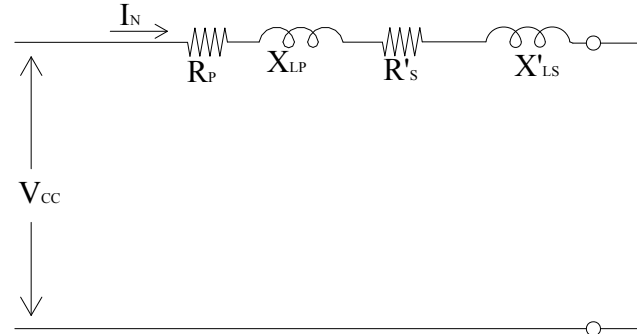


Fig. 3. 11: Circuito equivalente do teste de curto-circuito.

A tensão V_{CC} é chamada de tensão de curto-circuito e exprime o quanto da tensão nominal deve ser aplicada no transformador para que ele conduza corrente nominal. Uma vez que o valor da tensão aplicada é pequeno quando comparado com o valor da tensão do enrolamento sob teste, as perdas no núcleo podem ser desprezadas. Assim, as perdas que são medidas pelo wattímetro são as perdas decorrentes das resistências dos enrolamentos.

Os parâmetros do circuito equivalente podem ser determinados a partir dos valores medidos de potência, tensão e corrente.

$$Z_{eqp} = \frac{V_{CC}}{I_N} \quad (3.14)$$

$$Z_{eqp} = R_{eqp} + jX_{eqp} \quad (3.15)$$

$$R_{eqp} = R_P + R'_S \quad (3.16)$$

$$X_{eqp} = X_{LP} + X'_{LS} \quad (3.17)$$

Em que Z_{eqp} é a impedância, R_{eqp} é a resistência equivalente e X_{eqp} é a reatância de dispersão equivalente referente ao enrolamento primário, ou seja, o enrolamento no qual estão conectados os equipamentos necessários à realização desse ensaio. R'_S é a resistência do enrolamento secundário referida ao primário.

3.3 Núcleo magnético e características

Constituído de ferro laminado, pode ser considerado como uma das principais partes do transformador, responsável pela condução do fluxo magnético que liga ambos os enrolamentos. A energia é transferida de um circuito elétrico para outro através do campo magnético conduzido pelo fluxo. Ele também fornece um caminho de baixa relutância e essa característica determina a magnitude da corrente de magnetização. Avanços em pesquisas e desenvolvimento na confecção de núcleo de transformadores têm possibilitado reduzir cada vez mais as perdas. Por exemplo, o acréscimo de silício é responsável pela redução das correntes parasitas devido ao aumento da resistividade e ao mesmo tempo aumenta a permeabilidade (KULKARNI; KHAPERDE, 2004). As perdas por histerese diminuem devido à redução do ciclo de histerese.

3.3.1 Tipos de núcleo

Existe uma grande variedade de projetos de núcleo de transformador. Nesta seção será fornecida uma explicação sobre os principais elementos que o constitui e os principais tipos. A parte do núcleo que é envolvida pelos enrolamentos é chamada de coluna, enquanto a parte restante a qual não é envolvida é chamada de jugo ou culatra, fundamental para complementar o caminho do fluxo. A esse tipo de núcleo chama-se de envolvido. Na construção do tipo envolvente os enrolamentos estão cercados por colunas e jugos.

A construção do núcleo depende principalmente das especificações técnicas, limitações de fabricação e considerações de transporte. É econômico ter todos os enrolamentos das três fases em uma mesma estrutura. O transformador trifásico é então mais barato (20 a 25%) do que três unidades monofásicas conectadas em um banco.

O núcleo do tipo envolvido é de construção simples, apresenta melhor dissipação de calor e sua manutenção é mais fácil. O núcleo do tipo envolvente possui como vantagem a baixa impedância devido à possibilidade de construção dos enrolamentos do tipo sanduiche, o qual na construção do tipo envolvido não é facilmente obtido.

A seguir, os tipos de núcleo mais utilizados em transformadores de potência serão apresentados (HARLOW, 2000; SHORT, 2004). No núcleo do transformador monofásico de três colunas, os enrolamentos são colocados ao redor da coluna central, chamada de coluna

principal. O fluxo na coluna principal é igualmente dividido entre as duas junções e retorna via colunas terminais. A Fig 3.12 apresenta o núcleo monofásico de três colunas.

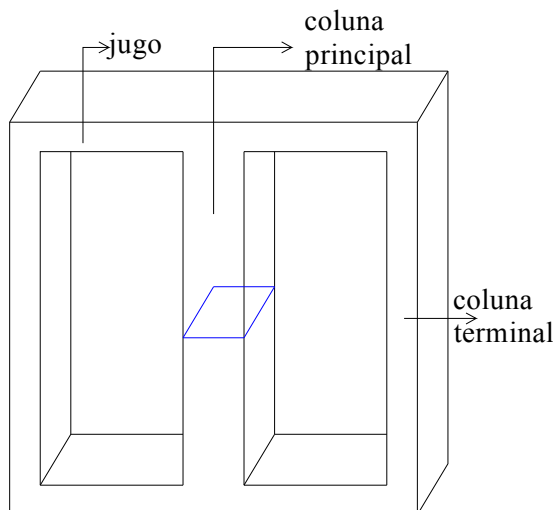


Fig. 3. 12: Núcleo monofásico de três colunas.

A área dos “jugos” e das colunas das extremidades deve ser a metade da área da coluna principal (KULKARNI; KHAPERDE; 2004). A impedância de sequência zero é igual a impedância de sequência positiva para essa construção (para um banco de transformadores monofásicos). Tanto o enrolamento de baixa quanto o enrolamento de alta são colocados na coluna central.

Algumas vezes os enrolamentos do transformador monofásico são divididos em duas partes e colocados em torno das duas colunas. A área das colunas e dos jugos é a mesma. Esta construção é adotada para transformadores com elevadas grandezas nominais, potência e tensão nominais conforme Fig. 3.13.

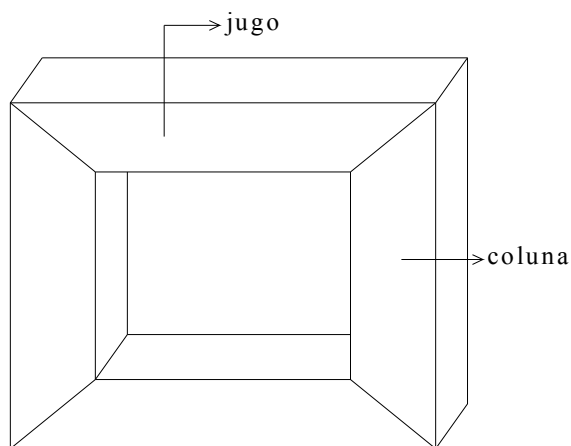


Fig. 3. 13: Núcleo monofásico de duas colunas.

De maneira similar ao transformador monofásico de três colunas, o de quatro colunas é obtido pela adição de duas colunas terminais e dois jugs (culatras) com o objetivo de reduzir a altura e facilitar o transporte.

Dentre os tipos de núcleos utilizados em transformadores trifásicos de pequena e média potência, o tipo mais comum é o núcleo de três colunas, conforme Fig. 3.14.

Neste, para cada fase o fluxo de uma determinada coluna retorna através dos jugs e das outras duas colunas. Geralmente, a área das pernas e juntas (jugs) é igual. Podem-se encontrar também jugs com área 5% maior que a área das colunas com o objetivo de reduzir as perdas a vazio.

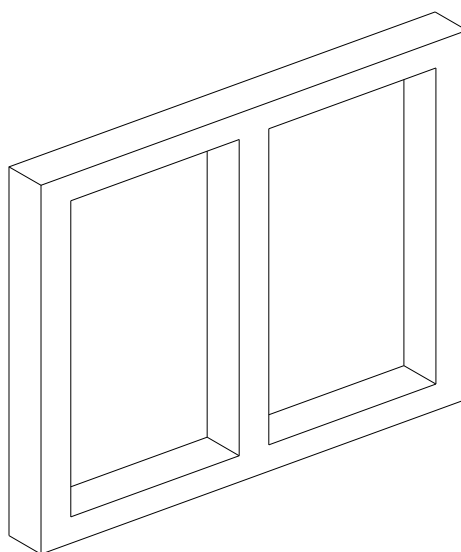


Fig. 3. 14: Núcleo trifásico de três colunas.

As Figs. 3.15, 3.16 e 3.17 mostram núcleos de transformadores de três colunas amplamente utilizados em transformadores de distribuição.



Fig. 3. 15: Foto de núcleo do tipo três colunas.



Fig. 3. 16: Foto de núcleo de três colunas com junção de 45°.



Fig. 3. 17: Foto de núcleo com os respectivos enrolamentos montados.

A conexão estrela aterrada – estrela aterrada nesse tipo de núcleo pode conduzir ao aquecimento do tanque, quando o secundário é carregado de forma desbalanceada ou quando ocorre um desequilíbrio de tensão no primário do sistema. Em um projeto de núcleo de três colunas, o fluxo de sequência zero não possui nenhum caminho de retorno pelo núcleo de ferro, retornando via caminho de elevada relutância através do ar e do tanque do transformador. Esse fluxo induz correntes parasitas no tanque, motivo de seu aquecimento (IEEE GUIDE FOR APPLICATION OF TRANSFORMER CONNECTIONS IN THREE-PHASE DISTRIBUTION SYSTEMS, 2008).

A construção do transformador trifásico no núcleo de três colunas possui uma assimetria resultante da sua própria estrutura, o que produz corrente elétrica a vazio e perdas diferentes nas três fases. A simetria pode ser obtida pela conexão dos enrolamentos em estrela ou delta defasados de 120° tanto fisicamente quanto eletricamente. Esta construção resulta em um núcleo com menos peso e tanque reduzido, porém raramente é utilizada por causa das complexidades de fabricação.

Para contornar esse problema, o núcleo de quatro ou cinco colunas deve ser utilizado para esse tipo de conexão. A coluna extra provê um caminho de ferro para o fluxo de sequência zero, não permitindo o aquecimento do tanque. Entretanto, o aquecimento do tanque pode ocorrer em menores proporções sob certas condições, por exemplo, quando ocorre um desequilíbrio de tensão acentuado. Isto ocorre porque, normalmente as colunas mais externas (terminais) não possuem capacidade total para o fluxo de sequência zero (elas são menores do que as colunas internas), saturando-as. Uma vez as colunas saturadas, algum fluxo de sequência zero flui no tanque causando aquecimento.

Para eliminar a possibilidade de aquecimento do tanque, o núcleo do tipo envolvido não deve ser usado. Uma opção é a utilização de bancos constituídos por unidades monofásicas, ou uso de núcleo triplex (SHORT, 2004, p. 182).

Para transformadores grandes, com o objetivo de reduzir a altura para transporte, a construção do núcleo de cinco colunas é uma opção. A Fig. 3.18 mostra o tipo de núcleo trifásico de cinco colunas.

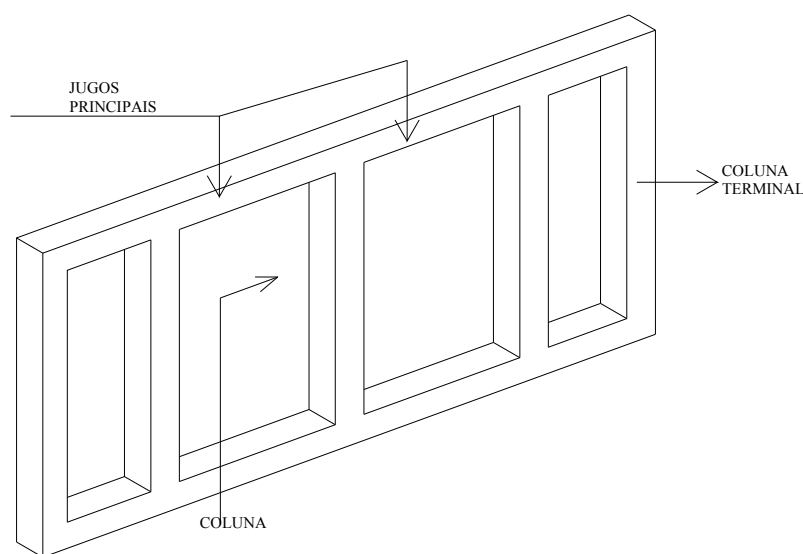


Fig. 3. 18: Representação do núcleo de cinco colunas.

O trecho do circuito magnético representado pelos jugos e colunas terminais possui relutância maior quando comparado ao jugo principal. Desde que o jugo principal não é amplo para conduzir todo fluxo produzido na coluna principal, ele satura e direciona o fluxo para as colunas externas. O fluxo direcionado para essas regiões do núcleo é de natureza não-senoidal devido à não-linearidade do núcleo. A não-linearidade também pode produzir trechos

com relutâncias diferentes, até mesmo considerando que o fluxo na coluna principal do núcleo tenha uma forma senoidal. Perdas extras ocorrem devido ao conteúdo harmônico presente no fluxo. A redução destas perdas pode ser feita aumentando-se a área do jugo principal para 60% da área da coluna principal, e 50% para jugo e colunas terminais.

3.4 Transformadores trifásicos

Quase todos os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia no mundo são sistemas trifásicos de corrente alternada. Em virtude desses sistemas desempenharem um papel importante na vida moderna, é necessário compreender de que forma os transformadores são usados.

Os transformadores para circuitos trifásicos podem ser construídos de duas formas. Uma forma é conectar três transformadores monofásicos idênticos para constituir um banco trifásico. Outra forma é a utilização de uma unidade trifásica em que todas as três fases estão na mesma estrutura de ferro. A Fig. 3.19 ilustra uma vista frontal de três núcleos de transformadores monofásicos iguais constituindo um banco:

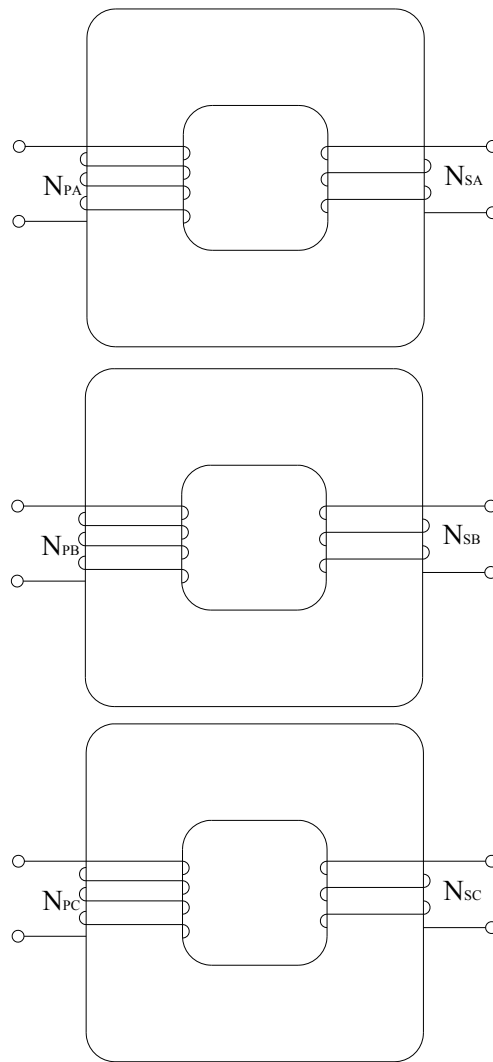


Fig. 3. 19: Representação de três núcleos monofásicos.

A unidade trifásica possui a vantagem de precisar de menos ferro para formar o núcleo, sendo mais econômica do que três unidades monofásicas e ocupa menos espaço. Porém, três unidades monofásicas possuem a vantagem de, no caso de uma falha ser necessário substituir somente uma unidade do banco trifásico no caso de uma falha. A Fig. 3.20 ilustra uma unidade trifásica na mesma estrutura ferromagnética.

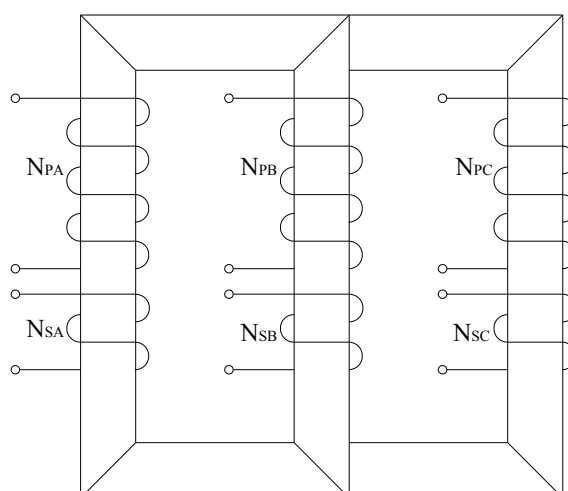


Fig. 3. 20: Representação do núcleo trifásico.

O banco constituído de três unidades monofásicas pode ser ligado de várias formas com o objetivo de formar o transformador trifásico. Os enrolamentos primário e secundário de qualquer transformador trifásico podem ser independentemente conectados em estrela ou delta. Há um total de quatro conexões possíveis para um transformador trifásico:

1. Estrela-estrela
2. Estrela-delta
3. Delta-estrela
4. Delta-delta

Serão descritas abaixo as principais características de cada conexão (CHAPMAN, 1991; SHORT, 2004):

Conexão estrela-estrela

As principais características desse tipo de conexão são:

1. Se o secundário do transformador possui cargas desequilibradas, então as tensões de fase do transformador podem tornar-se desbalanceadas.
2. Existem problemas com o aparecimento de tensões de 3^a harmônica.
3. Se os dois lados do transformador são aterrados, então para uma situação de falta ou de carregamento desbalanceado, esse tipo de conexão pode manter uma quantidade de fluxo de sequência zero satisfatória e necessitar de um caminho de retorno.

4. É apropriada para fonte isolada quando o primário é isolado e não apropriada para fonte isolada quando o primário é aterrado.
5. Ocorre anulação da corrente de linha de terceira harmônica para o caso do primário e secundário isolados ou primário isolado e secundário aterrado.
6. Se o primário é aterrado, ocorre a circulação da corrente de linha de terceira harmônica nesse lado.
7. Não há deslocamento de fase entre os fasores de tensão dos enrolamentos primário e secundário.
8. Nenhuma chance de ocorrência de ferorressonância com banco de unidades monofásicas ou construção triplex. Alguma probabilidade existe para construção de quatro ou cinco colunas.

Os problemas de desequilíbrios e de terceira harmônica podem ser solucionados usando-se uma das duas técnicas abaixo:

1. Efetuar o aterramento do neutro do transformador. Esta conexão permite que a corrente circule pelo neutro em vez de provocar aumento de tensões nas fases. O neutro também provê um caminho de retorno para qualquer desequilíbrio de corrente na carga.
2. Adicionar um terceiro enrolamento conectado em delta ao banco de transformadores. Ao adicionar o enrolamento conectado em delta, as componentes de terceira harmônica de tensão no delta se somarão causando o fluxo de corrente dentro do enrolamento delta. Esse método de supressão das componentes de terceira harmônica funciona da mesma forma que o aterramento do neutro.

Conexão estrela-delta

Segundo (CHAPMAN, 1991), essa conexão não possui problema com componentes de terceira harmônica em suas tensões já que elas são “dissipadas” devido à corrente circulante no lado delta. Ela apresenta uma estabilidade maior com respeito a cargas desbalanceadas, desde que o enrolamento delta redistribua qualquer desequilíbrio que ocorra.

Entretanto, este arranjo apresenta um problema devido à conexão delta. A tensão do enrolamento secundário apresenta um deslocamento de fase de 30° em relação à tensão do enrolamento primário. O deslocamento de fase pode acarretar problemas no momento de colocar duas unidades trifásicas em paralelo. Os ângulos de fase das tensões dos secundários

dos transformadores devem ser iguais se eles forem colocados em paralelo. Outra desvantagem desse tipo de conexão é que ela é altamente suscetível à ocorrência de ferorressonância.

Conexão delta-estrela (aterrada)

Tipo de conexão muito utilizada em sistemas de distribuição (SHORT, 2004). Possui como características principais:

1. O enrolamento delta isola o primário das harmônicas de sequência zero produzidas no secundário. Terceira harmônica e outras harmônicas de sequência zero não podem passar para o circuito primário (elas circulam no delta).
2. Provê uma fonte de aterramento para o secundário, independentemente da configuração de aterramento do lado primário.
3. Não há aquecimento do tanque devido ao fluxo externo ao núcleo. Isto ocorre porque a conexão delta assegura que o fluxo de sequência zero não circulará pelo núcleo do transformador. Pode-se usar um transformador de três colunas de forma segura.
4. Altamente suscetível a ocorrência de ferorressonância.
5. Adequada para suprimento a quatro condutores.
6. A tensão do secundário se atrasa ou avança em relação à tensão do primário por 30° .

Conexão delta – delta

Possui como principais características (SHORT, 2004):

1. Pode continuar operando se ocorre falha de uma unidade (delta aberto).
2. Possui elevada corrente circulante se a razão de espiras não for igual.
3. Altamente suscetível à ferorressonância.
4. Corrente de linha de terceira harmônica é anulada.
5. Não há deslocamento de fase do fasor de alta tensão para baixa tensão.
6. Adequada para fonte isolada.

Capítulo 4

O Fenômeno da ferrorressonância

4.1 Introdução

A ferrorressonância é um fenômeno de ressonância não-linear que pode afetar as redes de energia elétrica. É uma ressonância série envolvendo uma indutância não-linear e capacitância, e de maneira mais frequente envolve a indutância magnetizante do transformador e a capacitância de um cabo de distribuição ou de linha de transmissão conectada ao transformador ou de banco de capacitores. Esse fenômeno é capaz de causar taxas anormais de harmônicas, além de sobretensões e sobrecorrentes transitórias ou de regime permanente que são perigosas aos equipamentos elétricos. Segundo (HUI et. al., 2009), as sobretensões e sobrecorrentes são imprevisíveis e podem ser prejudiciais ao sistema de potência.

Esse assunto despertou o desejo de muitos estudiosos em compreender quais os principais aspectos que estão relacionados ao aparecimento desse fenômeno, bem como contribuir para que os impactos quando existentes fossem reduzidos. Inúmeros casos envolvendo transformadores trifásicos, bancos de transformadores monofásicos e transformadores de potencial capacitivos estão reportados nas diversas entidades que promovem o avanço científico mundial.

O termo ferrorressonância apareceu na literatura pela primeira vez em 1920, (CHAUDHARY et al., 2009 apud BOUCHEROT, 1920) referindo-se aos tipos de fenômenos oscilatórios em um circuito elétrico que deve conter pelo menos os seguintes elementos:

1. Indutância não-linear;
2. Capacitância, que pode ser atribuída a vários elementos;
3. Fonte de tensão;
4. Baixas perdas;

Os elementos descritos anteriormente podem ser encontrados no sistema elétrico de várias formas. As indutâncias não-lineares são encontradas em transformadores de força, transformadores de potencial indutivo TP, reatores *shunt*, etc. Já as capacitâncias são atribuídas a cabos, linhas longas, transformadores de potencial capacitivos, banco de capacitores série ou *shunt*. Uma combinação entre esses diversos elementos constitui um cenário para uma possível ocorrência desse fenômeno.

Interesse real sobre a ferrorressonância apareceu por volta de 1930 a 1940 quando foi mostrado que o uso de capacitores série para regulação de tensão causava ferrorressonância em sistemas de distribuição, resultando em sobretensões perigosas (CHAUDHARY et al., 2009 apud BUTLER; CONCORDIA, 1937).

Sobretensões de natureza ferrorressonante foram investigadas por (HOPKINSON, 1967) em bancos de transformadores monofásicos delta/estrela durante chaveamento monofásico como uma função da potência do transformador e do comprimento do circuito. Segundo o autor, para qualquer nível de tensão existe um valor de comprimento de circuito, que pode ser aéreo ou subterrâneo, acima do qual sobretensões ferrorressonantes podem ser esperadas se um ou dois pólos de um dispositivo de chaveamento estiver aberto. Isto é verdadeiro para bancos constituídos por transformadores com primário com neutro aterrado ou não.

O trabalho realizado por (JACOBSON; MENZIS, 2001) investigou a ferrorressonância em um transformador de 230 kV. A modelagem correta das perdas no núcleo de ferro e o acoplamento entre fases mostraram ser importantes na reprodução das observações feitas em campo. Esse trabalho também mostrou a dificuldade de se obter uma representação precisa do transformador. O estudo original assumiu que três transformadores monofásicos poderiam reproduzir os transitórios esperados. A representação monofásica assume que as impedâncias de sequência positiva e zero são iguais e que não existe acoplamento entre fases. Dados não foram disponibilizados para permitir a modelagem do transformador de forma mais precisa.

O trabalho efetuado por (ROY, 2008) avaliou o fenômeno da ferrorressonância em um banco de transformadores monofásicos para várias condições de amortecimento e capacitância da linha. Neste trabalho foram utilizados capacitores *shunt* para reproduzir o comportamento de uma determinada linha e, como resultado principal o trabalho apresentou a relação dos valores de pico alcançados com a carga armazenada nos capacitores e níveis de carga no secundário.

A principal característica do fenômeno da ferorrressonância é a possibilidade de se ter mais do que uma resposta em regime permanente para o mesmo conjunto de parâmetros da rede (FERRACI, 1998). A sua ocorrência está diretamente relacionada com algum tipo de transitório precedente, como, por exemplo, sobretensões por descargas atmosféricas, energização ou desligamento de transformadores ou cargas, ocorrência ou remoção de faltas. A resposta da rede surge em um aumento repentino da tensão em relação a sua operação em regime, caracterizada por elevadas sobretensões e harmônicas que podem conduzir os equipamentos a sérios danos. Tanto as sobretensões quanto as sobrecorrentes são de natureza sustentada com elevados níveis de distorção das formas de onda de tensão e de corrente, levando a consequências extremamente perigosas. Isto quer dizer que uma vez que o fenômeno tenha surgido, o sistema permanece operando em estado de ferorrressonância, até que a fonte de energia não seja mais capaz de fornecer a energia necessária para a manutenção do fenômeno.

Entretanto, para a ocorrência desse fenômeno, um conjunto de fatores e condições são determinantes, tais como: condição inicial do sistema, característica de saturação do núcleo do transformador, fluxo residual no núcleo do transformador, tipo de conexão do enrolamento do transformador, capacitância do circuito e perdas totais (VALVERDE, et al., 2007).

A análise desse fenômeno se torna complicada porque não pode ser feita por métodos computacionais baseados em aproximações lineares, normalmente usadas no ramo da engenharia elétrica. Esta carência de conhecimento pode ser responsável pela não compreensão do motivo de vários equipamentos terem sido destruídos ou estarem em mau funcionamento.

Exemplos práticos de configurações de sistemas elétricos que apresentam risco potencial de ocorrência do fenômeno serão apresentados. Os projetos dos sistemas devem ser bem analisados para evitar a ocorrência das situações de riscos, com o auxílio de ferramentas de análise numérica apropriada, que contribuem na avaliação do risco para uma faixa de valores dos parâmetros do sistema em condições normais ou de contingência.

4.2 Análise do fenômeno

4.2.1 Ressonância

No fenômeno da ressonância série, um valor de tensão elevado pode aparecer através dos elementos que constituem o circuito LC série apresentado na Fig. 4.1 quando é excitado com a sua frequência natural.

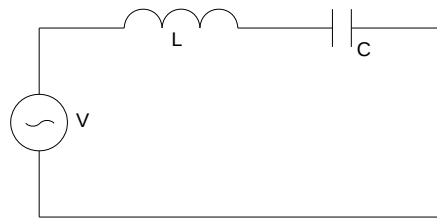


Fig. 4. 1: Circuito LC simples.

Analisando de forma fasorial, tem-se a seguinte equação para tensões do circuito acima:

$$\dot{\mathbf{V}} = \dot{\mathbf{V}}_L + \dot{\mathbf{V}}_C \quad (4.1)$$

Em que $\dot{\mathbf{V}}$ é a tensão aplicada e ambos $\dot{\mathbf{V}}_L$ e $\dot{\mathbf{V}}_C$ são as tensões sobre o indutor e sobre o capacitor, respectivamente.

A Fig. 4.2 mostra que as tensões sobre o indutor e o capacitor se adicionam resultando na tensão aplicada (GREENWOOD, 1991; DUGAN et al., 2001). O diagrama fasorial mostra que a tensão através do indutor está adiantada em relação à corrente de 90° , e a tensão sobre o capacitor aparece atrasada da mesma quantidade.

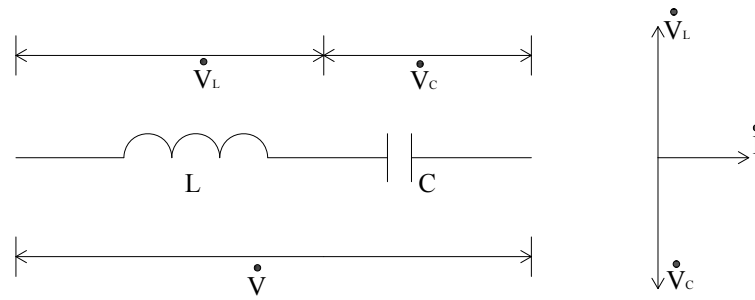


Fig. 4. 2: Diagrama fasorial para um circuito LC.

Conforme a Fig. 4.2, verifica-se que ambos $\dot{V}_L$ e $\dot{V}_C$ podem exceder a tensão da fonte acompanhada de correntes muito elevadas. Tais condições ressonantes devem ser evitadas por razões já mencionadas anteriormente, mas elas podem ocorrer de maneira inadvertida.

Ainda com relação à análise da Fig. 4.1, a solução gráfica para o circuito, considerando que haja amortecimento representado pela resistência R , será mostrada mais adiante. Após a inserção deste novo elemento, o novo circuito é mostrado na Fig. 4.3:

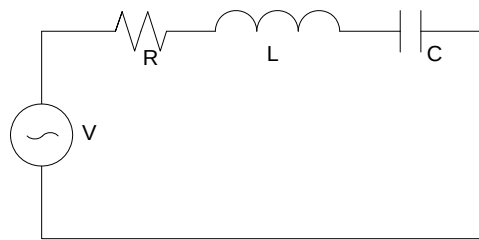


Fig. 4. 3: Circuito LC com a resistência inserida.

Nesse caso, tanto a reatância capacitiva X_C quanto a reatância indutiva X_L são assumidas constantes ou lineares. Assume-se que a resistência R é muito menor do que $|X_L|$ e $|X_C|$. A magnitude da corrente que flui no circuito é fornecida da seguinte forma:

$$|\dot{I}| = \frac{|\dot{V}|}{\sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)}} \quad (4.2)$$

Considerando que o circuito possui uma resistência desprezível quando comparada aos valores das reatâncias, a eq. (4.2) fica então da seguinte forma:

$$|\dot{\mathbf{i}}| = \frac{|\dot{\mathbf{V}}|}{X_L - X_C} \quad (4.3)$$

Seja X_C variável com R e X_L mantidos constantes. Quando X_C é igual a zero, a corrente que flui no circuito é aproximadamente igual a:

$$|\dot{\mathbf{i}}| \approx \frac{|\dot{\mathbf{V}}|}{X_L} \quad (4.4)$$

Porém, quando o valor da reatância capacitiva tende para o infinito, o valor da corrente se torna desprezível. Esses valores são mostrados na Fig. 4.4:

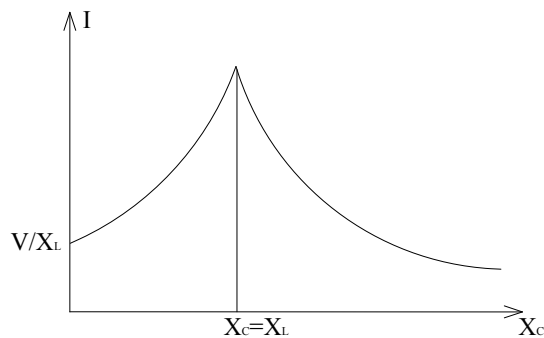


Fig. 4. 4: Solução gráfica do circuito LC.

O ponto máximo encontrado no gráfico corresponde ao valor da corrente elétrica limitada apenas pela parte resistiva do circuito, ou seja:

$$|\dot{\mathbf{i}}| = \frac{|\dot{\mathbf{V}}|}{R} \quad (4.5)$$

Apesar desse tipo de análise ser realizada a partir de base linear, ela pode ser considerada como uma etapa para a compreensão do fenômeno da ferorressonância. Verifica-se, no caso linear, a existência de pontos com elevadas sobretensões, principalmente na capacitância e na indutância, o que ocorre de forma semelhante para o caso não-linear.

A abordagem acima apresentada se refere a elementos considerados lineares. No estudo do fenômeno da ferorressonância existe a presença de elementos não-lineares, como o núcleo do transformador de distribuição. Para essa situação, a análise se torna mais complicada e recorre-se à ferramenta gráfica para avaliar de forma qualitativa o fenômeno. Esse tipo de análise será aplicado também para o caso linear, em que diferenças marcantes se manifestam quando comparadas com o caso não-linear.

Inicialmente, as distorções na tensão e corrente provenientes do fenômeno serão desprezadas para efeito de simplificação. O interesse para a análise gráfica está na componente fundamental somente. De maneira similar, as perdas serão desconsideradas e a indutância é considerada como não-linear.

Com relação à Fig. 4.2, a tensão através da indutância depende da frequência angular ω e da corrente descrita por uma função denominada de $f(\dot{I})$. Diferentemente do caso linear, a relação entre a tensão e corrente é descrita por uma função não-linear, que será indicada como $f(\dot{I})$ nessa análise qualitativa.

$$\dot{V}_L = j\omega f(\dot{I}) \quad (4.6)$$

Essa tensão é mostrada na Fig. 4.2 e está adiantada em relação à corrente de 90° . A tensão na capacitância é dada por:

$$\dot{V}_C = -j \frac{\dot{I}}{\omega C} \quad (4.7)$$

O sinal negativo indica que está em anti-fase à $\dot{V}_L$. A tensão total é dada por:

$$\dot{V} = \dot{V}_L + \dot{V}_C = j\omega f(\dot{I}) - j\frac{\dot{I}}{\omega C} \quad (4.8)$$

$$\dot{V}_L = \dot{V} + j\frac{\dot{I}}{\omega C} \quad (4.9)$$

A tensão sobre o indutor possui uma componente fixa e outra que é proporcional à corrente $\dot{I}$. A eq. (4.6) é mostrada na Fig. 4.5:

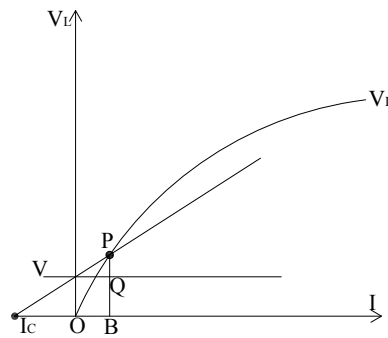


Fig. 4. 5: Gráfico do valor da tensão na indutância em função da corrente.

Uma vez que tanto (4.6) como (4.9) representam a tensão sobre a indutância $\dot{V}_L$, então o ponto de operação P equivale à intersecção entre as mesmas. A tensão no capacitor neste exemplo é dado pelo segmento de reta PQ e sobre o indutor é dado pelo segmento PB e o valor da corrente é dado pelo segmento OB. Verifica-se no gráfico que a tensão sobre o indutor excede a tensão da fonte $\dot{V}$.

A inclinação da reta pode ser modificada variando-se ω ou o valor da capacitância. À medida que o valor da capacitância aumenta, o ângulo de inclinação da reta diminui. Consequentemente, o ponto de intersecção P se deslocará ao longo da curva $\dot{V}_L$. O gráfico da Fig. 4.6 a seguir mostra o efeito do valor da capacitância no circuito ferorrressonante, apresentando diversas retas que reproduzem diferentes valores de capacitâncias e as respectivas intersecções com o gráfico da indutância não-linear. Sabe-se que o valor da capacitância fornece a inclinação da reta conforme dado em (4.10)

$$\tan \alpha = \frac{1}{\omega C} \quad (4.10)$$

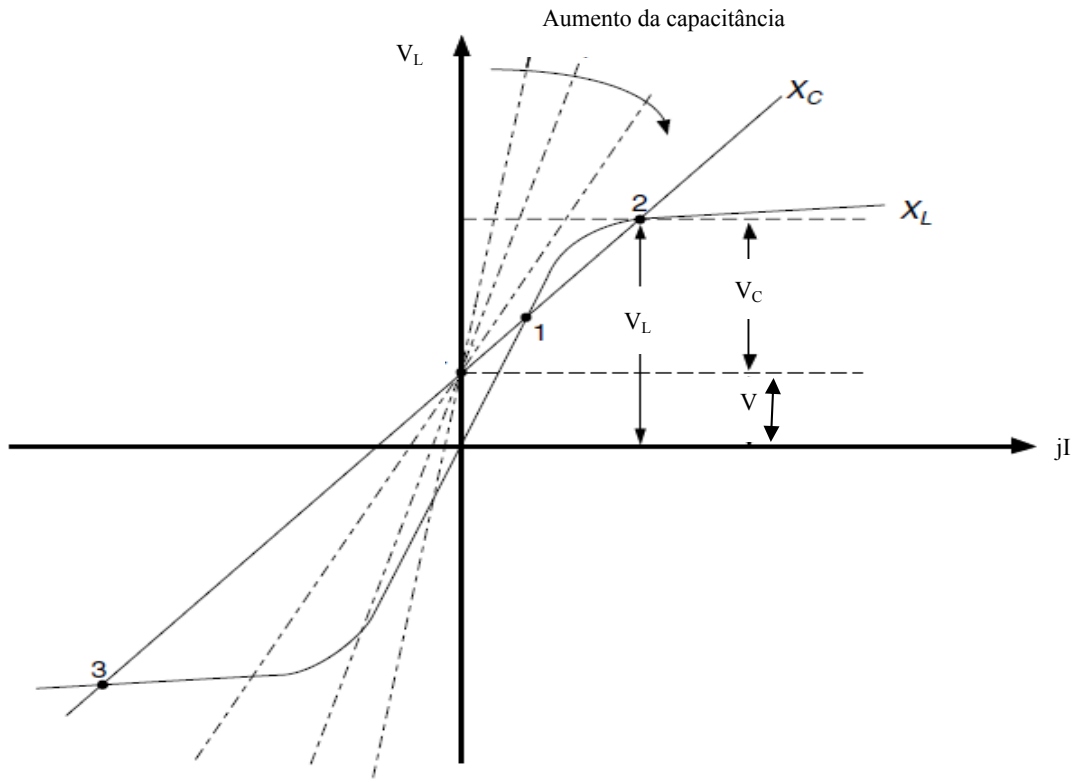


Fig. 4. 6: Solução gráfica com vários valores de capacitâncias.

A Fig. 4.6 mostra que a reta que representa o valor da capacitância pode produzir múltiplas interseções com o gráfico correspondente à indutância não-linear. Uma dessas retas é apresentada na Fig. 4.6, em que existem as interseções identificadas pelos números (1), (2) e (3). Com relação ao ponto (3), observa-se que os valores das tensões na capacitância e na indutância são negativos e excedem o valor de tensão correspondente ao ponto (1). Ainda com relação ao ponto (3), a tensão $V_C > V_L$, enquanto $V_C < V_L$ para o ponto (1). A corrente elétrica está adiantada em relação à tensão V para a condição (3), porém atrasada na condição (1). Os pontos (1) e (3) são pontos de operação estáveis uma vez que qualquer variação em I quando operando sobre um desses pontos, causará mudanças de tensão tendendo a restaurar a corrente ao seu valor inicial. A solução no ponto (2) é caracterizada por ser instável, ou seja, qualquer mudança na corrente causará mudanças nas tensões da indutância e na capacitância

as quais não provocarão a restauração da corrente para seu valor inicial (GREENWOOD, 1991).

Neste ponto é necessária uma comparação entre o circuito discutido acima, com a combinação série de uma capacitância com o indutor linear. Isto é ilustrado graficamente na Fig. 4.7.

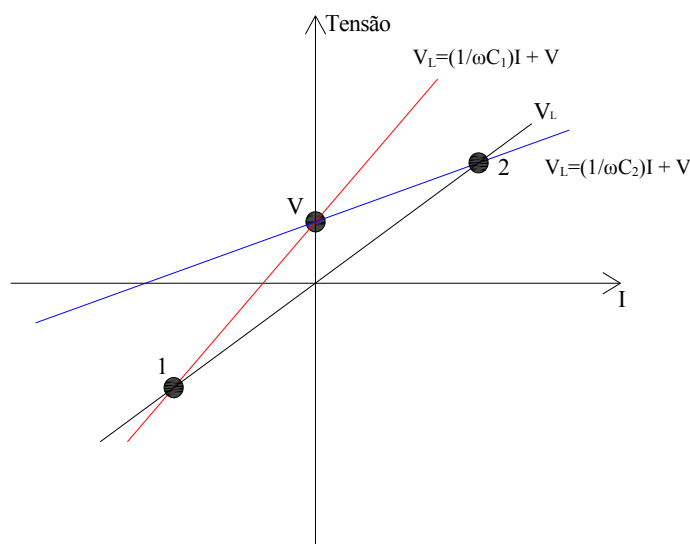


Fig. 4. 7: Caso linear.

A reta V_L é a característica do indutor, enquanto que as outras retas mostram a característica de acordo com o valor do capacitor. Os pontos de operação podem ser (1) ou (2). Nesse caso, para cada valor de capacitância só existe um ponto de operação. O ponto correspondente será em (1) se $\omega L > 1/\omega C$ e será (2) se $\omega L < 1/\omega C$. À medida que o valor da capacitância diminui, a inclinação das retas que correspondem aos valores das capacitâncias aumenta.

4.3 Configurações típicas

É importante para a análise da ferorressonância reconhecer algumas configurações de circuitos típicas que possuem o risco de surgimento desse fenômeno. A lista não é definitiva, porém fornece uma visão geral das condições mais comuns das redes de energia elétrica, principalmente de distribuição (PEIXOTO, 2004). Tais condições também resultam em diferentes tipos de análise por parte de estudiosos do assunto. Aliado a isso, conforme foi citado anteriormente, a rede deve estar levemente carregada e deve estar presente uma

conexão série de capacitância com uma indutância não-linear e deve haver uma mínima presença de elementos resistivos. Em virtude do transformador estar envolvido, a reatância indutiva pode ter um valor dentro de sua região linear de operação ou na região de saturação, ou algum valor entre estes, conduzindo a múltiplos estados possíveis do sistema.

4.3.1 Ferrorressonância em transformadores trifásicos

Ferrorressonância em sistemas trifásicos pode envolver grandes transformadores de potência, transformadores de distribuição e transformadores para instrumentos (TP ou TC). Como já foram abordados anteriormente, os requisitos que influenciam para que ocorra o fenômeno são: fonte de tensão aplicada, indutância de magnetização do transformador, capacitância e pequeno amortecimento. A capacitância pode estar na forma de capacitância de cabos subterrâneos ou de linhas de transmissão longas, bancos de capacitores, acoplamento capacitivo entre linhas de circuito duplo (CHAUDHARY et. al., 2009).

Eventos do sistema que podem provocar ferrorressonância incluem chaveamento monofásico ou atuação de fusível ou perdas do sistema de aterramento. O circuito ferrorressonante em todos os casos é constituído por uma tensão aplicada conectada a uma capacitância em série com a reatância magnetizante do transformador (PEIXOTO, 2004). As figuras das subseções seguintes apresentam diversas configurações propícias ao surgimento do fenômeno (HORAK, 2004). A capacitância conectada em estrela é ligada em paralelo com o transformador, que pode estar conectado em delta ou estrela. A capacitância pode ser de um banco de capacitores ou capacitância *shunt* de linhas ou cabos conectando o transformador à fonte. Cada fase do transformador é representada por uma impedância de magnetização jX_m , uma vez que a ferrorressonância envolve somente a reatância de magnetização.

A síntese da operação para as situações descritas nas subseções 4.3.2 e 4.3.3 possui características semelhantes. Se um ou dois pólos de uma chave são abertos e se o banco de capacitor, por exemplo, é aterrado então um caminho através da(s) capacitância(s) e da reatância(s) de magnetização se constitui e existe a possibilidade do fenômeno da ferrorressonância ocorrer. Se tanto o ponto comum do banco de capacitores quanto o neutro do transformador resultante da ligação em estrela são ambos aterrados ou isolados, então não existe caminho série, e não existe uma possibilidade clara de ocorrência do fenômeno. A

ferrorressonância é possível para qualquer configuração de núcleo, até mesmo o tipo triplex ou banco de transformadores monofásicos (CHAUDHARY et. al., 2009).

Dependendo do tipo de núcleo do transformador, o fenômeno da ferrorressonância pode ser possível, mesmo quando não existe um caminho série evidente da tensão aplicada através da capacitância e reatância de magnetização do transformador. Isto é possível com tipos de núcleos trifásicos que estabelecem acoplamento direto entre fases, em que tensões podem ser induzidas na fase aberta do transformador (CHAUDHARY et. al., 2009).

Sobre a análise realizada nas subseções 4.3.2 e 4.3.3 são válidas as seguintes afirmações:

1. A rede de distribuição pode ser representada por um circuito equivalente π RLC, sem acoplamento entre fases.
2. Dispositivos de manobra de operação simultânea são utilizados em subestações onde as linhas de distribuição se originam, e dispositivos de interrupção baseados em operação monopolar são usados fora das subestações.
3. Tanto linhas aéreas quanto cabos subterrâneos conectam transformadores ao sistema. Cabos possuem um valor de capacitância relativamente maior quando comparados com linhas aéreas. O fenômeno da ferrorressonância é mais frequente em circuitos com cabos subterrâneos.
4. Transformadores trifásicos ou monofásicos podem estar conectados em qualquer ponto da rede de distribuição. Eles podem ter qualquer configuração de núcleo
5. O tipo de chaveamento e de dispositivo de interrupção, tipo de transformador, carga no secundário do transformador e comprimento do circuito de distribuição promoverá ou não a ferrorressonância. Devido à não-linearidade, um aumento da capacitância não implica necessariamente um aumento da probabilidade de ocorrência do fenômeno.
6. Uma pequena carga no secundário, juntamente com pequeno amortecimento do sistema resultará em maior probabilidade de ocorrência do fenômeno. Consequentemente, uma linha altamente capacitiva e transformadores com pequena carga ou operando em vazio são altamente suscetíveis à ocorrência da ferrorressonância.
7. A operação de manobra simultânea das três fases impede que o fenômeno ocorra. Contudo, ele pode ocorrer se uma ou duas fases são desligadas enquanto o transformador estiver descarregado ou levemente carregado. A perda de uma ou duas fases pode acontecer devido à atuação de um fusível, operação de seccionadores ou religadores, ou

durante o processo de energização ou desligamento utilizando procedimentos monopolares.

8. A ferrorressonância envolve a reatância de magnetização correspondente à fase aberta do transformador e a capacitância *shunt* da linha de distribuição. O pessoal da operação pode assumir que o lado da carga estando com a chave desligada é seguro para o trabalho, quando um elevado valor de tensão pode estar presente. Cargas monofásicas conectadas ao longo dessa fase continuarão sendo supridas, embora com tensão elevada e com pobre qualidade de energia.

4.3.2 Chaveamento monopolar de transformadores com primário em delta

Um circuito envolvendo um transformador trifásico não aterrado (estrela isolada, delta) está sujeito à criação de uma rede L-C série. O circuito equivalente resultante é uma conexão série de uma indutância e de uma capacitância. A Fig. 4.8 mostra a indutância de magnetização do transformador conectada em delta ligada a uma capacitância conectada em estrela, que pode estar representando vários componentes do sistema de potência como por exemplo, a capacitância de cabos ou, eventualmente, um banco de capacitores (HORAK, 2004).

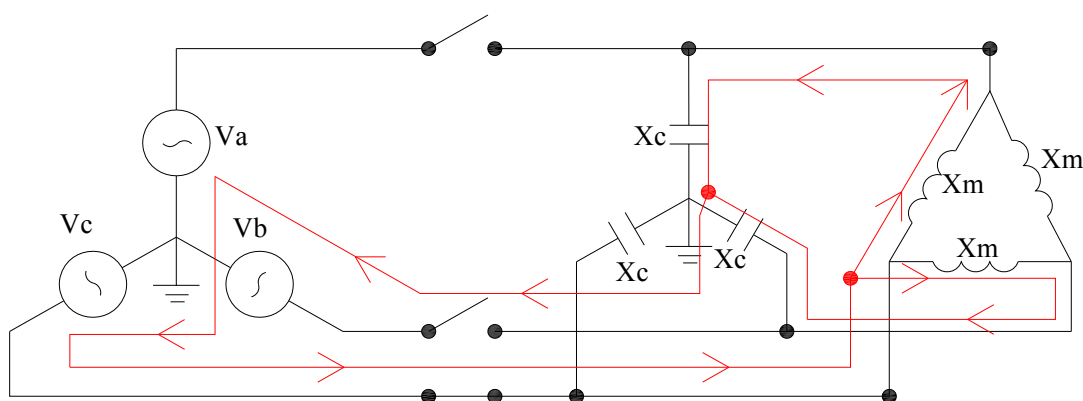


Fig. 4. 8: Enrolamento em delta com uma fase energizada.

A posição das chaves pode representar algum tipo de manobra do transformador. No caso acima pode estar representando o fechamento monopolar de uma chave e o traçado como se processa o fluxo de corrente em virtude desse tipo de manobra. É importante

observar que se houvesse a operação simultânea dos três pólos da chave, esse caminho de corrente não existiria e consequentemente o sistema não estaria sujeito a sobretensões de natureza sustentada. O circuito equivalente que mostra a conexão entre o elemento capacitivo representado pela reatância capacitiva X_c e o elemento indutivo representando a indutância do núcleo do transformador é apresentado na Fig. 4.9.

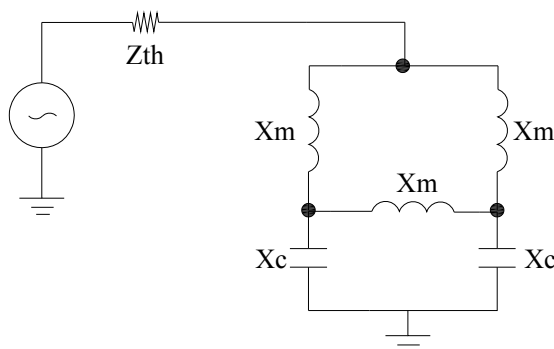


Fig. 4. 9: Rede equivalente referente à Fig. 4.8.

A Fig. 4.10 mostra o caso de um transformador com enrolamento conectado em delta e um tipo de manobra monopolar, com duas fases permanecendo energizadas.

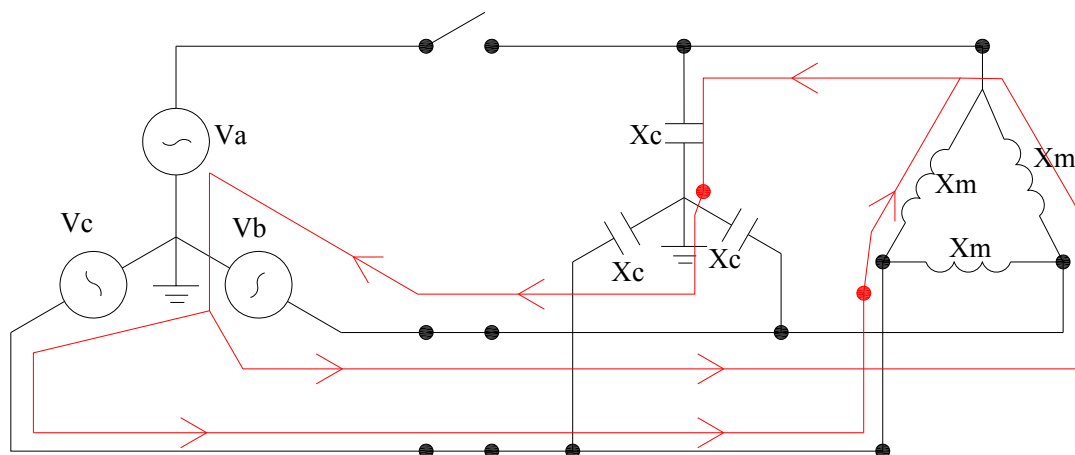


Fig. 4. 10: Enrolamento em delta com duas fases energizadas.

O circuito equivalente da Fig. 4.10 é apresentado na Fig. 4.11. Nesse caso o caminho da corrente elétrica se dá através do ponto aterrado, circulando apenas por uma reatância capacitiva em direção à fonte através daquele ponto. A corrente elétrica circula em cada fase

energizada em direção aos pontos correspondentes da reatância de magnetização do transformador.

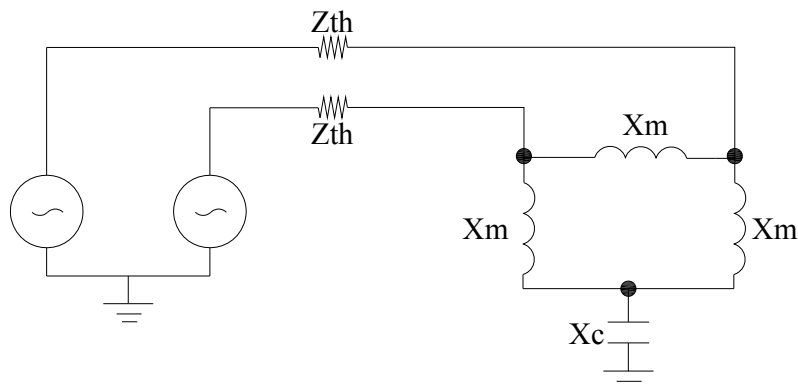


Fig. 4.11: Circuito equivalente referente à Fig. 4.10.

4.3.3 Chaveamento monopolar de transformadores com primário em estrela isolada

O sistema da Fig. 4.12 apresenta o caminho de ressonância entre a capacitância do sistema e o primário do transformador em estrela isolada. Nesse caso, também existe a possibilidade de ferorressonância devido à conexão entre os elementos envolvidos. Isto é verificado através do circuito equivalente fornecido na Fig. 4.13.

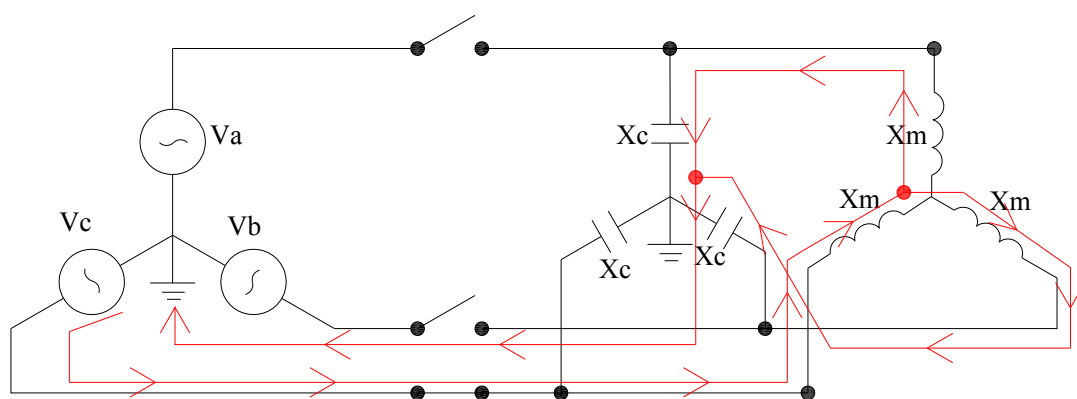


Fig. 4.12: Enrolamento em estrela isolada com uma fase energizada.

A conexão da capacitância à fase energizada é desconsiderada, pois para a análise do circuito o que importa é a conexão série entre a capacitância e a indutância.

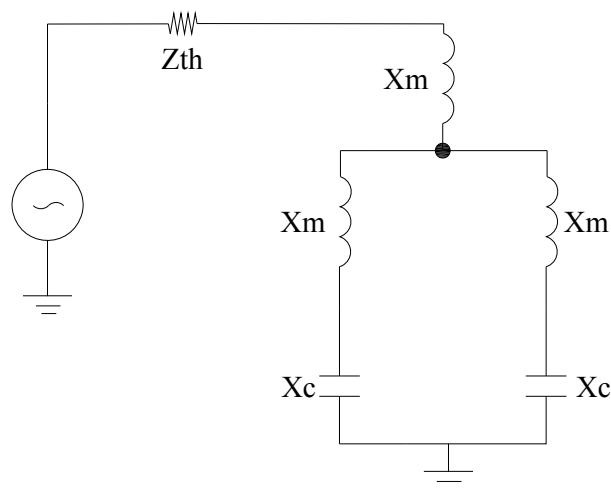


Fig. 4. 13: Circuito equivalente referente à Fig. 4.12.

4.3.4 Chaveamento monopolar de transformadores com primário em estrela aterrada

O exemplo a seguir apresenta um banco de capacitores isolado conectado a um transformador com primário aterrado, submetido a uma manobra monopolar. O caminho percorrido pela corrente é mostrado no esquema elétrico da Fig. 4.14 e a conexão entre o elemento indutivo e o capacitivo é apresentada na rede equivalente da Fig. 4.15.

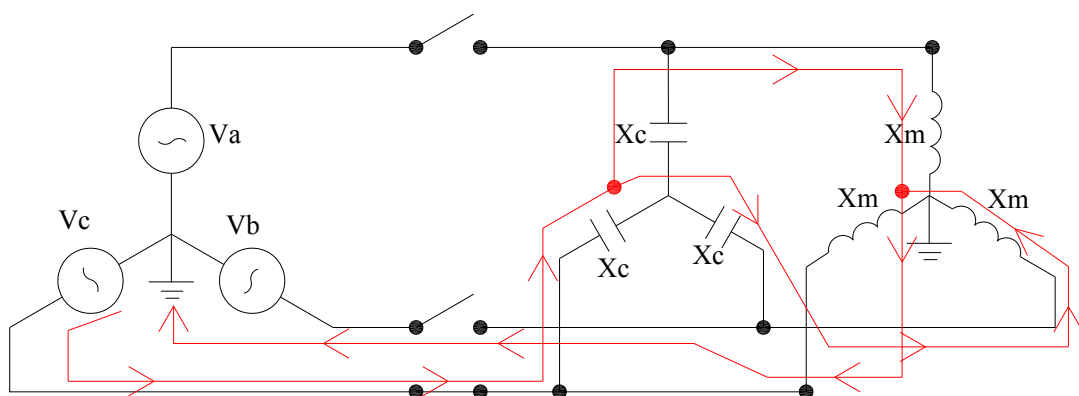


Fig. 4. 14: Enrolamento em estrela aterrada com sistema de capacitância isolada e uma fase energizada.

Esse circuito apresenta a forma pela qual os elementos estão conectados constituindo dessa maneira um circuito ressonante.

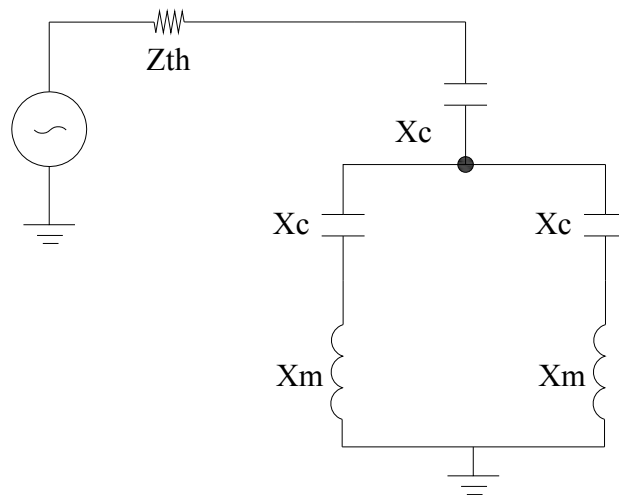


Fig. 4. 15: Circuito equivalente da Fig. 4.14.

A Fig. 4.16 apresenta uma manobra monopolar, com duas fases permanecendo fechadas. Essa configuração pode indicar que o sistema estava operando normalmente e um defeito em uma das fases provocou a operação do fusível. Também pode indicar a operação monopolar devido algum tipo de circunstância, como por exemplo, a necessidade de intervenção no circuito para manutenção.

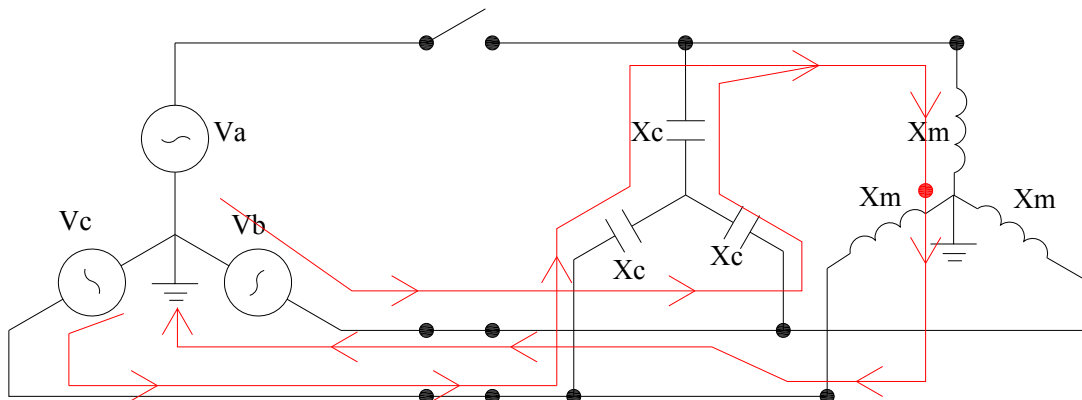


Fig. 4. 16: Enrolamento em estrela aterrada com duas fases energizadas e sistema de capacitância isolada.

4.3.5 Capacitância de contato de disjuntor alimentando uma barra com transformador de potencial

Disjuntores podem energizar parcialmente um barramento que está desligado via capacitância através de contatos abertos. O circuito possui elementos que podem desencadear o fenômeno da ferorressonância. Uma rede $L - C$ é criada entre o sistema de potência, a

capacitância do disjuntor e o transformador de potencial TP conectado ao barramento. Mesmo em disjuntores sem capacitores de equalização de tensão (*grading capacitor*), a capacitância entre os contatos abertos está na ordem de 50pF. O circuito é apresentado na Fig. 4.17.

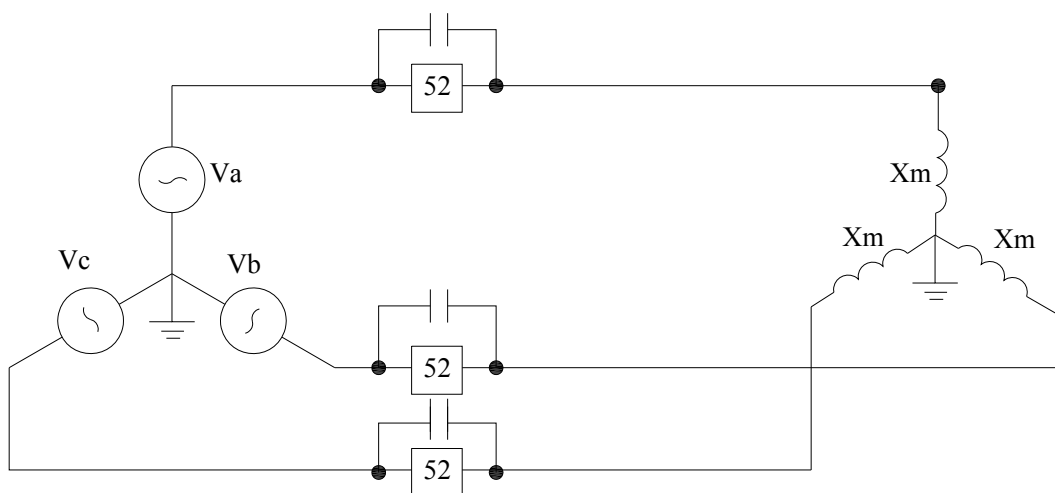


Fig. 4. 17: Disjuntor com capacitor de equalização alimentando um TP.

4.4 Classificação dos modos ferorrressonantes

Segundo (FERRACI, 1998), as principais diferenças entre o circuito ferorrressonante e o circuito ressonante linear para uma dada frequência ω são:

1. Possibilidade de ressonância para uma ampla faixa de valores de capacitância;
2. A frequência tanto da tensão quanto da corrente pode ser diferente da frequência da fonte de tensão senoidal;
3. A existência de diversas respostas estáveis em regime permanente para uma dada configuração e valores de parâmetros. Um desses estados é o estado considerado normal (para o caso linear), enquanto o outro indesejado é o estado anormal que pode produzir danos aos equipamentos. Acrescentam-se também questões relacionadas com as condições iniciais, tais como, carga inicial dos capacitores, fluxo remanescente no núcleo do transformador e instante de chaveamento. São as condições iniciais que determinam qual o tipo de resposta em regime permanente surgirá.

Em virtude da possibilidade de existir na rede formas de onda de tensão e de corrente com frequência diferente da frequência da fonte de potência, costuma-se dividir os estados

ferrorressonantes em quatro tipos diferentes. Esses estados foram identificados a partir de experimentos com modelos de sistemas reduzidos, juntamente com simulação numérica.

Os quatro tipos de estados ferrorressonantes são listados a seguir:

1. Modo fundamental: Tensão e corrente são periódicas com período T igual ao período do sistema e pode conter uma taxa variada de harmônicas. O espectro do sinal é descontínuo contendo a frequência fundamental f_0 do sistema de potência e suas harmônicas.
2. Modo subharmônico: Os sinais são periódicos com período nT o qual é múltiplo do período da fonte (T). Esse estado é conhecido como subharmônico n ou harmônico $1/n$. Os estados ferrorressonantes subharmônicos são normalmente de ordem par. O espectro apresenta frequência fundamental f_0/n (em que f_0 é a frequência da fonte e n um número inteiro) e suas harmônicas (a frequência f_0 é parte do espectro).
3. Modo quase periódico: Este modo é também chamado de falso período e não é periódico. O espectro é descontínuo cujas frequências são expressas na forma nf_1 e mf_2 , em que n e m são inteiros e f_1/f_2 é um número irracional.
4. Modo caótico: O espectro correspondente a esse modo é contínuo, isto é, não é cancelado para qualquer frequência.

4.5 Ferrorressonância em transformadores de potência

Nesta subseção serão abordados os princípios gerais da ferrorressonância em transformadores monofásicos e trifásicos. Serão discutidos também os parâmetros que interferem na resposta da rede como o valor da capacitância do circuito e as perdas do transformador, dando ênfase na análise de transformadores trifásicos por serem de ampla utilização, em virtude da diversidade de construção do núcleo e dos tipos de ligações dos enrolamentos. Os principais elementos que constituem os modelos de transformadores serão identificados, dos quais dependem os resultados da simulação. O grau de complexidade dos modelos está diretamente relacionado com o tipo de estudo a ser realizado e do tipo de resultado esperado.

4.5.1 Transformadores monofásicos

Quando uma tensão nominal é aplicada a um transformador monofásico sem carga, apenas uma pequena corrente de excitação flui. Essa corrente possui duas componentes denominadas de corrente de magnetização e de corrente de perdas no núcleo. A corrente de magnetização flui através da indutância de magnetização não-linear e é necessária para que haja indução de tensão no enrolamento secundário do transformador. A corrente de perdas no núcleo flui através da resistência de perdas e é responsável pelas perdas por correntes parasitas e perdas por histerese no núcleo de aço de transformadores. Embora a resistência de perdas seja assumida linear, ela é dependente da frequência e da tensão. A corrente de excitação contém elevadas harmônicas de ordem par devido à saturação do núcleo do transformador. As resistências dos enrolamentos primário e secundário R_P e R_S respectivamente e as reatâncias de dispersão X_{LP} e X_{LS} são assumidas como parâmetros lineares. Seus valores são relativamente pequenos quando comparados com os valores da resistência de perdas no núcleo e da indutância de magnetização. A derivação desses parâmetros foi desenvolvida no capítulo 3 bem como o circuito equivalente.

Se um capacitor é colocado entre a fonte de tensão e o transformador sem carga, o fenômeno da ferorressonância pode ocorrer. Nessa situação, há circulação de uma elevada corrente de excitação resultando em uma tensão induzida no secundário muito maior que o valor de sua tensão nominal. A corrente de excitação dessa forma é elevada porque ocorre ressonância entre a capacitância C e a indutância L_m não-linear.

Segundo (CHAUDHARY et al., 2000), qualquer modo de operação que resulte em uma forma de onda distorcida de forma significativa é tipicamente referida como ferorressonância, embora a palavra ressonância no seu sentido clássico é discutivelmente uma designação incorreta.

Assim, a ressonância ocorre envolvendo capacitância e indutância não apresentando uma frequência ressonante definida sendo que, mais de uma resposta é possível para o mesmo conjunto de parâmetros. Harmônicas elevadas de ordem ímpar são características das formas de onda, com a indutância de magnetização variando entre a região linear e não-linear. Inclinações abruptas ocorrem quando a indutância assume valor na região saturada, e inclinações mais suaves ocorrem quando se opera na região não saturada.

Amortecimento adicionado ao circuito atenuará a tensão e corrente ferorressonante. Certa quantidade de amortecimento está sempre presente na forma da impedância da fonte, perdas do transformador e perdas por efeito corona em sistemas de alta tensão, porém maior amortecimento é devido à aplicação de carga no secundário do transformador. Consequentemente, um transformador levemente carregado ou sem carga é propício à ferorressonância.

Este tipo de ferorressonância é similar à que ocorre em sistemas de distribuição que utilizam capacitores série, e expandiu-se para transformadores de distribuição monofásicos e transformadores para instrumentos. Também pode ocorrer em linhas de transmissão que utilizam compensação série. A ferorressonância pode levar a aquecimento do transformador, devido a picos elevados de corrente e elevado fluxo no núcleo. Elevadas temperaturas no interior do transformador podem enfraquecer a isolamento e causar falhas sob esforços elétricos. Em sistemas de extra alta tensão, a ferorressonância pode resultar em elevadas sobretensões durante os primeiros ciclos, o que pode resultar em problemas de coordenação de isolamento envolvendo frequências maiores que a frequência de operação do sistema. Por causa da não-linearidade, a solução do circuito ferorressonante deve ser encontrada usando técnicas no domínio do tempo. Tipicamente, o método de integração numérica é aplicado usando programas de simulação no domínio do tempo tal como o EMTP.

4.5.2 Comportamento magnético de transformadores trifásicos

É incorreto assumir que o núcleo do transformador trifásico é equivalente magneticamente a três transformadores monofásicos, isto é, que as três fases não possuem acoplamento magnético direto. Tal afirmação pode conduzir a erros graves, principalmente se o que está se investigando é o comportamento do transformador sob condições de desequilíbrio ou transitórias (CHAUDHARY et al., 2000).

Somente o tipo de núcleo triplex apresenta características magnéticas semelhantes a três transformadores monofásicos. Embora o núcleo tenha em comum o mesmo tanque, eles são magneticamente isolados. Todas as outras configurações de núcleo provêm fluxo concatenado entre as fases via núcleo magnético. Ao aplicar tensão em qualquer fase resultarão tensões induzidas nas outras fases (somente na fase adjacente no caso do núcleo enrolado de cinco colunas). Além disso, o grau de saturação de cada coluna do núcleo afeta o

modo pelo qual o fluxo se divide no núcleo. A relutância aparente vista por cada enrolamento muda em virtude do grau de saturação de cada coluna do núcleo do transformador. Devido a isto, a corrente de excitação varia de uma fase para outra, até mesmo sob operação balanceada.

Transformadores com núcleo do tipo envolvido requerem um mínimo de quantidade de material para sua fabricação. A principal desvantagem da utilização desse tipo de núcleo é que, em condições de operação desbalanceada resulta em fluxo de sequência zero que não pode circular pelo material do núcleo (KULKARNI; KHAPERDE, 2004). O fluxo de sequência zero é forçado então a circular através do tanque do transformador. Entretanto, o aço do tanque não é empilhado como o do núcleo o que pode provocar aquecimento dessa parte pela circulação de correntes parasitas causando danos. Por essa razão, este tipo de núcleo deve somente ser usado em situações em se garanta o equilíbrio das correntes de cargas.

O núcleo do tipo envolvente estabelece um caminho magnético para o fluxo de sequência zero, e é mais adequado para operação desbalanceada.

O núcleo do tipo de quatro colunas também provê um caminho para o fluxo de sequência zero.

O núcleo do tipo de cinco colunas provê um caminho magnético para corrente de sequência zero e possui uma estrutura mais simétrica. Este tipo de núcleo é especificado quando se deseja um perfil baixo ((KULKARNI; KHAPERDE, 2004) por questões de transporte ou por aparência visual em subestações urbanas.

A configuração do enrolamento não tem qualquer efeito sobre modelo do núcleo do transformador. Conexões dos enrolamentos em delta, estrela ou zig-zag são realizadas externamente ao modelo do núcleo equivalente. Entretanto, o comportamento do transformador é fortemente dependente da configuração do enrolamento.

4.6 Sintomas e consequências

O fenômeno da ferorrressonância descrito nas subseções acima pode levar os componentes do sistema de potência a estresse elétrico elevados. Serão descritos a seguir os principais sintomas e consequências oriundas desse fenômeno, (BUIGUES et al., 2007).

1. Sobretensões sustentadas elevadas: uma das mais perigosas conseqüências do fenômeno ferorrressonante é o nível perigoso de sobretensões que podem levar os componentes do sistema elétrico (cabos, transformadores, pára-raios) a falha repentina. O fator mais importante que auxilia na identificação do possível nível de sobretensão é a conexão do enrolamento do transformador. Magnitude de sobretensões registradas para transformadores aterrados alcançaram 2,5 pu. Para transformadores isolados foram alcançados níveis maiores de sobretensões, tais como 5 pu.
2. Problemas com qualidade de energia: As formas de onda de tensão e de corrente são caracterizadas por elevada distorção harmônica.
3. Aquecimento do transformador e elevado ruído: Uma das situações mais significativas é a temperatura anormal alcançada pelo transformador como resultado das sobrecorrentes no enrolamento primário, resultante da saturação do núcleo magnético. Outra fonte de aquecimento é a circulação de fluxo parasita pela parte externa do transformador como o tanque e outras partes metálicas. Conseqüentemente, na ausência de detecção rápida, o transformador é levado a situações perigosas, como possível falha na isolação, curto-circuito e explosão.

Para evitar ou atenuar o aparecimento desse fenômeno, as decisões devem ser baseadas em três pontos principais:

1. Evitar configurações que são propensas a esse tipo de fenômeno, não somente durante o processo de projeto, mas também durante o processo de operação normal, isto é, selecionando a combinação correta entre as conexões do transformador e o tipo de construção do núcleo.
2. Os parâmetros do sistema têm que se manter fora da zona perigosa de ferorrressonância, isto é, a capacitância deve ser minimizada pelo chaveamento mais próximo do terminal do transformador.
3. Assegurar que a energia fornecida pela fonte não é suficiente para manter o fenômeno, introduzindo perdas para reduzir seus efeitos, ou seja, realizar manobras em transformadores com alguma carga, aterrar o enrolamento primário através de resistência.

Para estudar e avaliar esse fenômeno existem três métodos principais:

1. Testes de campo e laboratório: Embora os resultados possam ser mais realísticos, eles são limitados pela quantidade de testes que podem ser realizados.

2. Uso de modelos matemáticos e técnicas analíticas: Este método é usualmente limitado a transformadores monofásicos devido a sua complexidade.
3. Uso de ferramentas digitais para simular transformadores trifásicos e o sistema elétrico envolvido: Embora com estes programas não haja limitação na quantidade de testes que podem ser realizados, a validade dos resultados depende amplamente dos modelos usados.

Capítulo 5

Modelagem de transformadores

5.1 Aspectos teóricos da representação matricial de transformadores

Os estudos de transitórios eletromagnéticos fornecem uma parte da informação necessária para um planejamento adequado e para uma operação correta do sistema de potência. Esses estudos podem ser realizados através do TNA ou de programas digitais. A representação matricial de transformadores é difundida nos programas de transitórios eletromagnéticos (EMTP) e possui as seguintes características (BRANDWAJN; DOMMEL, 1982; MARTINEZ; MORK, 2003, 2005):

1. Seus parâmetros podem ser calculados dos dados de teste de curto-circuito e de circuito aberto fornecidos pelo fabricante.
2. Eles são flexíveis, o que possibilita modelar características eletromagnéticas com diferentes tipos de aproximação levando em conta os requisitos dos estudos e dados disponíveis.
3. Não são válidos para estudos envolvendo altas frequências.

O transformador monofásico de N enrolamentos pode ser descrito pelas seguintes equações fasoriais em regime permanente (BRANDWAJN; DOMMEL, 1982):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

A matriz em (5.1) é simétrica. Seus elementos podem ser obtidos a partir do teste de excitação a vazio. Se a bobina k é energizada, e todas as outras bobinas são mantidas em circuito em aberto, então os valores medidos para I_K e $V_1, \dots, V_N$ produzem a coluna k da matriz $[Z]$:

$$Z_{ik} = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_k}, \text{ para } i \text{ variando de } 1 \text{ a } N \quad (5.2)$$

Contudo, as impedâncias de entrada de curto-circuito, as quais descrevem as características de transferências mais importantes do transformador são perdidas em tais medidas de excitação. A impedância de entrada de curto-circuito z_{ik}^{cc} entre a bobina i e a bobina k em curto-circuito é:

$$z_{ik}^{cc} = Z_{ii} - \frac{Z_{ik}Z_{ki}}{Z_{kk}} \quad (5.3)$$

Para a análise de transitórios eletromagnéticos, (5.1) é reescrita como uma equação diferencial:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ R_{N1} & R_{N2} & \cdots & R_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1N} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{N1} & L_{N2} & \cdots & L_{NN} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

A matriz $[R]$ é a parte real da matriz $[Z]$ e $[L]$ é a parte imaginária de $[Z]$ dividido por ω , em que ω é a frequência angular

A extensão de (5.1) para transformadores trifásicos é conceitualmente fácil. Cada elemento nesta equação não mais consiste de uma bobina, mas de três bobinas para as três fases ou colunas do núcleo, como é mostrado na Fig. 5.1. Isto significa que cada elemento na matriz $[Z]$ torna-se uma submatriz 3×3 .

$$[Z_{ik}] = \begin{bmatrix} Z_S & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_S & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_S \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

A Fig. 5.1 apresenta os diversos acoplamentos possíveis retratados pela formulação matricial, ou seja, acoplamento entre os enrolamentos de alta e de baixa de mesma fase, entre os enrolamentos de alta de fases distintas, entre os enrolamentos de baixa de fases distintas, entre os enrolamentos de alta e de baixa de mesma fase.

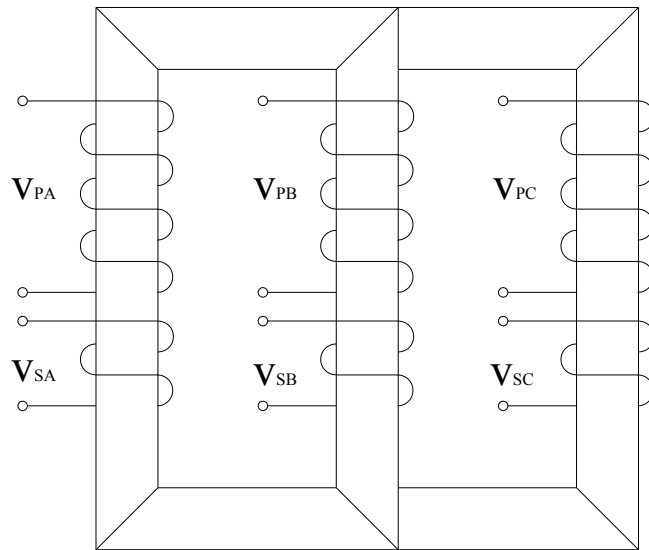


Fig. 5. 1: Núcleo trifásico de transformador com dois enrolamentos.

Os elementos Z_S e Z_M respectivamente são a impedância própria da fase ou coluna e a impedância mútua entre as três fases ou colunas. Como em qualquer componente do sistema de potência trifásico, estas impedâncias próprias e mútuas são relacionadas aos valores de sequência positiva Z_1 e zero Z_0 .

Substituindo um elemento de $[Z]$ pela submatriz 3x3 e relacionando os elementos da diagonal e fora da diagonal Z_S e Z_M , respectivamente, aos valores de sequência positiva e zero, consegue-se estender os métodos desenvolvidos para transformadores monofásicos para os transformadores trifásicos.

As tensões instantâneas entre os terminais das bobinas dos enrolamentos primários e secundários são indicadas da seguinte forma:

V_{PA} , V_{PB} , V_{PC} – tensões instantâneas entre os terminais dos enrolamentos primários

v_{SA}, v_{SB}, v_{SC} – tensões instantâneas entre os terminais dos enrolamentos secundários

Este transformador pode ser considerado como um conjunto de seis enrolamentos mutuamente acoplados em que:

i_{PA}, i_{PB}, i_{PC} – correntes instantâneas nos enrolamentos primários

i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} – correntes instantâneas nos enrolamentos secundários

A equação matricial que relaciona as tensões de ramo e correntes do transformador é dada da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} v_{PA} \\ \vdots \\ v_{SC} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} i_{PA} \\ \vdots \\ i_{SC} \end{bmatrix} + [L] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{PA} \\ \vdots \\ i_{SC} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Em que:

$[R]$ - matriz diagonal de resistência de ramo dos enrolamentos

$[L]$ - matriz indutância de ramo dos enrolamentos

A equação acima para a solução em regime permanente pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{PA} \\ \vdots \\ \dot{V}_{SC} \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} \dot{I}_{PA} \\ \vdots \\ \dot{I}_{SC} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A matriz impedância apropriada para representar transformadores trifásicos de dois enrolamentos é apresentada em (5.8).

$$[Z] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{AA}^P & Z_{AB}^P & Z_{AC}^P \\ Z_{AB}^P & Z_{BB}^P & Z_{BC}^P \\ Z_{AC}^P & Z_{BC}^P & Z_{CC}^P \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_{AA}^{PS} & Z_{AB}^{PS} & Z_{AC}^{PS} \\ Z_{AB}^{PS} & Z_{BB}^{PS} & Z_{BC}^{PS} \\ Z_{AC}^{PS} & Z_{BC}^{PS} & Z_{CC}^{PS} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Z_{AA}^{PS} & Z_{AB}^{PS} & Z_{AC}^{PS} \\ Z_{AB}^{PS} & Z_{BB}^{PS} & Z_{BC}^{PS} \\ Z_{AC}^{PS} & Z_{BC}^{PS} & Z_{CC}^{PS} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_{AA}^S & Z_{AB}^S & Z_{AC}^S \\ Z_{AB}^S & Z_{BB}^S & Z_{BC}^S \\ Z_{AC}^S & Z_{BC}^S & Z_{CC}^S \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Em que:

$Z_{AA}^P, \dots, Z_{CC}^S$ - impedâncias próprias dos enrolamentos primários e secundários

$Z_{AB}^P, Z_{AC}^P, Z_{BC}^P$ - impedâncias mútuas entre os enrolamentos primários das fases A, B e C

$Z_{AB}^S, Z_{AC}^S, Z_{BC}^S$ - impedâncias mútuas entre os enrolamentos secundários das fases A, B e C

$Z_{AA}^{PS}, Z_{AB}^{PS}, Z_{AC}^{PS}, Z_{BB}^{PS}, Z_{BC}^{PS}, Z_{CC}^{PS}$ - impedâncias mútuas entre as fases dos enrolamentos primários e as dos enrolamentos secundários

A partição da matriz $[Z]$ em submatrizes 3 x 3 conduz a equação à seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_P \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_S \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z^P] & [Z^{PS}] \\ [Z^{PS}] & [Z^S] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_P \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_S \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Em que:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{PA} & \dot{V}_{PB} & \dot{V}_{PC} \end{bmatrix}^t \quad (5.10a)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{SA} & \dot{V}_{SB} & \dot{V}_{SC} \end{bmatrix}^t \quad (5.10b)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{PA} & \dot{I}_{PB} & \dot{I}_{PC} \end{bmatrix}^t \quad (5.10c)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{SA} & \dot{\mathbf{I}}_{SB} & \dot{\mathbf{I}}_{SC} \end{bmatrix}^t \quad (5.10d)$$

Cada submatriz possui apenas dois elementos diferentes: elementos da diagonal principal e elementos fora da diagonal principal. Os testes disponíveis para a unidade de dois enrolamentos são: teste de excitação de sequência positiva e teste de excitação de sequência zero, teste de curto circuito de sequência positiva e de sequência zero.

Para o teste de excitação, a equação em valores em p.u torna-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_P^{\text{exc}} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \mathbf{X}^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_P^{\text{mag}} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Em que:

$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_P^{\text{exc}} \end{bmatrix}$ - vetor de tensões de excitação do enrolamento primário

$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_P^{\text{mag}} \end{bmatrix}$ - vetor de corrente de excitação do enrolamento primário

$j \begin{bmatrix} \mathbf{X}^P \end{bmatrix}$ - parte imaginária da matriz $\begin{bmatrix} \mathbf{Z}^P \end{bmatrix}$

Ao aplicar a transformação de componentes simétricas no vetor de tensão de excitação, o resultado são as componentes de sequência positiva e zero fornecidas pelas equações abaixo:

$$\dot{\mathbf{V}}_{P0}^{\text{exc}} = j \mathbf{X}_0^P \cdot \dot{\mathbf{I}}_P^{\text{mag}} \quad (5.12a)$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{P1}^{\text{exc}} = j \mathbf{X}_1^P \cdot \dot{\mathbf{I}}_{P1}^{\text{mag}} \quad (5.12b)$$

Em que:

X_0^p - reatância de magnetização de sequência zero

X_1^p - reatância de magnetização de sequência positiva

As reatâncias de sequência e as reatâncias em coordenadas de fase são relacionadas de acordo com (5.13) e (5.14):

$$X_S^p = \frac{1}{3}(X_0^p + 2X_1^p) \quad (5.13)$$

$$X_m^p = \frac{1}{3}(X_0^p - X_1^p) \quad (5.14)$$

Para o enrolamento secundário assume-se que as reatâncias em p.u são as mesmas.

A matriz diagonal $[R]$ é obtida dos dados fornecidos pelo fabricante. As matrizes $[Z^p]$ e $[Z^s]$ possuem como elementos pertencentes à diagonal e fora da diagonal, respectivamente:

$$Z_S^p = R^p + jX_S^p \quad Z_M^p = jX_M^p \quad (5.15a)$$

$$Z_S^s = R^s + jX_S^p \quad Z_M^s = jX_M^p \quad (5.15b)$$

Os cálculos executados a partir do ensaio de circuito aberto possibilitaram que se encontrassem os elementos das matrizes $[Z^p]$ e $[Z^s]$. Faltava encontrar os elementos da matriz $[Z^{ps}]$, os quais retratam o acoplamento entre enrolamentos primário e secundário de mesma coluna e de colunas diferentes. Para isso, utilizam-se as informações obtidas do ensaio de curto-circuito.

Para o teste de curto-circuito com as resistências dos enrolamentos sendo desprezadas, (5.9) se torna:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_P^{cc} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \mathbf{X}^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_P^{cc} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{PS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_S^{cc} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Em que:

$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_P^{cc} \end{bmatrix}$ - matriz de tensões de curto-circuito

$\begin{bmatrix} \mathbf{X}^P \end{bmatrix}$ - parte imaginária da matriz $\begin{bmatrix} \mathbf{Z}^P \end{bmatrix}$

$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_P^{cc} \end{bmatrix}$ - matriz de correntes primárias nominais

$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_S^{cc} \end{bmatrix}$ - matriz de correntes secundárias nominais

$\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{PS} \end{bmatrix}$ - parte imaginária da matriz $\begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{PS} \end{bmatrix}$

A eq. (5.9) com o vetor de tensões do enrolamento secundário nulo é mostrada a seguir:

$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{PS} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_P^{cc} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} \mathbf{X}^S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_S^{cc} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Aplicando a transformação de Fortescue em (5.16) e em (5.17), têm-se:

$$\dot{\mathbf{V}}_{P1}^{cc} = j \mathbf{X}_1^P \cdot \dot{\mathbf{I}}_{P1}^{cc} + j \mathbf{X}_1^{PS} \cdot \dot{\mathbf{I}}_{S1}^{cc} \quad (5.18a)$$

$$0 = jX_1^{PS} \cdot \dot{I}_{P1}^{cc} + jX_1^S \cdot \dot{I}_{S1}^{cc} \quad (5.18b)$$

$$\dot{V}_{P0}^{cc} = jX_0^P \cdot \dot{I}_{P0}^{cc} + jX_0^{PS} \cdot \dot{I}_{S0}^{cc} \quad (5.18c)$$

$$0 = jX_0^{PS} \cdot \dot{I}_{P0}^{cc} + jX_0^S \cdot \dot{I}_{S0}^{cc} \quad (5.18d)$$

Os elementos de (5.18a) a (5.18d) são descritos a seguir:

$\dot{V}_{P1}^{cc}$ - tensão de curto-circuito de sequência positiva

X_1^P - reatância de sequência positiva referente ao primário

$\dot{I}_{P1}^{cc}$ - corrente de sequência positiva no enrolamento primário

X_1^{PS} - reatância mútua de sequência positiva entre as bobinas do primário e do secundário

X_1^S - reatância de sequência positiva referente ao secundário

$\dot{I}_{S1}^{cc}$ - corrente de sequência positiva no secundário

$\dot{V}_{P0}^{cc}$ - tensão de curto-circuito de sequência zero

X_0^P - reatância de sequência zero do primário

$\dot{I}_{P0}^{cc}$ - corrente de sequência zero no primário

X_0^{PS} - reatância mútua de sequência zero entre bobinas do primário e do secundário

X_0^S - reatância de sequência zero referente ao secundário

$\dot{I}_{S0}^{cc}$ - corrente de sequência zero no secundário

A partir dos dados de testes de sequência positiva e zero fornecido pelo fabricante pode-se calcular as impedâncias de curto-circuito referentes às duas sequências respectivamente:

$$\frac{\dot{V}_{P1}^{cc}}{\dot{I}_{P1}^{cc}} = Z_{PS1}^{cc} \quad (5.19a)$$

$$\frac{\dot{V}_{P0}^{cc}}{\dot{I}_{P0}^{cc}} = Z_{PS0}^{cc} \quad (5.19b)$$

As equações (5.18a) a (5.18d) juntamente com as partes imaginárias das impedâncias definidas em (5.19a) e (5.19b) conduzem aos seguintes elementos:

$$jX_1^{PS} = \sqrt{(jX_1^P - jX_{PS1}^{cc})jX_1^S} \quad (5.20)$$

$$jX_0^{PS} = \sqrt{(jX_0^P - jX_{PS0}^{cc})jX_0^S} \quad (5.21)$$

Os procedimentos descritos acima para formação da matriz impedância são resumidos a seguir:

1. Inicialmente, calculam-se as partes imaginárias dos elementos da diagonal (X_{S-ii} , X_{M-ii}) da corrente de excitação, dos testes de excitação de seqüência positiva e zero para um determinado enrolamento “i”. Se as perdas por excitação são desprezadas, e se “i” é o enrolamento excitado, então segue que a reatância em p.u é o inverso da corrente de excitação em p.u. Com os valores das reatâncias de seqüência positiva e zero conhecidas, podem-se obter os valores das reatâncias próprias e mútuas.
2. Para os outros enrolamentos considera-se que os valores das reatâncias em p.u são praticamente iguais. Isto significa que não é necessário realizar os cálculos de seqüência para os demais enrolamentos, já que os valores em p.u possuem o objetivo de simplificar o trabalho.
3. Se as resistências dos enrolamentos são conhecidas, elas são adicionadas a impedância própria dos elementos da diagonal. Se elas não são conhecidas, mas se a perda de carga do teste de curto-circuito é fornecida, elas devem ser calculadas a partir das perdas de carga. Para um transformador de dois enrolamentos, pode-se assumir que $R_1 \text{ pu} = R_2 \text{ pu}$ no cálculo. O cálculo das resistências dos enrolamentos a partir das perdas de carga não é

exato porque estas perdas contém perdas parasitas, mas é provavelmente melhor que simplesmente ajustar as resistências dos enrolamentos a zero se elas não são conhecidas.

4. Se as perdas por excitação são conhecidas, elas devem ser modeladas através de resistências *shunt* que devem ser adicionadas através de um ou mais enrolamentos com objetivo de reproduzir tais perdas. Estas resistências *shunt* são ramos adicionais que não devem ser incluídos na representação matricial por impedância. De maneira precisa, as reatâncias em p.u de sequência positiva e zero não são o inverso da corrente de excitação em p.u, mas sim da parte imaginária da corrente de excitação em pu.

Os elementos da matriz $[Z]$ discutidos anteriormente devem ser calculados com elevada precisão, especialmente se a corrente de excitação é baixa. Se a corrente de excitação é totalmente desprezada, então a matriz $[Z]$ não deve ser usada. Isto porque a matriz $[Z]$ torna-se infinita para corrente de excitação zero, ou mal-condicionada para correntes de excitação muito pequenas. Além disso, todos os elementos da matriz $[Y]$ podem ser obtidos diretamente do teste padrão de curto-circuito. Nesses casos, uma representação alternativa pode ser usada na forma de matriz admitância de ramo:

$$[I] = [Y][V] \quad (5.22)$$

5.2 Modelos de transformadores do ATP

A seguir serão apresentados alguns modelos de transformadores disponíveis no ATP para estudos de transitórios eletromagnéticos.

5.2.1 *Saturable Transformer Component*

Este modelo foi originalmente desenvolvido para transformadores monofásicos de N enrolamentos. Ele usa a representação do circuito estrela da Fig. 5.2. Transformadores trifásicos do tipo núcleo envolvido de cinco colunas, do tipo núcleo envolvente de três colunas e transformadores monofásicos utilizam o mesmo modelo, embora a opção “*Reference component procedure*” seja recomendada para a modelagem dos tipos de transformadores trifásicos citados. Para transformadores trifásicos do tipo núcleo envolvido

de três colunas, um modelo totalmente diferente é necessário, levando em consideração a relutância de seqüência zero do circuito magnético (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

O ramo primário com R_1 e L_1 é tratado como um ramo R- L não acoplado entre os nós $BUS1_1$, o ponto estrela S, enquanto que cada um dos outros enrolamentos 2, ... N é tratado como um transformador de dois enrolamentos (primeiro ramo de S a $BUS2_1$, segundo ramo de $BUS1_k$ para $BUS2_k$, com $k = 2, \dots N$).

A representação por meio do circuito em estrela é dada a seguir:

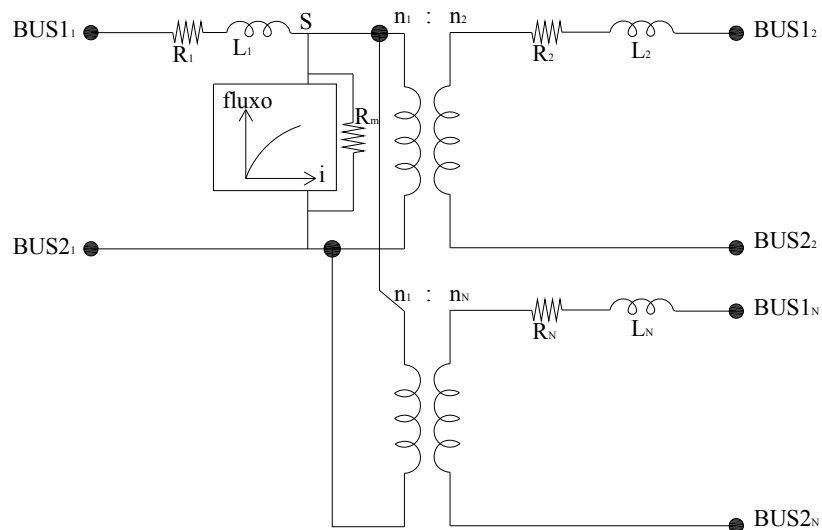


Fig. 5. 2: Representação do circuito estrela de transformadores de N- enrolamentos.

As informações de entrada consistem de valores de R, L de cada ramo estrela, razão de espiras e ramo de magnetização. Para transformadores de três enrolamentos, as impedâncias dos ramos em estrela são usualmente disponíveis nas empresas de serviço público relacionado com a área de energia elétrica dos arquivos de dados utilizados nos estudos de curto-circuito. Se estes valores estão em p.u, eles devem ser convertidos para os valores reais pelo uso da respectiva tensão nominal V_k para cada um dos ramos estrela.

Sobre a Fig. 5.2, algumas observações são feitas para identificação dos parâmetros:

1. As resistências R_1 e R_2 simulam as perdas no cobre dos enrolamentos primário e secundário.
2. L_1 e L_2 são os valores das indutâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário da unidade a ser simulada. Representam no modelo as componentes de dispersão do fluxo magnético, ou seja, aquelas porções que se concatenam apenas com as bobinas do primário e secundário respectivamente.

3. A curva fluxo de pico x corrente de pico representa a característica de saturação do núcleo do transformador. O efeito de saturação é confinado em um único reator não-linear no circuito do enrolamento 1. Como consequência, o ramo de saturação é conectado ao ponto estrela, o qual nem sempre é o melhor ponto de conexão. De maneira ideal, a indutância não-linear deve ser conectada ao ponto do circuito estrela equivalente em que a integral da tensão é igual ao fluxo do núcleo de ferro. Normalmente, isto é verdadeiro para o enrolamento que está mais próximo do núcleo de ferro. Existem três comportamentos de excitação diferentes:
 - No caso de saturação, o modelo do indutor pseudo não-linear tipo 98 é usado internamente. Para obter os dados necessários, alimenta-se o transformador com vários níveis de tensão e mede-se a corrente correspondente para gerar a característica (V_{rms} , I_{rms}). Após isto, utiliza-se a rotina suporte “SATURA” para criar a característica necessária fluxo de pico versus corrente de pico;
 - No caso linear, somente um valor de pico (fluxo, corrente) deve ser colocado para o dado de entrada da impedância de magnetização. Este valor pode ser obtido do teste de excitação;
 - No caso em que nenhuma característica é especificada, assume-se que a reatância de magnetização não existe, ou seja, a corrente de magnetização pode ser desprezada;

As perdas por excitação (núcleo de ferro) são representadas por uma resistência R_m a qual é colocada em paralelo com o ramo de saturação;

Este modelo de transformador apresenta algumas limitações, às quais os usuários devem estar atentos:

1. Ele não pode ser usado para mais do que três enrolamentos, pois o circuito estrela não é válido para $N > 3$. Ocorre que transformadores com mais de três enrolamentos são raramente encontrados.
2. A indutância de magnetização linear ou não-linear, com R_m em paralelo, é conectada ao ponto estrela, o qual nem sempre é o melhor ponto de conexão, conforme já mencionado.
3. Instabilidade numérica tem sido ocasionalmente observada para o caso de três enrolamentos. A fonte de instabilidade nunca foi claramente identificada, ainda que acredita-se que é causada pela acumulação de erros de arredondamento.
4. A extensão deste modelo para representação de transformadores trifásicos é feita através da adição do parâmetro relutância de sequência zero. Entretanto, seu uso para unidades

trifásicas é limitado. Unidades trifásicas são melhores modeladas com matrizes indutância e indutância inversa obtidas da rotina suporte BCTRAN.

Os parâmetros que fazem parte do modelo da Fig. 5.2 podem ser calculados a partir do ensaio de curto-circuito o qual fornece como informações de saída a potência ativa que representa as perdas nos enrolamentos e a impedância de curto-circuito.

A resistência que leva em consideração as perdas por excitação pode ser calculada de acordo com (5.23):

$$R_c = \frac{V_n^2}{P_{ex}} \quad (5.23)$$

Em que V_n é a tensão nominal do enrolamento sob ensaio e P_{ex} é potência ativa registrada no ensaio de circuito aberto.

Os valores da resistência equivalente e da reatância de curto-circuito podem ser calculados de acordo com (5.24) e (5.25), respectivamente:

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_n^2} \quad (5.24)$$

$$X_{cc} = \frac{1}{I_n} \sqrt{(V_{cc}^2 - \frac{P_{cc}^2}{I_n^2})} \quad (5.25)$$

onde V_{cc} é a tensão de curto-circuito que equivale a um percentual da tensão nominal do enrolamento correspondente, P_{cc} é a potência ativa registrada no ensaio de curto-circuito e I_n é a corrente nominal do enrolamento sob ensaio.

Para encontrar a resistência e a reatância de dispersão de cada enrolamento, deve-se aplicar as fórmulas fornecidas por (5.26) e (5.27), respectivamente:

$$R_k = \frac{R_{eq}}{N} \cdot \frac{V_k^2}{V_{AT}^2} \quad (5.26)$$

$$X_k = \frac{X_{cc}}{N} \cdot \frac{V_k^2}{V_{AT}^2} \quad (5.27)$$

onde k representa um determinado enrolamento e N expressa o número de enrolamentos, V_k expressa a tensão do enrolamento correspondente e V_{AT} expressa o valor da tensão nominal do enrolamento de alta tensão.

Frente ao exposto sobre o modelo, cabem algumas observações quando transformadores trifásicos são representados pelo mesmo:

1. Para transformadores trifásicos com núcleo do tipo envolvente ou núcleo do tipo envolvido de cinco colunas, um caminho de retorno através da estrutura de ferro é fornecido para o fluxo de sequência zero. Consequentemente é aceitável assumir que a indução magnética nas três fases é independente e que os parâmetros de sequência zero são iguais aos parâmetros de sequência positiva. Isto implica que somente uma curva de saturação para uma coluna do núcleo é necessária. Dessa maneira, esses tipos de transformadores são modelados como três unidades monofásicas idênticas.
2. Para o transformador trifásico de três colunas, a relutância homopolar é elevada e o fluxo de sequência zero é forçado a retornar através do tanque e fora dos enrolamentos. Por causa do entreferro, a curva de magnetização de sequência zero é quase linear o que difere da curva de magnetização de sequência positiva que é altamente não-linear. É razoável aproximar a curva de saturação de sequência zero por uma indutância de magnetização L_o . Por outro lado, não é recomendado o uso desse modelo complicado desde que não é possível representar o acoplamento magnético entre fases. Este tipo de transformador trifásico pode ser melhor modelado através da rotina suporte BCTRAN.

5.2.2 Rotina Suporte BCTRAN

O BCTRAN é uma rotina suporte utilizada para obtenção das matrizes $[A] - [R]$ ou $[R] - [\omega L]$ em que a matriz $[A]$ é a inversa da matriz indutância para transformadores polifásicos, de dois ou mais enrolamentos, com núcleo do tipo envolvente ou envolvido a partir dos dados de ambos os testes de excitação e de curto-circuito (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). As matrizes representam o comportamento linear do transformador com

razoável precisão quando submetidos a sinais desde a frequência fundamental até aproximadamente 2 kHz (LEUVEN EMTP CENTER, 1987) . Para evitar problemas de singularidade, existe a opção da matriz inversa da matriz indutância $[A] = [L]^{-1}$. A saturação e histerese podem ser modeladas externamente com ramos adicionais.

As perdas por excitação podem ser levadas em consideração neste modelo, embora estas perdas possam ser desprezadas para transformadores monofásicos e transformadores trifásicos de baixa relutância. No que se refere ao teste de excitação de sequência zero para transformadores trifásicos, algumas considerações são feitas a seguir:

1. Para transformadores trifásicos tendo um ou mais enrolamentos conectados em delta, o projeto do núcleo (se envolvido ou envolvente) é de menor importância. Ou seja, em tais casos o teste de excitação se torna um teste de curto-circuito, porque o delta fechado atua como um curto-circuito para as correntes de sequência zero. Se o enrolamento delta permanece fechado, nem o valor da corrente de sequência zero nem o valor das perdas são críticos.
2. Para transformadores trifásicos tendo somente enrolamentos conectados em estrela, o projeto do núcleo é importante. A distinção deve ser feita entre transformadores de alta relutância e baixa relutância. Para o caso de transformadores de baixa relutância, como por exemplo, bancos de transformadores monofásicos, transformadores trifásicos com núcleo do tipo envolvente e transformadores trifásicos de quatro ou cinco colunas, o fluxo homopolar encontra um caminho de baixa relutância característico do material do núcleo. Nesse caso, a corrente de excitação de sequência zero será pequena e as perdas resultantes podem ser desprezadas. Para transformadores de alta relutância, como por exemplo o transformador trifásico com núcleo de três colunas, o fluxo homopolar percorrerá o caminho ar e tanque (caminho de elevada relutância). Devido à grande importância da corrente de sequência zero, as perdas por excitação resultantes não podem ser desprezadas.

O comportamento não-linear não pode ser incluído no modelo propriamente dito. Tal comportamento (saturação ou histerese) pode ser levado em consideração, entretanto, pela adição de elementos do tipo 93, 96 ou 98 conectados em terminais apropriados do transformador, isto é, aqueles enrolamentos que são mais próximos do núcleo. Desde que o modelo usa a formulação admitância internamente, a corrente de magnetização pode ter qualquer valor (até mesmo zero). A opção de saída $[A] - [R]$ deve ser usada quando a

corrente de magnetização é muito pequena, o que contorna o problema da singularidade da matriz $[\omega L]$.

A interface gráfica do modelo BCTRAN que serve para o usuário fornecer os dados de entrada necessários para o cálculo das matrizes é mostrada na Fig. 5.3 (PRIKLER; HOIDALEN, 2009).

The BCTRAN dialog box is divided into several sections:

- Structure:**
 - Number of phases: 3
 - Number of windings: 3
 - Type of core: Shell core
 - Test frequency [Hz]: 50
 - ☒ AR Output ☐ Auto-add nonlinearities
- Ratings:**

	HV	LV	TV
L-L voltage [kV]	400	132	18
Power [MVA]	250	250	75
Connections	A	A	D
Phase shift [deg]		0	330
- Factory tests:**
 - Open circuit | Short circuit
 - Performed at: TV Connect at: TV ☐ Zero sequence data available
 - positive sequence**

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
100	0.2	140
 - Positive core magnetization:
 - ☐ Linear internal
 - ☒ External Lm
 - ☐ External Lm || Rm
 - View/Copy:
 - ☐ Rm
 - ☒ Lm-rms
 - ☐ Lm-flux
- Group No:** 0 **Label:** **Factory test data** ☐ Hide
- Comment:**
- Buttons:** OK, Cancel, Import, Save As, Run ATP, View +, Copy +, Help

Fig. 5. 3: Caixa de diálogo do BCTRAN.

5.2.3 Hybrid Transformer Model

Este é um modelo de transformador considerado topologicamente correto e que é utilizado na simulação de transitórios de baixa e média frequência (MORK, et al., 2007). Ele é baseado no princípio da dualidade descrevendo através de matrizes os efeitos capacitivos e de dispersão. Transformadores trifásicos de dois ou três enrolamentos, autotransformadores e acoplamento em estrela ou delta são representados por este modelo. Além da inclusão da

matriz indutância inversa para a representação da dispersão como abordado anteriormente, este modelo é topologicamente correto porque inclui perdas e saturação individuais para jugos e colunas. Até o momento, somente transformadores de três e cinco colunas podem ser representados, incluindo também projeto de núcleo do tipo envolvente (“*Shell*”). Pode-se também representar a resistência do enrolamento em função da frequência.

Diferentemente dos outros modelos de transformadores, existem três fontes possíveis de dados: projeto, no qual se especifica a geometria e os parâmetros do material do núcleo e dos enrolamentos; relatório de teste, este similar ao BCTRAN exceto para o modelo do núcleo; e típicos, os quais são baseados na tensão e potência nominais.

O componente XFMR possui os valores de variáveis previamente ajustados no arquivo `xfmr.sup` armazenado no `ATPDraw.scl`. Esse modelo apresenta um nó trifásico para cada enrolamento e um nó monofásico para o neutro. A notação para o enrolamento primário, secundário, terciário e núcleo é chamada de PSTC. As identificações e as posições dos nós são especificadas no arquivo suporte do componente `xfmr.sup`. Este arquivo suporte contém dados sobre vinte e um parâmetros os quais servem como valores iniciais de informações do transformador, como relatório de teste para o caso de transformadores de dois enrolamentos, área e comprimento relativos de colunas e de jugos. A Fig. 5.4 apresenta a tela principal de entradas de dados do modelo híbrido.

são incluídas para cada fase. Os enrolamentos são separados por material isolante (óleo e papel) formando efetivamente uma placa paralela ou capacitância coaxial C_{H-L} que é conectada da parte interna do enrolamento de baixa para a parte externa do enrolamento de alta.

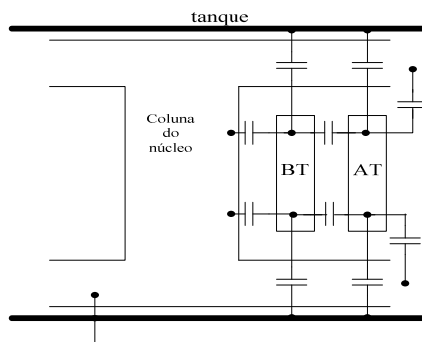


Fig. 5. 5: Capacitâncias entre núcleo, enrolamentos e tanque.

Existem outras capacitâncias entre os enrolamentos de alta e de baixa tensão e o tanque do transformador respectivamente, C_{H-T} e C_{L-T} ; ambas as capacitâncias incluem os efeitos das buchas. Não existe a inclusão da capacitância entre o tanque e o núcleo desde que ambos são conectados à terra. Também existem acoplamentos capacitivos possíveis entre os enrolamentos de alta tensão das fases A e B e entre as fases B e C. A capacitância entre a fase A e C é desprezível devido à grande distância entre os dois e à presença do enrolamento da fase B.

Os fabricantes somente fornecem os valores de capacitâncias no caso do cliente exigir esses tipos de informações. Neste caso, têm dois tipos básicos de medidas: capacitância entre enrolamentos e capacitância entre cada enrolamento e a terra que incluem os efeitos capacitivos entre todas as superfícies metálicas aterradas (tanque, núcleo) e cada enrolamento. Se as informações de projeto estão disponíveis, o cálculo dos vários tipos de capacitâncias é possível. Em transformadores do tipo com núcleo envolvido, com configuração cilíndrica para os enrolamentos, as capacitâncias de enrolamento para enrolamento e de enrolamento para o núcleo, podem ser calculadas assumindo que os enrolamentos podem ser tratados como capacitores cilíndricos uma vez que eles estão concêntricamente em torno da coluna do núcleo. O cálculo dessas capacitâncias é dado por (5.28):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot h}{\ln\left(\frac{d_{H-i}}{d_{L-o}}\right)} \quad (5.28)$$

onde ϵ_0 é a permissividade do espaço livre, ϵ_r é a permissividade relativa do dielétrico, h é a altura do enrolamento, e d_{H-i} e d_{L-o} são os diâmetros interno e externo do enrolamento de alta e baixa, respectivamente. Se a capacitância é entre o enrolamento e o núcleo, então d_{L-o} é diâmetro interno do enrolamento de baixa tensão e d_{H-i} é o diâmetro externo da coluna do núcleo. A capacitância entre os outros enrolamentos e o núcleo é ignorada. A capacitância entre enrolamentos externos de colunas adjacentes é dada por (5.29):

$$C = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot h}{\ln\left(\frac{d_{f-f}}{d_{H-o}} + \sqrt{\left(\frac{d_{f-f}}{d_{H-o}}\right)^2 - 1}\right)} \quad (5.29)$$

onde d_{f-f} é a distância entre fases e d_{H-o} é o diâmetro externo do enrolamento externo.

b) Indutância de dispersão

A indutância de dispersão é devida ao fluxo que concatena um enrolamento, mas não o outro. O fluxo disperso tipicamente passa através do ar ou outros materiais não-magnéticos e pode também encontrar caminhos de baixa relutância através do tanque do transformador e outros objetos metálicos.

A reatância de curto-circuito entre os enrolamentos do transformador, que reflete a característica de dispersão do transformador, pode ser obtida do relatório de teste do fabricante e a partir dos dados de projeto do transformador. As Figs 5.6 e 5.7 mostram um desenho esquemático da configuração cilíndrica de enrolamentos.

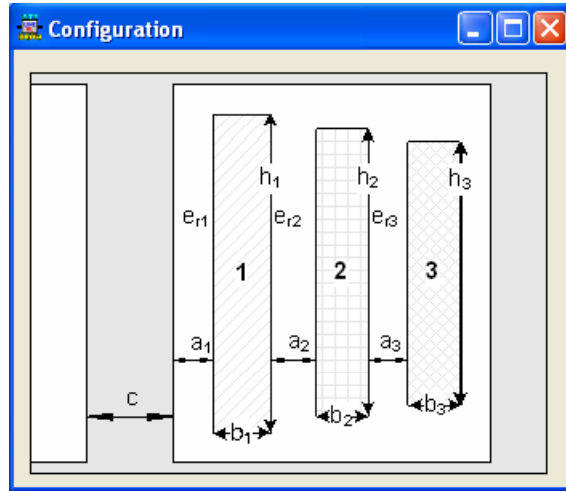


Fig. 5. 6: Tela do híbrido para configuração cilíndrica.

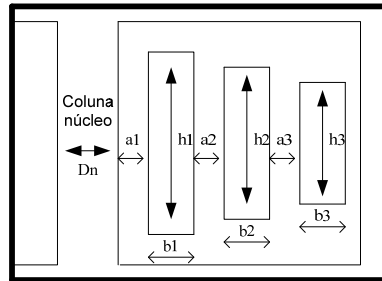


Fig. 5. 7: Configuração cilíndrica dos enrolamentos.

As reatâncias de curto-circuito são calculadas através das seguintes equações:

$$X_{HM} = \frac{\omega \mu_0 N^2 L_{mt}}{h} \cdot \left(\frac{L_{mt,H} \cdot b_H}{3} + \frac{L_{mt,M} \cdot b_M}{3} + L_{mt,3} \cdot a_3 \right) \quad (5.30)$$

$$X_{ML} = \frac{\omega \mu_0 N^2 L_{mt}}{h} \cdot \left(\frac{L_{mt,M} \cdot b_M}{3} + \frac{L_{mt,L} \cdot b_L}{3} + L_{mt,2} \cdot a_2 \right) \quad (5.31)$$

$$X_{HL} = \frac{\omega \mu_0 N^2 L_{mt}}{h} \cdot \left(\frac{L_{mt,H} \cdot b_H}{3} + \frac{L_{mt,M} \cdot b_M}{3} + L_{mt,3} \cdot a_3 + L_{mt,2} \cdot a_2 + L_{mt,1} \cdot a_1 \right) \quad (5.32)$$

Os índices H, M e L referem-se respectivamente aos enrolamentos externo, central e interno, h é a altura média de dois enrolamentos envolvidos, $L_{mt} = 2\pi r_{mt}$ em que r_{mt} é a

distância do centro da coluna do núcleo e a média entre o raio externo e interno do enrolamento, **a** corresponde ao canal ou espessura da isolação entre enrolamentos, **b** corresponde à espessura do enrolamento, e N equivale ao número de espiras do enrolamento de alta, média ou de baixa dependendo de qual lado do transformador a dispersão é referida. Esta formulação assume que a distribuição de fluxo é linear através da espessura do enrolamento. Para cada par de enrolamentos, a força magnetomotriz aumenta linearmente através do enrolamento interno, permanece constante através do canal e então decresce linearmente com o raio através do enrolamento externo.

Para o enrolamento do tipo panqueca, conforme Fig. 5.8 as reatâncias podem ser calculadas por (5.33) e (5.34):

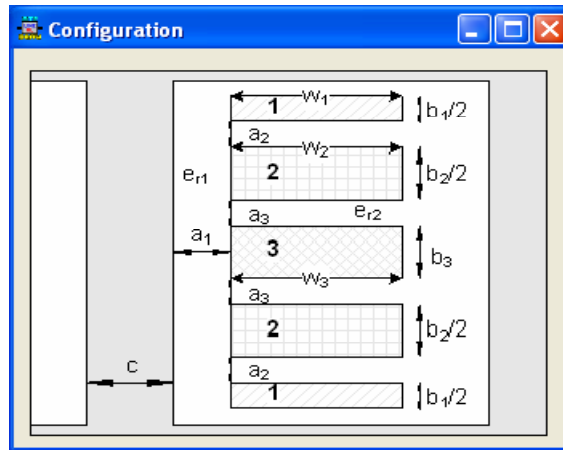


Fig. 5. 8: Enrolamento do tipo panqueca.

$$X_{HM} = \frac{\omega \mu_0 N^2 L_{mt}}{2nw} \cdot \left(\frac{b_M}{6} + \frac{b_L}{6} + a_2 \right) \quad (5.33)$$

$$X_{HL} = \frac{\omega \mu_0 N^2 L_{mt}}{2nw} \cdot \left(\frac{b_H}{6} + \frac{b_L}{6} + \frac{b_M}{2} + a_2 + a_3 \right) \quad (5.34)$$

c) Representação do núcleo

O modelo do núcleo é conectado em um enrolamento artificial na superfície do núcleo. O nó trifásico é denominado de C e é também disponível externamente para medida de tensão e fluxo concatenado. Somente núcleos do tipo empilhado com três ou cinco colunas são

aceitos até esse momento. Basicamente as partes indutiva e resistiva são tratadas independentemente. As perdas do núcleo são assumidas como sendo lineares e as indutâncias não-lineares são modeladas pela equação de Frolich. Cada parte do núcleo é modelada com sua própria resistência de perdas e indutância não-linear, usando a informação sobre as respectivas áreas e comprimento. A formulação do núcleo de três colunas e de cinco colunas é apresentada nas Fig. 5.9 e Fig. 5.10 respectivamente.

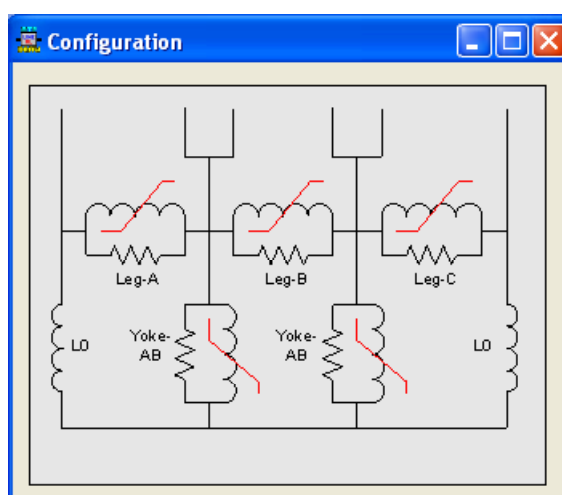


Fig. 5. 9: Esquema do núcleo de três colunas.

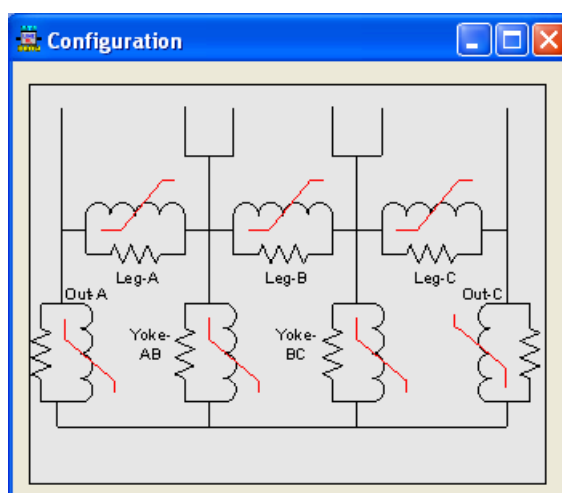


Fig. 5. 10: Esquema do núcleo de cinco colunas.

Considera-se que o material magnético é caracterizado por quatro parâmetros a , b , c e e . Uma base de dados de aço de alguns tipos de aço típicos foi desenvolvida, como por exemplo M2, M4 e M6. A lista é baseada no ajuste dos pontos fornecidos pelo próprio fabricante.

Do teste de excitação, pode-se conhecer a corrente de excitação em percentual sobre 100% da tensão nominal e as perdas do núcleo em watts em 100% da tensão. Em alguns casos, é também possível ter este dado em níveis adicionais da tensão nominal com 90% e 110% sendo o mais comum. Uma representação linear do núcleo pode ser obtida diretamente se somente 100% da tensão de excitação é disponível. É desejável que se tenha vários níveis de tensão no relatório de teste para possibilitar a construção da curva de magnetização.

Se as informações sobre o projeto estão disponíveis, o núcleo equivalente pode ser determinado baseado no cálculo da curva de magnetização $\lambda - i$ de cada coluna do núcleo. A estimação da curva de magnetização é feita diretamente, desde que o tipo de material seja conhecido, como também as dimensões do núcleo e o número de espiras dos enrolamentos. O tipo de material magnético define a curva $B - H$, e pode ser aproximada pela equação de Frolich.

$$B = \frac{H}{a + b \cdot H} \quad (5.35)$$

A modelagem da característica indutiva consiste em obter dois valores a' e b' em (5.35) para a característica $\lambda - i$ por uma técnica de otimização. O fluxo concatenado e a corrente elétrica podem ser encontrados através de (5.36) e (5.37), respectivamente:

$$\lambda = B \cdot A \cdot N \quad (5.36)$$

$$i = \frac{H \cdot l}{N} \quad (5.37)$$

onde N é o número de espiras do enrolamento interno, A é a área do núcleo e l é o comprimento. Como resultado disto, a relação de fluxo concatenado - corrente é definida como:

$$i = l_r \cdot \frac{a' \cdot \lambda / A_r}{1 - b' \cdot \lambda / A_r} \quad (5.38)$$

onde l_r e A_r são o comprimento relativo e área relativa relacionada com a coluna do núcleo. As constantes a serem determinadas no processo de otimização são fornecidas pelas fórmulas abaixo baseadas no comprimento absoluto e na área da respectiva coluna do núcleo.

$$a' = a \cdot \frac{l_L}{N^2 \cdot A_L} \quad (5.39)$$

$$b' = b \cdot \frac{1}{N \cdot A_L} \quad (5.40)$$

O resultado final consiste nas curvas de $\lambda - i$ para as colunas principais (λ_1), colunas externas (λ_o) e para os jugos (λ_y). Abaixo, as relações para cada uma respectivamente:

$$\lambda_1 = \frac{i}{a' + b' \cdot i} \quad (5.41)$$

$$\lambda_o = \frac{i \cdot A_{ro}}{a' \cdot l_{ro} + b' \cdot i} \quad (5.42)$$

$$\lambda_y = \frac{i \cdot A_{ry}}{a' \cdot l_{ry} + b' \cdot i} \quad (5.43)$$

As curvas podem ser estimadas pelo ajuste da curva B – H de acordo com a área e comprimento reais das partes que constituem o núcleo. Se as dimensões das colunas e jugos são desconhecidas, as razões normalizadas das dimensões do núcleo podem ser usadas. Se as razões das dimensões são desconhecidas, elas podem ser assumidas. Nestes casos, razões típicas podem ser usadas sem maiores erros, desde que as razões das dimensões variem dentro de uma faixa pequena de acordo com a prática de projeto padrão.

d) Modelagem das perdas do núcleo

A equação de perda depende se o núcleo é de três ou de cinco colunas. Para o núcleo do tipo de três colunas a equação de perdas é dada pela seguinte fórmula:

$$P = \frac{3 \cdot V^2}{R_l} + \frac{2 \cdot V^2}{R_y} \quad (5.44)$$

Para o núcleo do tipo de cinco colunas, a perda pode ser calculada através da fórmula abaixo:

$$P = \frac{3 \cdot V^2}{R_l} + \frac{3 \cdot V^2 \cdot R_o}{2 \cdot (R_o + R_y)^2} + \frac{V^2}{2 \cdot R_y \cdot (R_o + R_y)^2} \cdot (4 \cdot R_y^2 + 2 \cdot R_o \cdot R_y + R_o^2) \quad (5.45)$$

Considerando que perda do núcleo é proporcional ao seu volume, as resistências das colunas externas R_o e dos jugos R_y são proporcionais à resistência da coluna do núcleo R_l . Elas podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$R_o = \frac{R_l}{(A_{rl} \cdot l_{rl})} \quad (5.46)$$

$$R_y = \frac{R_l}{(A_{ry} \cdot l_{ry})} \quad (5.47)$$

Se a opção para modelagem do núcleo for definida a partir de valores típicos, a estimação da corrente de magnetização (I_m) e das perdas serão definidas conforme a sequência de cálculo.

$$I_m = 0,73 \cdot \left(\frac{BIL}{350} \right)^{0,2933} \cdot \left(\frac{s}{20} \right)^{-0,2154} \quad (5.48)$$

A eq. (5.48) deve ser utilizada quando o nível de isolamento básico for conhecido. Caso esse nível não seja conhecido, a eq. (4.49) seguinte deve ser utilizada.

$$I_m = 0,73 \cdot \left(\frac{u}{150} \right)^{0,2283} \cdot \left(\frac{s}{20} \right)^{-0,2134} \quad (5.49)$$

onde BIL (*basic insulation level*) deve ser fornecido em kV, u é a tensão nominal em kV e s é a potência nominal em MVA. Para esse tipo de modelagem deve-se especificar um valor máximo de densidade de campo (1,5 – 1,7 T) e um valor máximo de densidade de perdas no núcleo. Então, as seguintes relações são assumidas:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{\text{rms}}}{\omega} = B_{\max} \cdot A \cdot N \quad (5.50)$$

$$H_{\max} = \frac{a \cdot B_{\max}}{1 - b \cdot B_{\max}} = \sqrt{2} \cdot i_{\text{rms}} \cdot \frac{N}{l} \quad (5.51)$$

Isto fornece os parâmetros da característica fluxo concatenado versus corrente:

$$a' = a \times \frac{l}{A \times N^2} \approx \omega \times (1 - b \times B_{\max}) \times \frac{I_{\text{rms}}}{V_{\text{rms}}} \quad (5.52)$$

$$b' = b \cdot \frac{l}{A \cdot N} \approx b \cdot \frac{\omega \cdot B_{\max}}{\sqrt{2} \cdot V_{\text{rms}}} \quad (5.53)$$

A perda no núcleo é estimada a partir da seguinte fórmula:

$$P_{\text{loss}} = p \cdot \rho \cdot A \cdot l = p \cdot \rho \cdot \frac{(1 - b \cdot B_{\max}) \cdot 2 \cdot V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}}}{\omega \cdot a \cdot B_{\max}^2} \quad (5.54)$$

onde p é a perda específica em watts/Kg e ρ é a densidade do material em Kg/m³.

Se a opção para o cálculo dos parâmetros do núcleo for a partir dos relatórios de teste do fabricante, deve ser especificada a tensão de excitação em percentual, a corrente em percentual e as perdas do núcleo em kW. A perda é utilizada diretamente para se obter a resistência do núcleo. A resistência do núcleo é assumida ser linear e a perda do núcleo para 100% da tensão de excitação é utilizada.

A corrente de magnetização indutiva para cada ponto é calculada conforme a fórmula a seguir:

$$I_{rms} = \sqrt{I[\%]^2 - \left(\frac{P[KW]}{10 \cdot S[MVA]} \right)^2} [\%] \quad (5.55)$$

e) Resistência da bobina dependente da frequência

A resistência da bobina varia dependendo da frequência da corrente que flui pelo condutor, devido principalmente ao efeito pelicular e de proximidade. O efeito pelicular é causado pela distribuição não uniforme do campo magnético devido a correntes que fluem no interior do condutor. À medida que a frequência da corrente aumenta uma quantidade maior flui próxima da superfície do condutor, dessa maneira aumentando a sua resistência efetiva. O efeito da proximidade é devido ao campo magnético externo produzido pela corrente que flui pelos condutores adjacentes. No transformador, devido à necessidade de se ter enrolamentos com várias camadas, conduz-se a uma variação na resistência significativa causada por este efeito.

Dados disponíveis do relatório de teste do fabricante incluem as perdas por curto-circuito na frequência do sistema elétrico e a resistência cc, as quais podem ser usadas para se obter os parâmetros de resistências das bobinas. Outra opção útil, porém incomum nos relatórios de testes de fabricantes é a medição de valores de resistência para uma ampla faixa de frequências.

Nos casos em que a informação de projeto esteja disponível a resistência cc do enrolamento pode ser calculada em função do tipo de material utilizado e do arranjo da bobina.

Capítulo 6

Análise e simulação

6.1 Introdução

Este capítulo possui o objetivo de investigar o fenômeno da ferorrressonância em alguns tipos de transformadores trifásicos de três colunas com ligação delta-estrela muito comuns nas instalações comerciais e nas redes de distribuição de concessionárias de energia elétrica. Pretende-se também apresentar os modelos de transformadores do ATP, avaliando-os no que concerne às características de cada um deles. Inicialmente, será demonstrada a validade de cada modelo com relação aos testes básicos, de curto-circuito e a vazio comparando os valores obtidos com aqueles apresentados pelo fabricante. Também será realizada uma comparação das respostas obtidas em função da utilização de um determinado modelo.

6.2 Cálculo dos parâmetros dos transformadores

Esta subseção possui como objetivo principal apresentar os resultados dos testes básicos realizados em transformadores, tais como impedância percentual, perdas a vazio e por curto circuito, curva de saturação e partir deles encontrar os valores dos parâmetros dos transformadores de 75 e 500 kVA necessários à implementação dos modelos utilizados na simulação do fenômeno da ferorrressonância.

6.2.1 Transformador de 75 kVA

Para encontrar os parâmetros desse transformador, as principais informações e os resultados dos testes a vazio e de curto-circuito são mostrados a seguir:

a) Transformador de distribuição

1. Tensão nominal: 13,8 kV – 220 /127 V
2. Tipo de ligação: delta – estrela
3. Núcleo: trifásico do tipo envolvido de três colunas
4. Perdas por excitação: 285 W
5. Perdas por curto-circuito: 1170 W
6. Corrente de excitação: 1,6%
7. Impedância de curto-circuito: 3,5%
8. Curva de saturação
9. Dados geométricos

Para o transformador de 75 kVA foi possível obter os dados de projeto como altura de enrolamentos, número de espiras, diâmetro e área do núcleo, seção transversal dos condutores que constituem os enrolamentos. Eles são mostrados a seguir:

Dados do núcleo

1. Altura da janela: 280 mm
2. Largura da janela: 115 mm
3. Seção transversal: 105,22 cm²
4. Espessura da chapa do núcleo: (0,27 mm)
5. Diâmetro: 126 mm
6. Comprimento da coluna: 0,52 m
7. Comprimento do jugo: 0,6 m

Enrolamento de baixa tensão

1. Diâmetro interno: 131 mm
2. Diâmetro externo: 154 mm
3. Condutor da espira (cobre): dois axiais e um radial 2x (7,5 mm x 5 mm)
4. Altura do enrolamento: 254 mm
5. Número de espiras: 30

Enrolamento de alta tensão

1. Diâmetro interno: 176 mm
2. Diâmetro externo: 218 mm
3. Condutor da espira (cobre): 0,65 mm²
4. Altura do enrolamento: 238 mm
5. Número de espiras: 3259

A curva de saturação fornecida pelo fabricante possui os valores de tensão e os valores de corrente de excitação correspondente. Entretanto, quando da simulação de transitórios a parcela de perdas dessa corrente deve ser retirada. A Fig. 6.1 mostra a curva de saturação obtida.

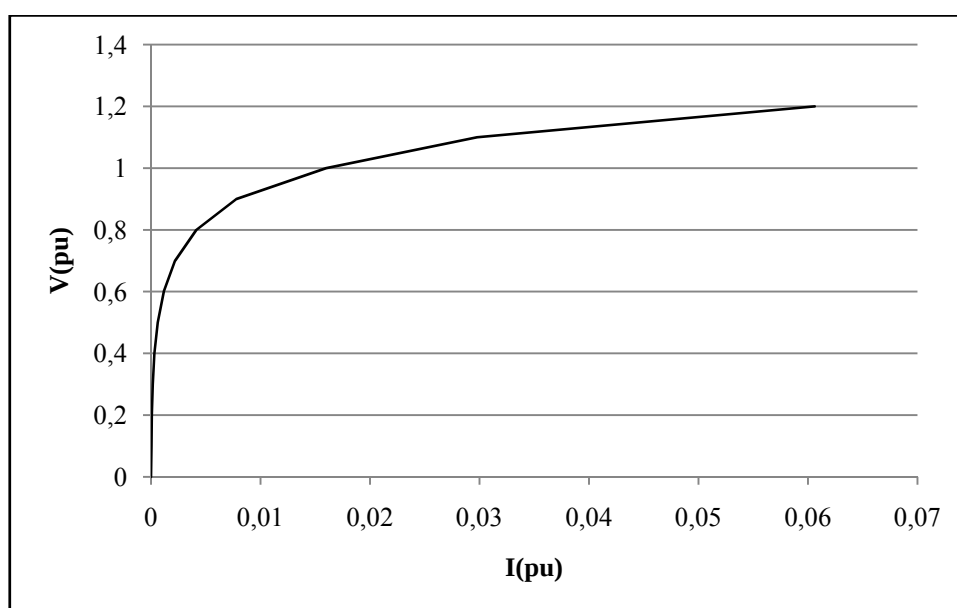


Fig. 6. 1: Curva de saturação do transformador de 75 kVA 13800 – 220/120 V.

A Tabela 6.1 mostra os pontos da curva de saturação do transformador de distribuição mencionado acima fornecido pelo fabricante.

Tabela 6. 1: Pontos utilizados na construção da curva de saturação – 75 kVA

Tensão em p.u	Corrente de excitação em $I_{exc}(\%)$	Perdas $P_o(W)$
0,701	0,22	85
0,81	0,448	131
0,907	0,843	193
1,00	1,6	285
1,10	2,979	420
1,209	6,061	650

A Tabela 6.2 mostra os pontos da curva de saturação do transformador de distribuição após a retirada da componente de perdas do transformador.

Tabela 6. 2: Pontos da curva de saturação em pu – 75 kVA

Tensão p.u	Corrente de magnetização em p.u
0,701	0,00149
0,810	0,00392
0,907	0,00793
1,00	0,01539
1,1	0,02935
1,209	0,06018

A Tabela 6.3 mostra os valores da tensão e da corrente de magnetização correspondente.

Tabela 6. 3: Pontos da curva de saturação referente ao lado de alta tensão – 75 kVA

Tensão de fase em V	Corrente de magnetização de fase primária em A
9673,8	0,002702
11178	0,007113
12516,6	0,014380
13800	0,027881
15180	0,053173
16684,2	0,109030

A modelagem do transformador trifásico através do modelo SATURABLE utiliza como circuito principal a representação em estrela por fase. Os parâmetros de entrada desse modelo são: a resistência e a indutância de dispersão do enrolamento primário, a resistência e a indutância de dispersão do enrolamento secundário, a resistência e a reatância de magnetização. Entretanto, os ensaios convencionais realizados pelos fabricantes de

transformadores não fornecem diretamente os parâmetros listados acima. Existem aproximações com boa precisão que reproduzem de forma correta o comportamento do equipamento.

Para a construção da curva de saturação, ou seja, curva tensão x corrente do transformador, alguns pontos fornecidos pelo fabricante foram selecionados, conforme Tabela 6.1, de maneira que a componente de perdas da corrente de excitação foi inicialmente retirada, ficando apenas aquela parcela responsável pela produção do fluxo magnético.

A partir da Tabela 6.1, devem-se transformar os pontos referentes à tensão em pu e a corrente de excitação em percentual para seus equivalentes em volt e em ampere. Os valores bases escolhidos são: tensão do lado de alta do transformador (lado primário), potência aparente nominal. Para o cálculo da tensão do lado de alta em volts do transformador utiliza-se a seguinte fórmula:

$$V = V_{pu} \cdot V_{base} \quad (6.1)$$

As correntes de base de linha e de fase do lado de alta tensão são calculadas pelas fórmulas a seguir:

$$I_{basel} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot V_{atl}} = \frac{75000}{\sqrt{3} \cdot 13800} = 3,14 \text{ A} \quad (6.2)$$

$$I_{basef} = \frac{I_{basel}}{\sqrt{3}} = \frac{3,14}{\sqrt{3}} = 1,82 \text{ A} \quad (6.3)$$

As fórmulas utilizadas para o cálculo das correntes de excitação de linha e de fase:

$$I_{excl} = I_{pu} \cdot I_{basel} \quad (6.4)$$

$$I_{excf} = \frac{I_{excl}}{\sqrt{3}} \quad (6.5)$$

A corrente de magnetização por fase do transformador para cada valor de tensão e potência correspondentes é calculada da seguinte forma:

$$I_{\text{magf}} = \sqrt{I_{\text{excf}}^2 - \left(\frac{P_o}{3 \cdot V_f} \right)^2} \quad (6.6)$$

Após os procedimentos descritos para o cálculo da corrente de magnetização por fase do transformador ainda é necessário utilizar uma rotina do ATP chamada de “*saturation*”, que transforma os pontos RMS (V- I) de tensão e de corrente na característica ($\Psi - i$) fluxo de pico x corrente de pico utilizada no modelo do indutor pseudo não-linear. A aplicação desta rotina suporte produz a característica não-linear mostrada na Tabela 6.4:

Tabela 6. 4: Pontos do indutor não-linear – 75 kVA

Corrente de pico [A]	Fluxo de pico [v.s]
0,00382	36,28949
0,01515	41,932232
0,02971	46,953746
0,05890	51,923492
0,11395	56,945006
0,23738	62,587739

Além do indutor não-linear, o ramo de magnetização também possui a resistência de perdas R_m a qual leva em consideração as perdas no núcleo. Essa resistência de perdas é calculada através da fórmula:

$$R_c = \frac{V_{\text{fat}}^2}{P_f} = \frac{13800^2}{\left(\frac{285}{3} \right)} = 2,00463 \times 10^6 \, \Omega \quad (6.7)$$

Através do ensaio de curto-circuito, a resistência e a indutância de dispersão do enrolamento de alta tensão, a resistência e a indutância de dispersão do enrolamento de baixa tensão são encontradas. Sabe-se que nesse tipo de ensaio tem-se um valor de resistência equivalente e de reatância equivalente, e esses valores devem ser divididos entre os

enrolamentos de alta e baixa tensão. Segundo (DURBAK et.al., 2005), esses valores podem ser calculados da seguinte maneira:

$$R_{at} = \alpha \cdot \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (6.8)$$

$$R_{bt} = \frac{1-\alpha}{n^2} \cdot \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (6.9)$$

onde P_{cc} e I_{cc} são a potência e a corrente obtida no ensaio de curto-circuito, respectivamente.

Assumindo que o lado de alta tensão é o lado externo, tem-se que α é o percentual da resistência a ser colocada no lado de alta tensão e n é a razão de espiras. Para o cálculo da reatância de dispersão utiliza-se:

$$X_{cc} = \sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - \left(\frac{P_{cc}}{I_{cc}}\right)^2} \quad (6.10)$$

Para projeto de enrolamentos concêntricos, o enrolamento interno possui menor reatância que o enrolamento externo. Com base no circuito equivalente que modela o transformador, a indutância de dispersão é dividida entre os dois enrolamentos. Em (DOMMEL, 1986) e em (DURBAK et.al., 2005) encontra-se a estimativa da divisão da reatância de curto-circuito entre os enrolamentos.

Uma forma de encontrar a resistência e a reatância de dispersão de cada enrolamento é dividir de forma igual entre os mesmos a resistência e a reatância de curto-circuito em pu. O procedimento de cálculo é descrito a seguir.

Inicialmente, as seguintes considerações são feitas:

$$R_{pu}^{at} = R_{pu}^{bt} = \frac{1}{2} \cdot R_{pu}^{cc} \quad (6.11)$$

Em que R_{pu}^{at} é a resistência em pu do enrolamento de alta tensão, R_{pu}^{bt} é resistência em pu do enrolamento de baixa tensão e R_{pu}^{cc} é a resistência de curto-circuito em pu. Para o cálculo da reatância, raciocínio semelhante é válido.

$$X_{pu}^{at} = X_{pu}^{bt} = \frac{1}{2} \cdot X_{pu}^{cc} \quad (6.12)$$

A resistência de curto-circuito pode ser encontrada a partir da seguinte fórmula:

$$R_{pu}^{cc} = \frac{P_{cc}}{S} = \frac{1170}{75000} = 0,0156 \text{ pu} \quad (6.13)$$

Os valores das resistências do enrolamento de alta e do enrolamento de baixa são respectivamente:

$$R^{at} = 3 \cdot \frac{R_{pu}^{cc}}{2} \cdot \frac{(V_b^{at})^2}{S_n} = 59,4173 \text{ } \Omega \quad (6.14)$$

$$R^{bt} = \frac{R_{pu}^{cc}}{2} \cdot \frac{(V_b^{bt})^2}{S_n} = 0,0053 \text{ } \Omega \quad (6.15)$$

As reatâncias de dispersão dos enrolamentos de alta tensão e baixa tensão são calculadas a partir dos seguintes procedimentos:

$$X_{pu} = \sqrt{0,035^2 - 0,0156^2} = 0,031331 \text{ pu} \quad (6.16)$$

$$X^{at} = 3 \times \frac{X_{pu}}{2} \times \frac{(V_b^{at})^2}{S_n} = 119,334 \text{ } \Omega \quad (6.17)$$

$$X^{bt} = \frac{X_{pu}}{2} \cdot \frac{(V_b^{bt})^2}{S_n} = 0,0101 \, \Omega \quad (6.18)$$

As indutâncias de dispersão dos enrolamentos de alta tensão e de baixa tensão são:

$$L^{at} = 316,704 \, \text{mH} \quad (6.19)$$

$$L^{bt} = 0,0268 \, \text{mH} \quad (6.20)$$

Esses parâmetros devem ser colocados na caixa de diálogo do modelo em estudo. Para verificar se o modelo é válido, esse tem que reproduzir os valores obtidos nos ensaios de curto circuito e circuito aberto. A seguir, as formas de onda resultantes dos ensaios citados respectivamente, para os modelos SATURABLE e BCTRAN respectivamente. Para identificação correta das formas de onda, vale a seguinte legenda:

- a) *Cor vermelha: corrente na fase A*
- b) *Cor verde: corrente na fase B*
- c) *Cor azul: corrente na fase C*

Para o modelo SATURABLE, as formas de onda obtidas com o ensaio a vazio mostradas na Fig. 6.2 apresentaram harmônica de quinta ordem e valor rms da componente fundamental igual a 0,04278 A, conforme Fig. 6.3

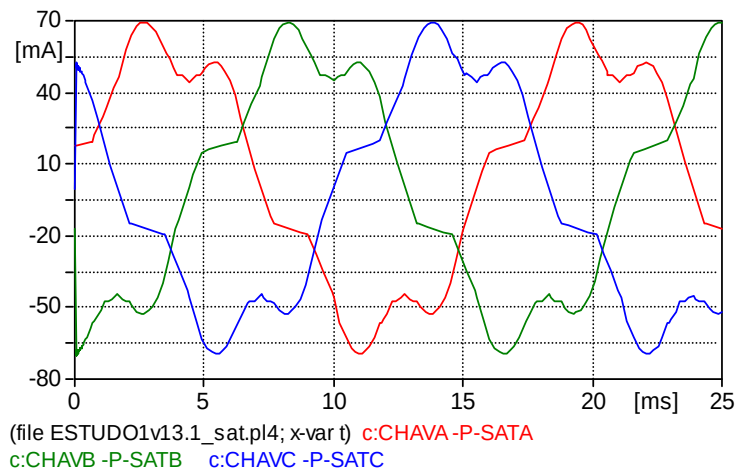


Fig. 6. 2: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio - (SATURABLE – 75 kVA).

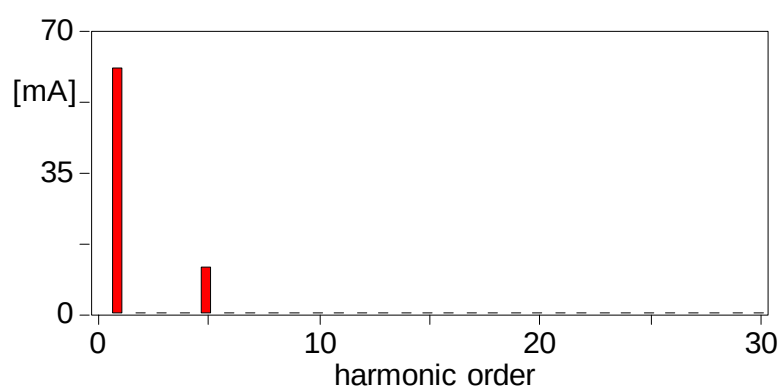


Fig. 6. 3: Componentes harmônicos da corrente em vazio (Fase A)
(Modelo SATURABLE – 75 kVA).

As formas de onda obtidas tanto no lado de alta tensão quanto no lado de baixa tensão resultantes da aplicação da tensão de curto-circuito são apresentadas nas Figs. 6.4 e 6.5 respectivamente.

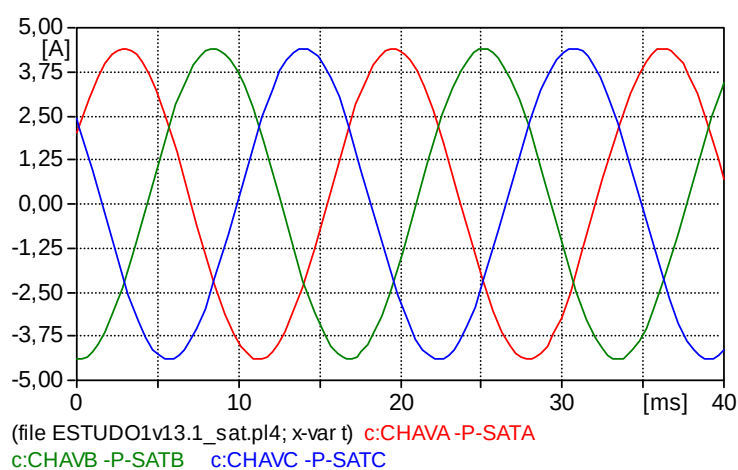


Fig. 6. 4: Formas de onda da corrente do ensaio de
curto-circuito (lado de alta tensão) - (SATURABLE – 75 kVA).

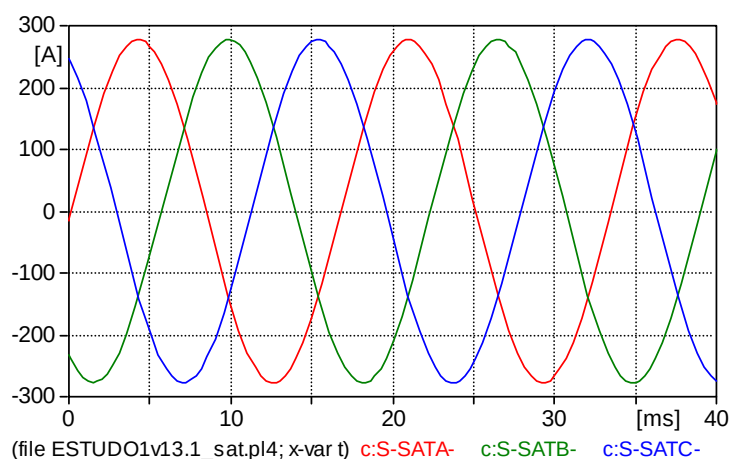


Fig. 6. 5: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de baixa tensão) - (SATURABLE – 75 kVA).

Ao simular a condição de curto-circuito, o valor da corrente primária nominal foi igual a 3,122 A e o da corrente secundária nominal foi de 195,8 A.

Resultados semelhantes foram obtidos com o modelo BCTRAN, os quais podem ser visualizados nas Figs. 6.6, 6.8 e 6.9

Inicialmente foi simulado o ensaio a vazio com o objetivo de reproduzir o valor da corrente de excitação e posteriormente o ensaio de curto-circuito.

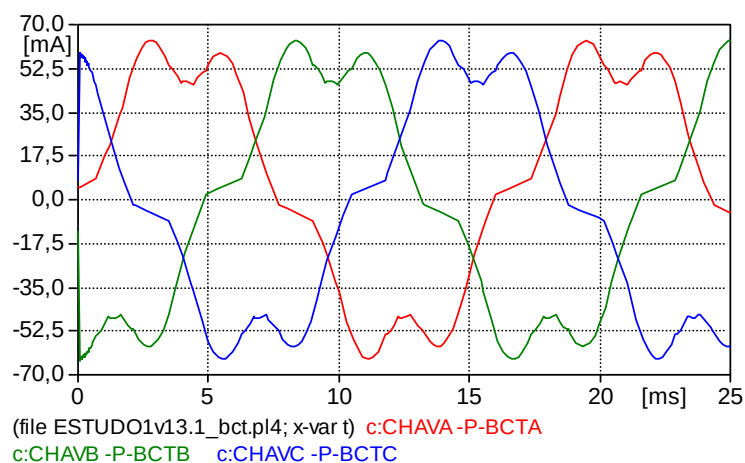


Fig. 6. 6: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio (modelo BCTRAN) – 75 kVA

O espectro de frequência da corrente da Fase A é mostrada na Fig. 6.7.

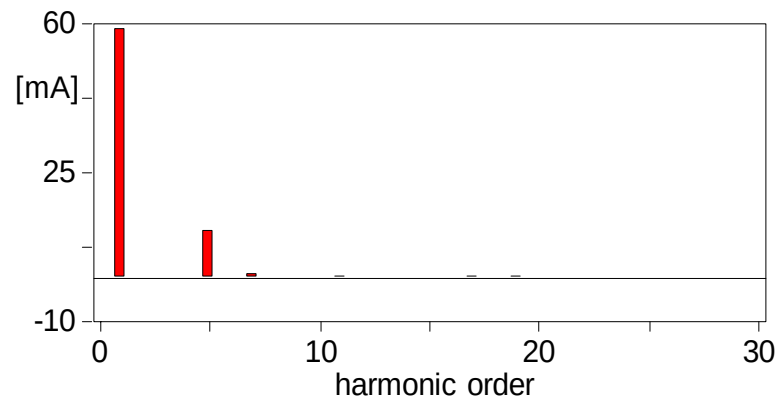


Fig. 6. 7: Espectro de frequência da forma de onda da corrente da Fase A (BCTTRAN – 75 kVA)

As formas de onda obtidas tanto no lado primário quanto no lado secundário na simulação de curto-circuito são mostradas nas Figs. 6.8 e 6.9 respectivamente.

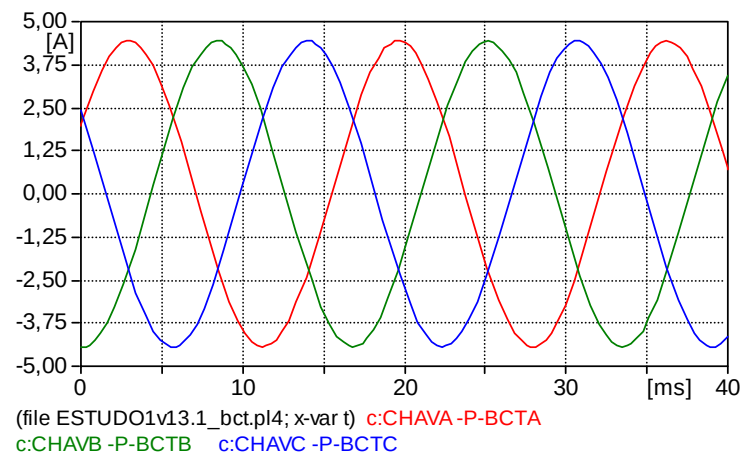


Fig. 6. 8: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de alta tensão) - (BCTTRAN – 75 kVA)

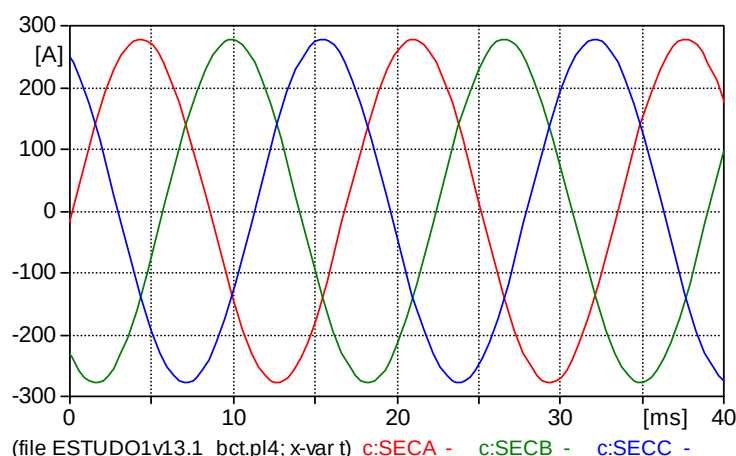


Fig. 6. 9: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de baixa tensão) - (BCTRAN – 75 kVA)

Os resultados obtidos para a corrente do ensaio de curto circuito foi de 3,135 A (lado primário) e 196,6 A (lado secundário). O BCTRAN reproduziu de forma satisfatória os valores de corrente do ensaio de curto-circuito.

Os resultados da simulação dos testes de circuito aberto e de curto-circuito utilizando o modelo híbrido (XFMR) são mostrados nas Figs. 6.10 e 6.11. A simulação do teste a vazio foi realizado no lado de baixa e o teste de curto-circuito foi realizado no lado de alta tensão.

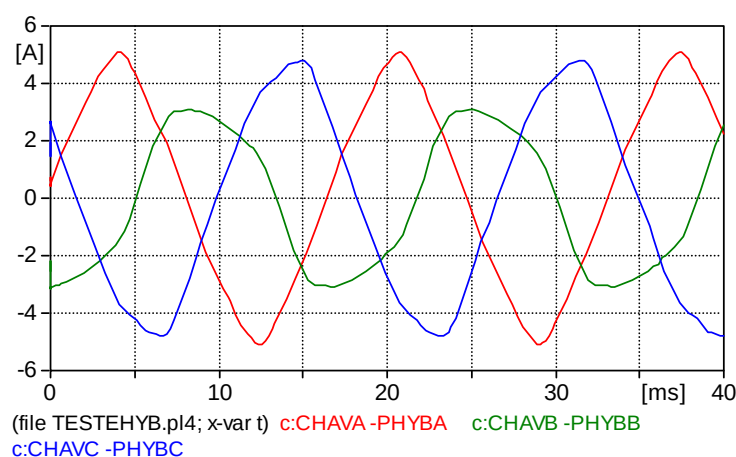


Fig. 6. 10: Formas de onda da corrente do ensaio em vazio (lado de baixa tensão) – (Híbrido – 75 kVA)

A Fig. 6.11 apresenta o espectro de frequência da corrente da Fase A a partir da utilização do modelo híbrido no lado de baixa tensão do transformador.

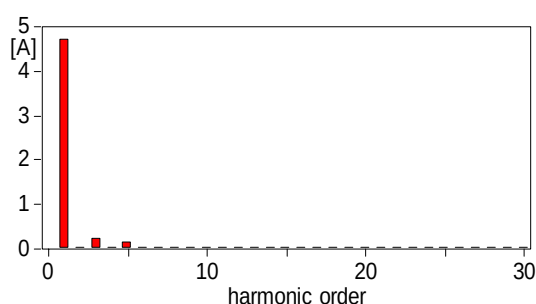


Fig. 6. 11: Espectro de frequência da forma de onda da corrente da Fase A – lado de baixa tensão (Híbrido –75 kVA)

O motivo do valor da corrente na fase B ser inferior ao da corrente na fase A e C pode ser atribuído à assimetria do núcleo de três colunas. Ou seja, a relutância associada ao caminho magnético do fluxo na fase central (fase B) é menor do que a relutância associada com as fases externas. Diferentemente dos outros modelos, o modelo híbrido leva em consideração a topologia do núcleo magnético, o que reflete nas formas de onda de corrente a vazio.

A Fig. 6.12 mostra as formas de onda resultantes da simulação do ensaio de curto-circuito utilizando o modelo híbrido.

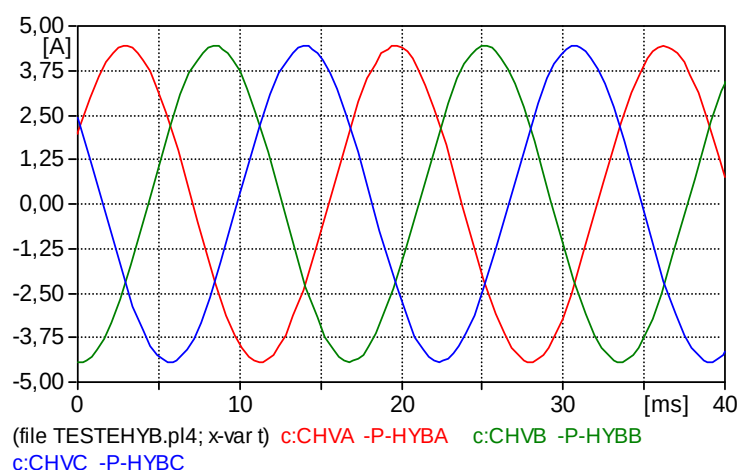


Fig. 6. 12: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito (lado de alta) - (Híbrido – 75 kVA)

A Fig.6.13 apresenta as formas de onda resultantes da simulação do ensaio de curto-circuito no lado de baixa tensão do transformador.

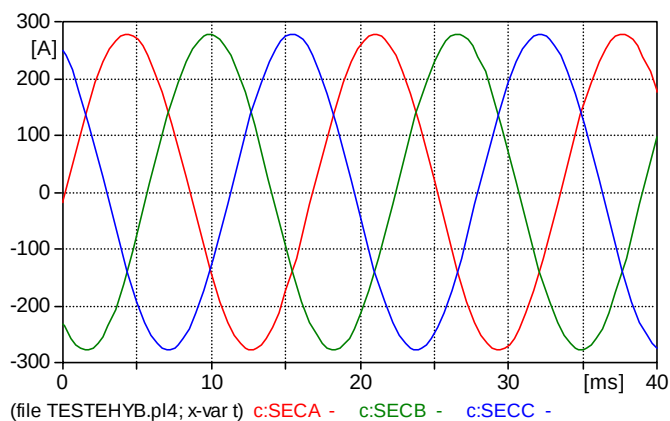


Fig. 6. 13: Formas de onda da corrente
do ensaio de curto-circuito (lado de baixa) - (Híbrido – 75 kVA)

6.2.2 Transformador de 500 kVA

O transformador de 500 kVA apresenta as seguintes informações que são úteis para o cálculo dos parâmetros do modelo utilizado na simulação de transitórios eletromagnéticos.

b) Transformador de distribuição

1. Tensão nominal: 13,8 kV / 220 – 127 V
2. Tipo de ligação: delta – estrela
3. Núcleo: trifásico do tipo envolvido de três colunas
4. Perdas por excitação: 840 W
5. Corrente de excitação: 0,9%
6. Perdas por curto circuito: 9140 W
7. Impedância de curto circuito: 4,5%
8. Curva de saturação

A curva de saturação fornecida pelo fabricante para esse transformador é mostrada na Fig. 6.14.

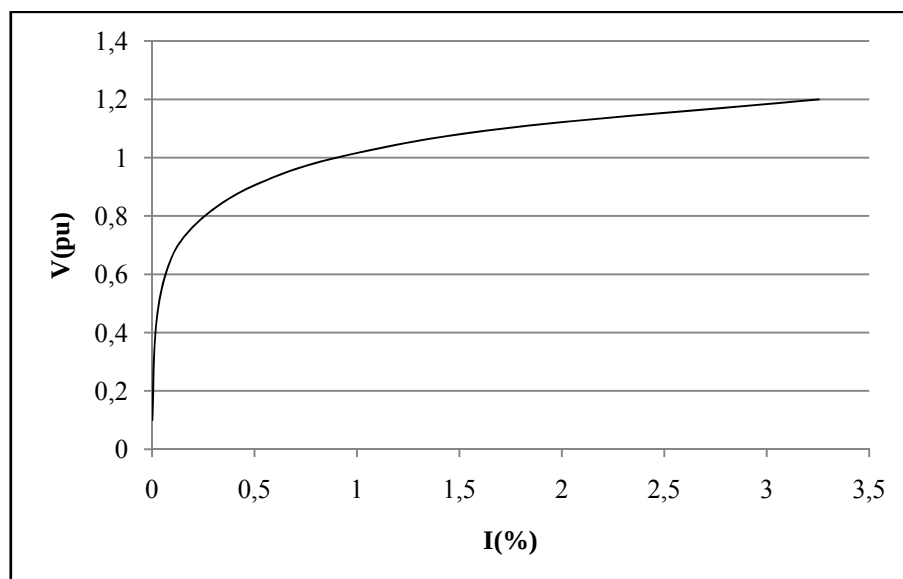


Fig. 6. 14: Curva de saturação do transformador de 500 kVA.

O gráfico da Fig. 6.15 apresenta o comportamento das perdas a vazio, que engloba tanto as perdas por histerese não-linear, quanto as perdas por correntes parasitas. Verifica-se o comportamento não-linear em relação à tensão aplicada.

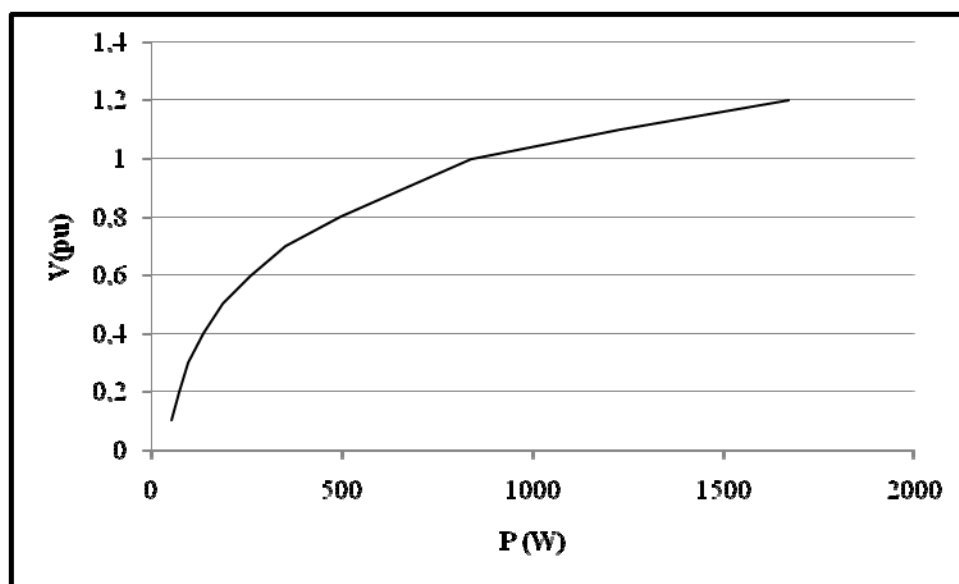


Fig. 6. 15: Comportamento das perdas do transformador – 500 kVA.

A Tabela 6.5 apresenta os pontos que serão utilizados na modelagem do transformador para a simulação do fenômeno da ferorrressonância.

Tabela 6. 5: Pontos da curva de saturação 500 kVA conforme fabricante

Tensão em p.u	Corrente de excitação em $I_{exc}(\%)$	Perdas $P_o(W)$
0,70	0,127	353
0,80	0,258	496
0,90	0,484	671
1,00	0,9	840
1,10	1,711	1229
1,20	3,255	1671

A curva de saturação que trata da característica de magnetização do transformador na base em pu é apresentada na Tabela 6.6. Uma vantagem dessa curva é que pode ser calculada tanto referente ao lado de alta tensão quanto ao lado de baixa tensão.

Tabela 6. 6: Pontos da curva de saturação do transformador de 500 kVA em pu

Tensão em pu	Corrente de magnetização em pu
0,70	0,00077
0,80	0,00226
0,90	0,00460
1,00	0,00884
1,10	0,01696
1,20	0,03243

Os pontos transformados em valores rms são apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6. 7: Pontos da curva de saturação em coordenadas de fase

Tensão de fase em V	Corrente de magnetização de fase primária em A
9660	0,00932
11040	0,02732
12420	0,05561
13800	0,10678
15180	0,20487
16560	0,39167

Após os procedimentos descritos para o cálculo da corrente de magnetização por fase do transformador ainda é necessário utilizar uma rotina do ATP chamada de “*saturation*”, que transforma os pontos rms (V- I) de tensão e de corrente na característica ($\Psi - i$) fluxo de pico x corrente de pico utilizada no modelo do indutor pseudo não-linear. A aplicação desta rotina suporte produz a característica não-linear mostrada na Tabela 6.8.

Tabela 6. 8: Pontos obtidos a partir da rotina saturation – 500 kVA

Corrente de pico [A]	Fluxo de pico [v.s]
0,01320	36,23773
0,06015	41,41455
0,11378	46,59136
0,22302	51,76818
0,43783	56,94500
0.85411	62,12182

O valor da resistência de perdas referida ao lado de alta tensão é dado por:

$$R_c = \frac{V_{\text{fat}}^2}{P_f} = \frac{13800^2}{\frac{840}{3}} = 680142,86 \, \Omega \quad (6.21)$$

Para encontrar os parâmetros dos enrolamentos, as informações obtidas através do ensaio de curto-circuito devem ser utilizadas, tais como impedância percentual e perdas no cobre. Todas as considerações feitas para a modelagem dos parâmetros dos enrolamentos foram feitas anteriormente para o caso do transformador de 75 kVA. Portanto, serão apresentados apenas os valores dos parâmetros.

O cálculo da resistência de curto-circuito em pu para esse transformador é feito da seguinte maneira:

$$R_{\text{pu}}^{\text{cc}} = \frac{9140}{500000} = 0,01828 \, \text{pu} \quad (6.22)$$

Os valores das resistências dos enrolamentos de alta tensão e baixa tensão são respectivamente:

$$R^{\text{at}} = 3 \cdot \frac{0,01828}{2} \cdot \frac{13800^2}{500000} = 10,44 \, \Omega \quad (6.23)$$

$$R^{\text{bt}} = \frac{0,01828}{2} \cdot \frac{220^2}{500000} = 8,847 \times 10^{-4} \, \Omega \quad (6.24)$$

Os valores das reatâncias dos enrolamentos de alta tensão e de baixa tensão são fornecidos respectivamente a partir dos seguintes cálculos:

$$X_{pu} = \sqrt{0,045^2 - 0,01828^2} = 0,04111 \text{ pu} \quad (6.25)$$

$$X^{at} = 3 \cdot \frac{0,04111}{2} \cdot \frac{13800^2}{500000} = 23,4869 \, \Omega \quad (6.26)$$

$$X^{bt} = \frac{0,04111}{2} \cdot \frac{220^2}{500000} = 1,9897 \times 10^{-3} \, \Omega \quad (6.27)$$

As indutâncias de dispersão dos enrolamentos de alta tensão e de baixa tensão são fornecidas abaixo:

$$L^{at} = 62,34 \text{ mH} \quad (6.28)$$

$$L^{bt} = 0,005280 \text{ mH} \quad (6.29)$$

Os parâmetros indutâncias de dispersão do enrolamento de alta tensão e do enrolamento de baixa tensão, resistência de cada enrolamento, resistência de perdas devem ser colocados na caixa de diálogo do modelo de transformador SATURABLE. Para verificar a validade do modelo, é necessário que este reproduza a corrente do ensaio de curto-circuito e do ensaio de circuito aberto.

A Fig. 6.16 apresenta as formas de onda resultantes da simulação do ensaio de circuito aberto utilizando o modelo SATURABLE.

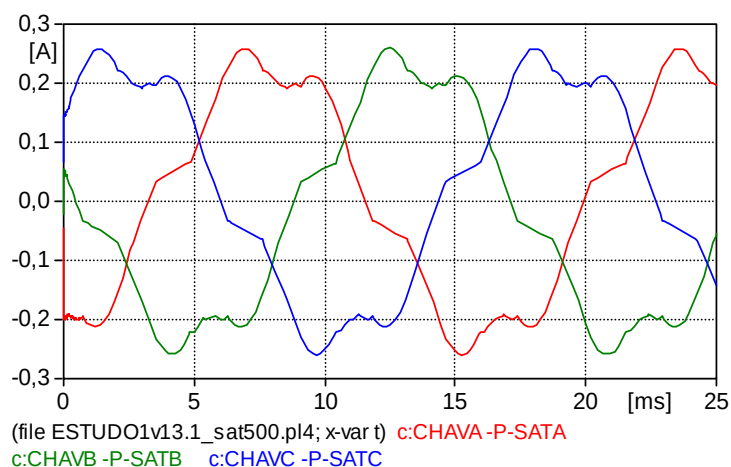


Fig. 6. 16: Formas de onda da corrente da simulação do ensaio a vazio (Modelo SATURABLE) – 500 kVA.

Para o modelo SATURABLE, as formas de onda obtidas pelo ensaio a vazio apresentaram harmônica de quinta ordem e valor rms da componente fundamental igual 0,1678 A. Esse valor é muito próximo da corrente a vazio a qual é igual a 0,1882 A.

O espectro de frequência da corrente da Fase A (valor de pico) do ensaio a vazio é mostrado na Fig. 6.17.

As formas de onda da corrente do lado de alta tensão e da corrente do lado de baixa tensão obtidas pela simulação do ensaio de curto-circuito são mostradas nas Fig. 6.18 e Fig. 6.19, respectivamente. A simulação desse ensaio resultou em valores de correntes bem próximas da corrente fornecida pelo fabricante. A corrente do lado de baixa tensão do ensaio foi igual a 20,91 A e a corrente do lado de alta tensão foi igual a 1311 A.

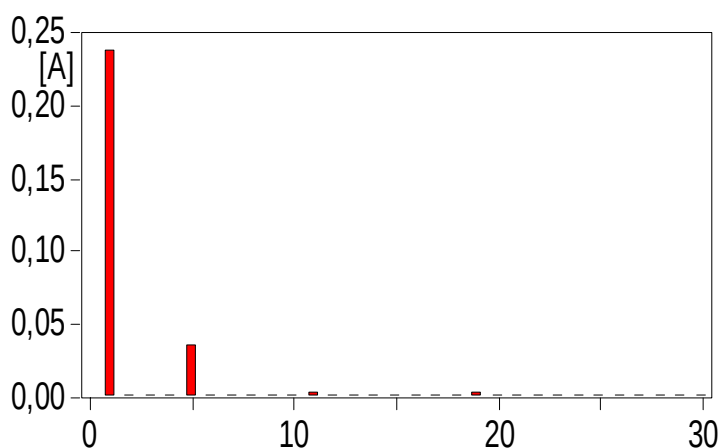


Fig. 6. 17: Espectro de frequência da corrente da Fase A do ensaio a vazio (Modelo SATURABLE – 500 kVA).

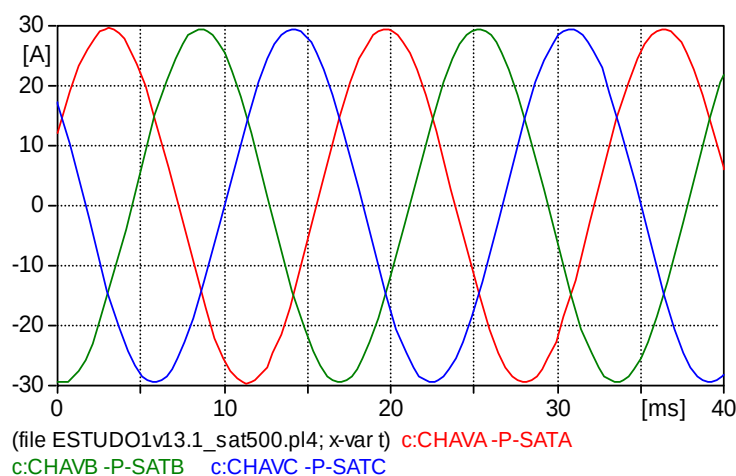


Fig. 6. 18: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de alta tensão (Modelo SATURABLE – 500 kVA).

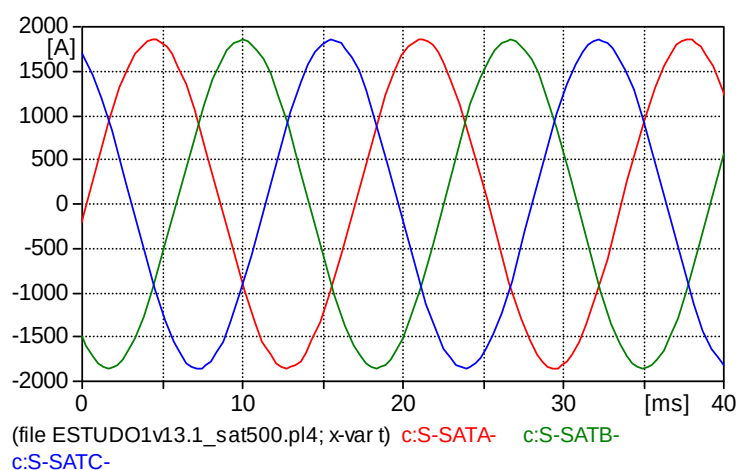


Fig. 6. 19: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de baixa tensão (SATURABLE – 500 kVA).

Para a simulação utilizando o modelo BCTRAN, basta entrar na caixa de diálogo com os valores dos testes a vazio e de curto-circuito. O próprio modelo executa os cálculos das matrizes de saída e da indutância de saturação, colocando-os no arquivo .atp em estudo. Não é necessário realizar nenhum cálculo para a elaboração desse modelo.

A Fig. 6.20 apresenta a simulação do ensaio a vazio do transformador de 500 kVA utilizando o modelo BCTRAN.

O espectro de frequência da corrente da Fase A (valor de pico) do ensaio a vazio utilizando o BCTRAN é mostrado na Fig. 6.21.

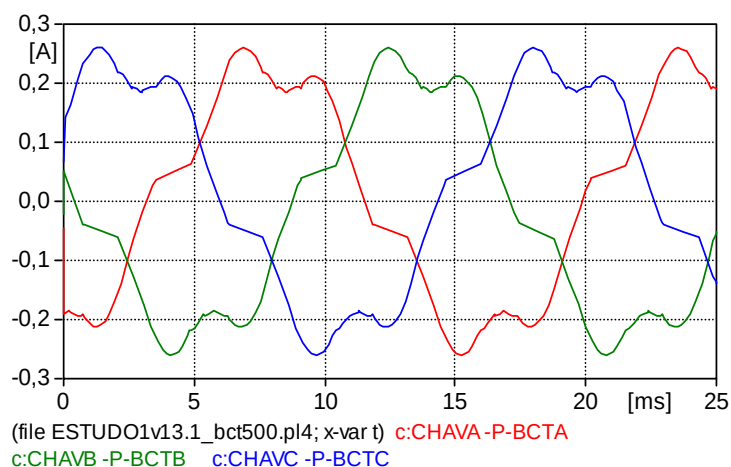


Fig. 6. 20: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio (BCTRAN – 500 kVA).

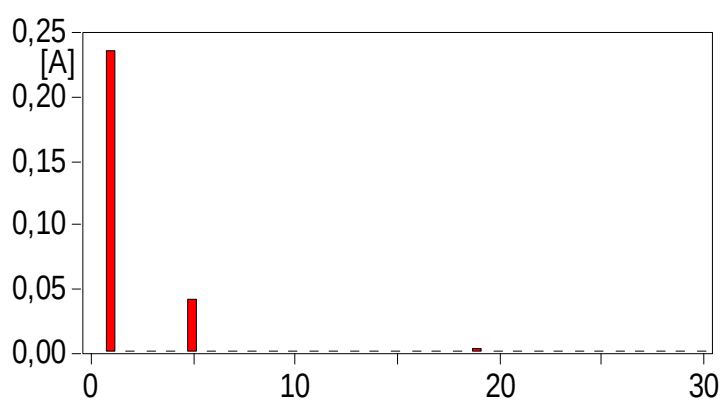


Fig. 6. 21: Espectro de frequência da corrente da Fase A (BCTRAN – 500 kVA).

O valor rms da componente fundamental da corrente simulada da fase A foi igual a 0,1662 A com o modelo BCTRAN. A corrente em vazio também apresentou componente harmônica de quinta ordem.

O resultado da simulação do ensaio de curto-circuito é mostrado nas Fig. 6.22 e Fig. 6.23. A Fig. 6.22 apresenta o resultado da simulação da corrente do lado de alta tensão e a Fig. 6.23 apresenta o resultado da simulação da corrente do lado de baixa tensão. O valor da corrente simulada nominal do lado de alta tensão foi igual a 20,89 A e da corrente do lado de baixa tensão foi igual a 1311 A.

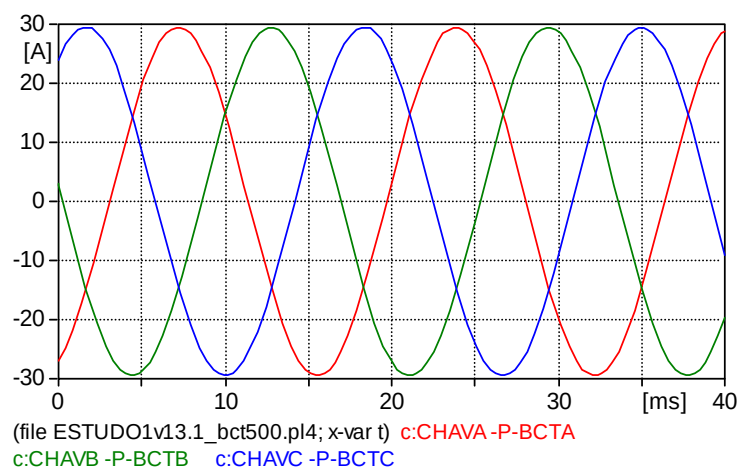


Fig. 6. 22: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de alta tensão (BCTAN – 500 kVA).

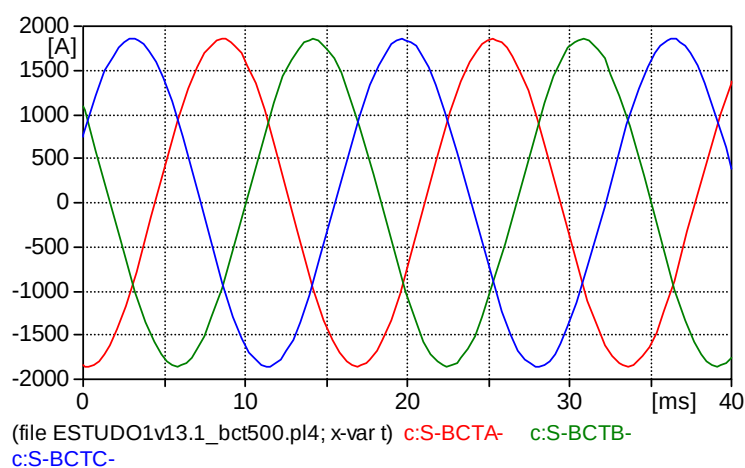


Fig. 6. 23: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de baixa tensão (BCTAN – 500 kVA).

As Figs. 6.24 e 6.25 mostram os resultados das simulações dos ensaios a vazio e de curto-circuito para o transformador sendo modelado através do modelo híbrido.

A Fig. 6.26 apresenta as formas de onda resultantes do ensaio de curto-circuito medindo as correntes no lado de baixa do transformador.

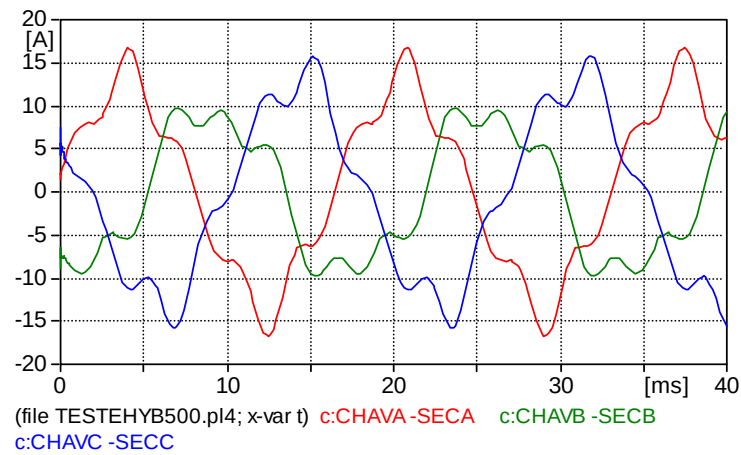


Fig. 6. 24: Formas de onda da corrente do ensaio a vazio lado de baixa tensão (Híbrido – 500 kVA).

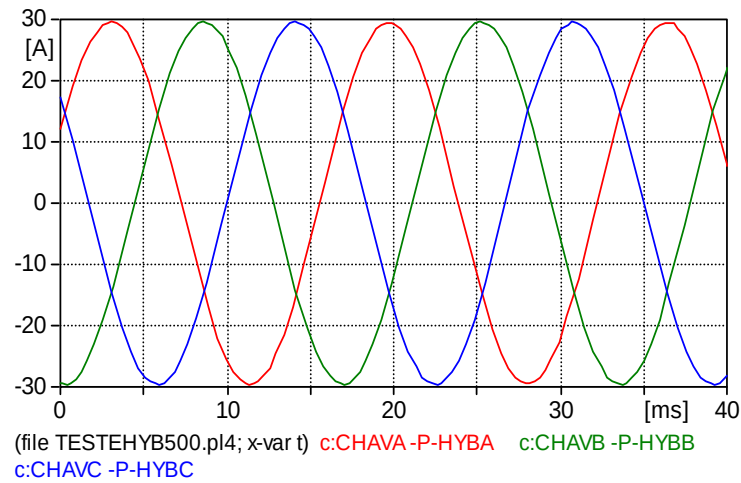


Fig. 6. 25: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de alta tensão (Híbrido – 500 kVA)

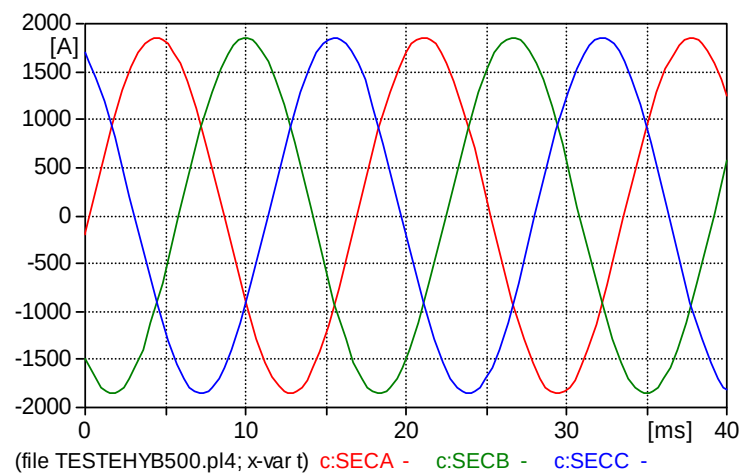


Fig. 6. 26: Formas de onda da corrente do ensaio de curto-circuito lado de baixa tensão (Híbrido – 500 kVA)

6.3 Simulações

Esta seção tem como objetivos verificar a resposta da rede em virtude dos tipos de chaveamentos, comprimentos do cabo e potência do transformador. O circuito a ser analisado consiste de uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente de Thevénin, cabo de potência do tipo triplexado instalado em dutos, constituído de condutor de cobre, isolamento em EPR, com cobertura de PVC, 8,7 / 15 kV, e transformadores de média tensão devidamente especificados em seções anteriores. Os dados dos cabos para a modelagem do circuito são:

1. Resistência de sequência positiva: 0,6726 Ω/km
2. Reatância de sequência positiva: 0,1793 Ω/km
3. Resistência de sequência zero: 1,6793 Ω/km
4. Reatância de sequência zero: 0,6332 Ω/km
5. Capacitância: 0,2240 $\mu\text{F}/\text{km}$

A representação do circuito através de um diagrama unifilar é mostrada na Fig. 6.27.

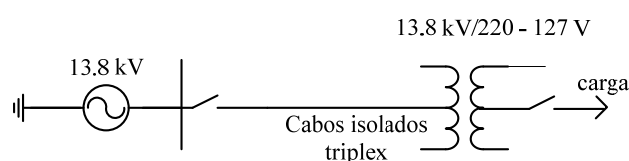


Fig. 6. 27: Diagrama unifilar do circuito subterrâneo.

6.3.1 Abertura monopolar (Fase A) – Transformador de 75 kVA

As simulações apresentadas a seguir foram conduzidas com o objetivo de verificar possíveis sobretensões ferorrressonantes devido à manobra monopolar e ao tipo de modelo utilizado. Naturalmente, nestes casos os cabos foram incluídos na modelagem do sistema, adotando-se comprimentos de 50, 100 e 300 m. As fases B e C foram mantidas fechadas e a Fase A foi aberta em 0,02s, considerando-se que o transformador operava em vazio.

A nomenclatura utilizada na identificação das tensões e das correntes utilizadas no circuito simulado é fornecida a seguir:

- a) Tensão no primário para comprimento de 50 m: cor vermelha
- b) Tensão no primário para comprimento de 100 m: cor verde

- c) Tensão no primário para comprimento de 300 m: cor azul
- d) Corrente no primário para comprimento de 50 m: cor vermelha
- e) Corrente no primário para comprimento de 100 m: cor verde
- f) Corrente no primário para comprimento de 300 m: cor azul

6.3.1.1 Caso 1 – Modelo SATURABLE

A Fig. 6.28 apresenta o resultado da simulação com o transformador sendo modelado através do modelo SATURABLE. Para este modelo, verificou-se sobretensões sustentadas na fase aberta com características de ferorressonância tanto para 100m quanto para 300 m, enquanto para 50 m não foram verificadas sobretensões. O valor máximo de pico foi de 4,4pu para o caso de maior comprimento do cabo. Para o comprimento de 100 m, houve um pico de tensão de 2,23 pu negativo. Esses valores consideram apenas a componente fundamental da forma de onda de tensão.

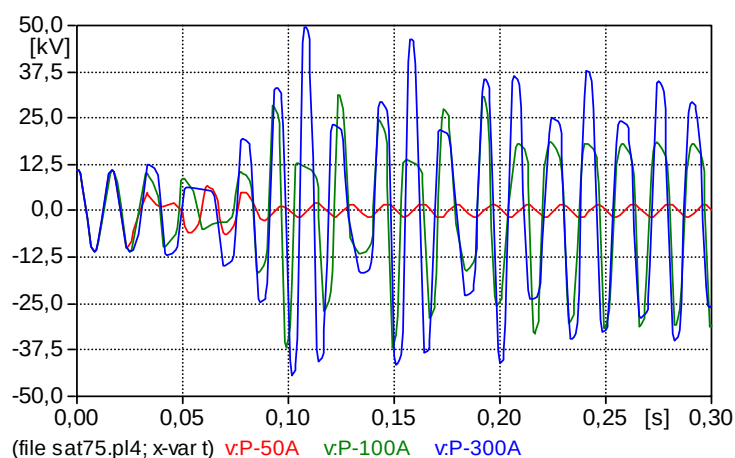


Fig. 6. 28: Tensões na Fase A no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA).

A Fig. 6.29 apresenta a comparação entre as correntes da Fase B nas simulações com o modelo SATURABLE para distâncias de 50, 100 e 300m.

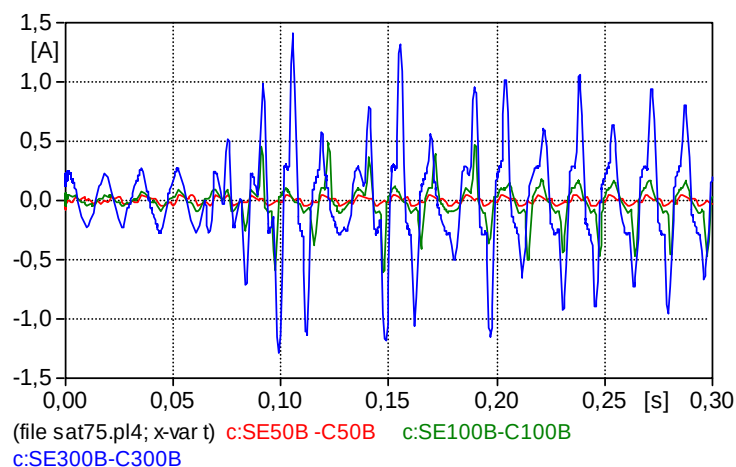


Fig. 6. 29: Correntes na Fase B no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA).

6.3.1.2 Caso 2- Modelo BCTRAN

A Fig. 6.30 apresenta o resultado com o transformador sendo modelado através do BCTRAN. Para este modelo verificou-se sobretensões sustentadas na fase aberta com característica de ferorrressonância somente para 300 m, enquanto para 50 m e 100 m não foram verificadas sobretensões. Após finalizado o transitório inicial, a sobretensão em regime permanente atingiu pico de 2,8 pu referente a componente fundamental.

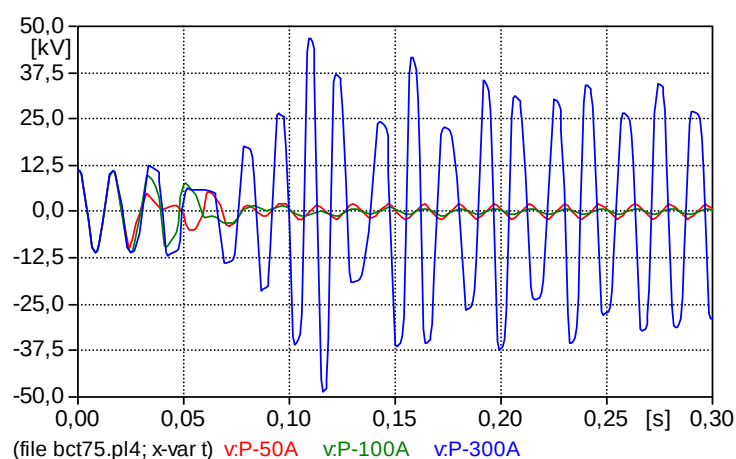


Fig. 6. 30: Tensões na Fase A no primário do transformador - (BCTRAN – 75 kVA).

A Fig. 6.31 apresenta a comparação entre as correntes da Fase B na simulação com o modelo BCTRAN para distâncias de 50, 100 e 300m.

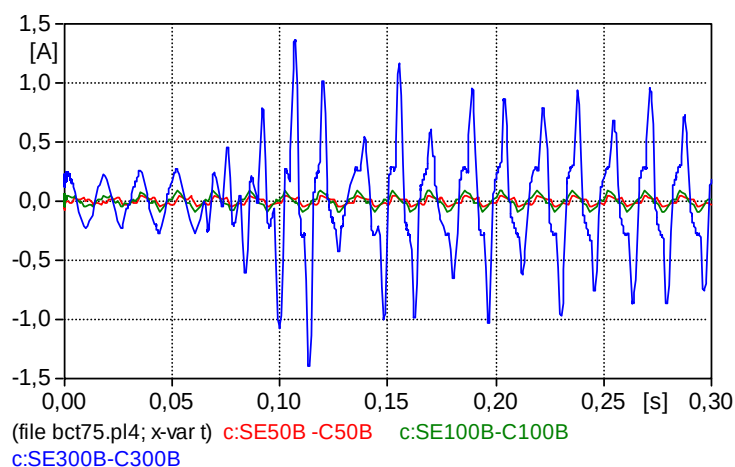


Fig. 6. 31: Correntes da Fase B no primário do transformador - (BCTRAN – 75 kVA).

Com relação à Fig. 6.31, verifica-se que a corrente que circula na fase C no circuito de 300 m atinge valor muito superior ao da corrente em vazio, devido à saturação do núcleo magnético e é altamente distorcida o que evidencia a presença de componentes harmônicas.

6.3.1.3 Caso 3- Modelo Híbrido

A Fig. 6.32 apresenta o resultado da simulação para o transformador sendo modelado através do modelo híbrido. Esse modelo é considerado topologicamente correto, pois leva em consideração o tipo de núcleo utilizado no transformador. Além disso, a saturação é modelada através da equação de Frolich que reproduz de maneira mais adequada a curva B x H do material ferromagnético que constitui o núcleo do transformador.

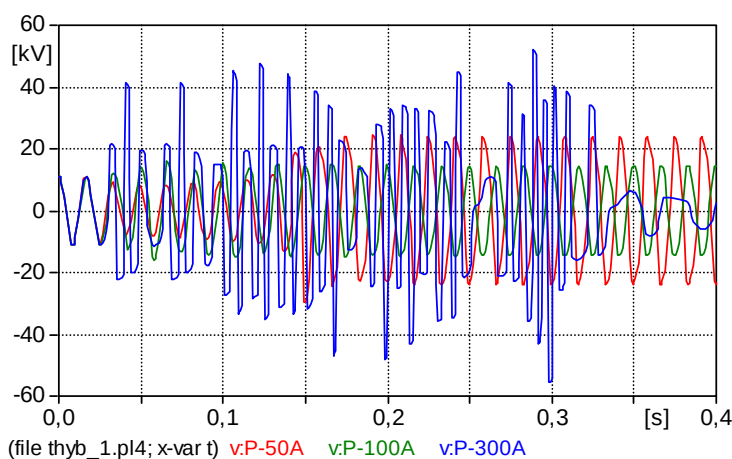


Fig. 6. 32: Tensões na Fase A no primário do transformador - (Híbrido – 75 kVA)

Para este modelo, verificou-se sobretensões sustentadas na fase aberta com características de ferroressonância para o caso de 300 m, porém as sobretensões tiveram amortecimento. Para 50 m foram verificadas sobretensões com valores de pico de 1,83 pu e para 100 m as sobretensões foram sustentadas com picos moderados no valor de 1,4 pu. Para o caso do cabo de 300 m, as sobretensões alcançaram pico de aproximadamente 4,6 pu.

A Fig. 6.33 apresenta a comparação entre as correntes da Fase B na simulação com o modelo híbrido para as distâncias de 50, 100 e 300 m.

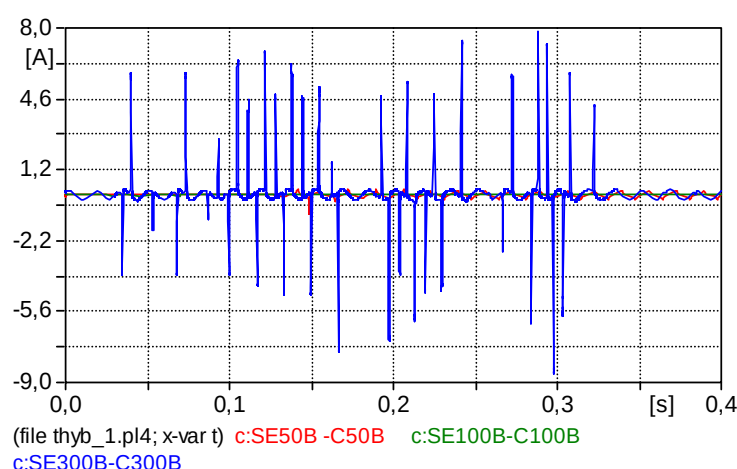


Fig. 6. 33: Correntes da Fase B no primário do transformador - (Híbrido – 75 kVA).

A Fig. 6.33 mostra que a corrente mais elevada está relacionada com o comprimento de cabo onde ocorre o maior nível de sobretensão com elevada distorção na sua forma de onda. Isto deve estar relacionado com o nível de saturação alcançado pelo núcleo, em virtude das sobretensões que atuam no primário do equipamento. Verifica-se com base na Fig. 6.33 que a redução da corrente implica na redução do valor da tensão no primário do transformador para o comprimento de 300 m.

A Tabela 6.9 sintetiza os valores de picos das sobretensões encontrados na Fase A do primário do transformador de 75 kVA em função da abertura monopolar para os três comprimentos do circuito, 50, 100 e 300 m.

Tabela 6. 9: Valores de picos das sobretensões em pu – 75kVA

Modelo	50 m	100 m	300 m
SATURABLE	Sem verificação	2,23	4,4
BCTRAN	Sem verificação	Sem verificação	2,8
Híbrido	1,83	1,4	4,6

6.3.2 Abertura Monopolar (Fase A) – Transformador de 500 kVA

Procedimento semelhante foi feito para o caso do transformador de 500 kVA. O objetivo das simulações foi avaliar o nível de sobretensões que ocorre na rede em virtude do tipo de chaveamento, comprimento de cabo do circuito e também se ocorre alguma mudança em função do tipo de modelo utilizado na representação do equipamento.

A nomenclatura utilizada na identificação das tensões e das correntes utilizadas no circuito simulado é fornecida a seguir:

- a) Tensão no primário para comprimento de 50 m: cor vermelha*
- b) Tensão no primário para comprimento de 100 m: cor verde*
- c) Tensão no primário para comprimento de 300 m: cor azul*
- d) Corrente no primário para comprimento de 50 m: cor vermelha*
- e) Corrente no primário para comprimento de 100 m: cor verde*
- f) Corrente no primário para comprimento de 300 m: cor azul*

6.3.2.1 Caso 1 – Modelo SATURABLE

A Fig. 6.34 apresenta o resultado da simulação com o transformador sendo modelado através do SATURABLE. Para essa simulação, verificou-se que não houve sobretensões para o circuito com maior comprimento de cabo. Entretanto, para o caso do circuito com comprimento de 50 m as sobretensões alcançaram pico de 1,52 pu. Para o comprimento de 100 m, as sobretensões alcançaram pico de 1,8 pu. Com base nas respostas obtidas a partir desse modelo de transformador, as sobretensões se mantêm no sistema por vários ciclos após a abertura da chave.

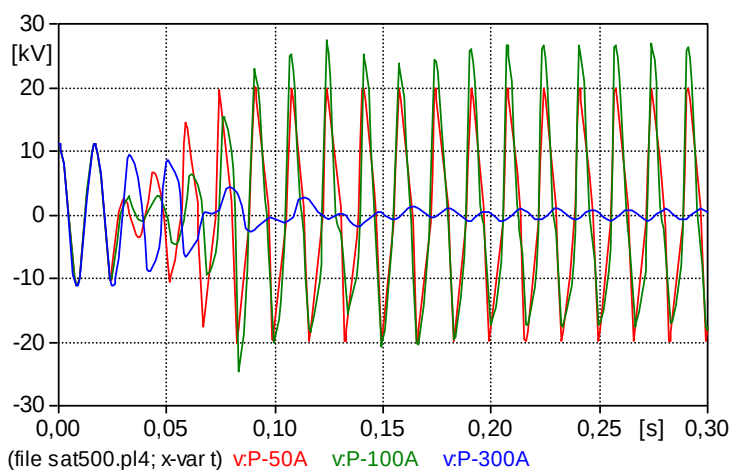


Fig. 6. 34: Tensões na Fase A no primário do transformador - (SATURABLE – 500 kVA).

A Fig. 6.35 apresenta a comparação entre as correntes da fase B na simulação com o modelo híbrido para as distâncias de 50, 100 e 300 m.

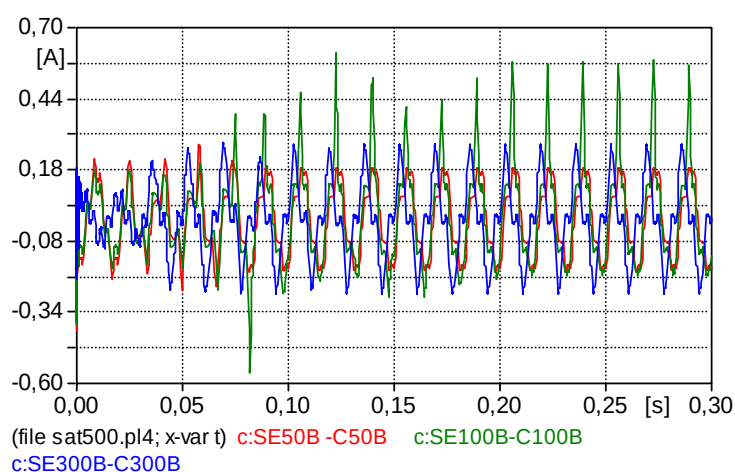


Fig. 6. 35: Correntes na Fase B no primário do transformador - (SATURABLE – 500 kVA).

6.3.2.2 Caso 2 – Modelo BCTRAN

A Fig. 6.36 apresenta o resultado da simulação com o transformador sendo modelado através do BCTRAN. Para essa simulação, verificou-se que não houve sobretensões para o circuito com maior comprimento de cabo. Entretanto, para o caso do circuito com comprimento de 50 m as sobretensões alcançaram pico de 1,4 pu. Para o comprimento de 100 m, as sobretensões alcançaram pico de 1,8 pu. Com base nas respostas obtidas a partir desse modelo de transformador, as sobretensões se mantêm no sistema por vários ciclos após a abertura da chave.

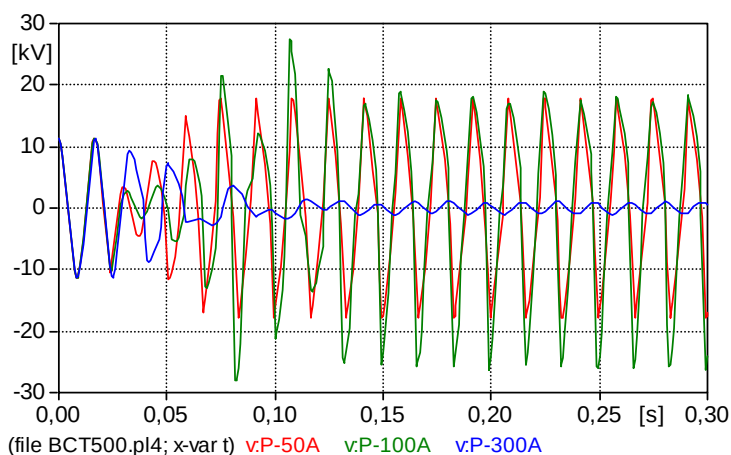


Fig. 6. 36: Tensões na fase A no primário do transformador - (BCTRAN – 500 kVA).

A Fig. 6.37 apresenta a comparação entre as correntes da Fase B na simulação com o modelo híbrido para as distâncias de 50, 100 e 300 m.

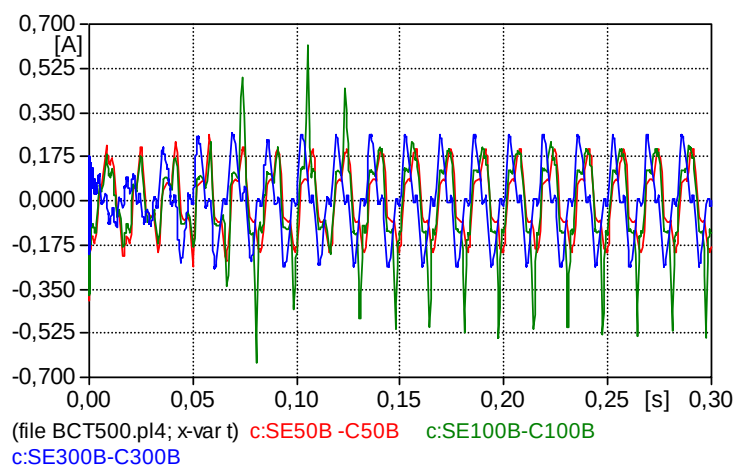


Fig. 6. 37: Correntes na Fase B no primário do transformador - (BCTRAN – 500 kVA).

Para o transformador de 500 kVA, as formas de onda da corrente elétrica que circulam na Fase B foram semelhantes às formas de onda de obtidas com o modelo SATURABLE, bem como as formas de onda da tensão na Fase A (fase aberta).

6.3.2.3 Caso 3 – Modelo Híbrido

A Fig.6.38 apresenta o resultado da simulação com o transformador sendo modelado através do modelo híbrido (XFMR). Para essa simulação, verificou-se que houve pico de tensão de 1,23 pu para o circuito com maior comprimento de cabo (300 m), mas com forte amortecimento. Entretanto, para o caso do circuito com comprimento de 50 m as sobretensões alcançaram pico de 1,4 pu. Para o comprimento de 100 m, as sobretensões alcançaram pico de 1,93 pu. Com base nas respostas obtidas a partir desse modelo de transformador, as sobretensões se mantêm no sistema por vários ciclos após a abertura da chave.

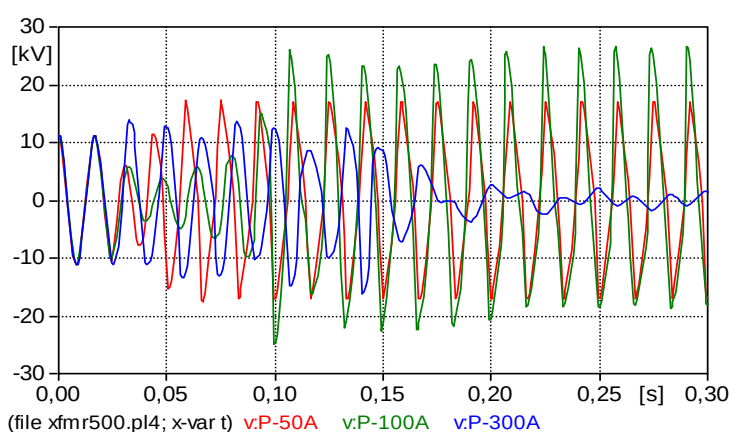


Fig. 6. 38: Tensões na Fase A no primário do transformador - (Híbrido - 500 kVA).

A Fig. 6.39 refere-se ao caso 6.3.2.3, porém com tempo total de simulação igual a 0,8 s. Verifica-se que as sobretensões se mantêm no sistema após iniciado o transitório. Com base nesta figura, não foram constatadas sobretensões ferrossonantes para o circuito com cabo de 300 m, entretanto para 50 e 100 m as sobretensões persistem no sistema.

A Fig. 6.40 apresenta o resultado das correntes para os circuitos com comprimento de 50, 100 e 300 m na Fase B, por onde circula a corrente elétrica com elevados níveis de distorção devido à saturação do núcleo magnético.

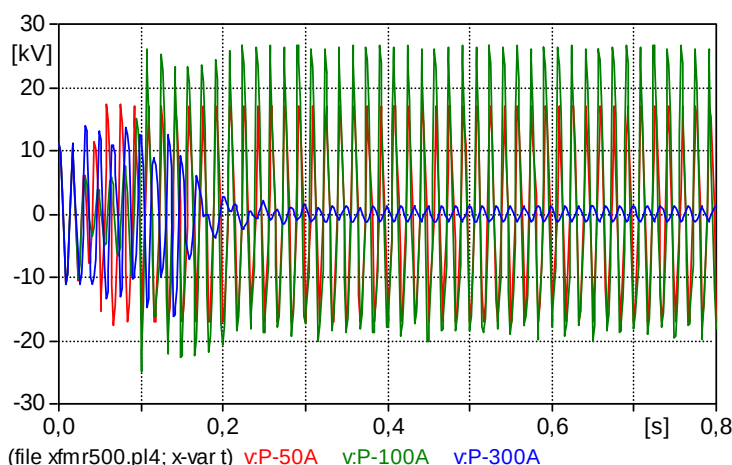


Fig. 6. 39: Tensões na Fase A no primário do transformador - (Híbrido – 500 kVA).

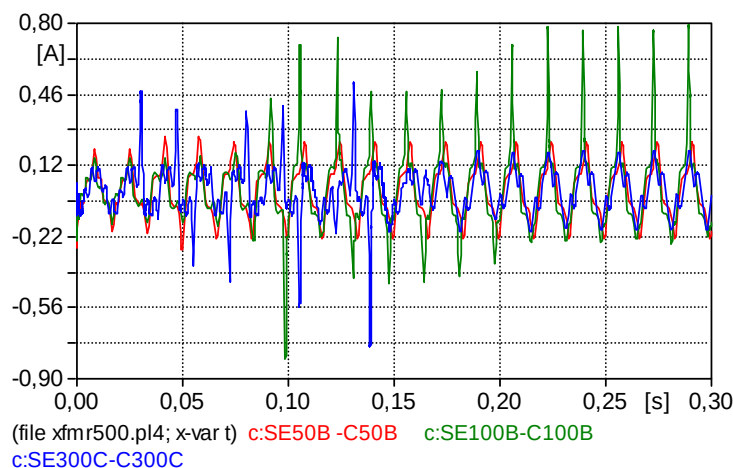


Fig. 6. 40: Correntes na Fase B no primário do transformador - (Híbrido – 500 kVA).

A metodologia utilizada a seguir, tem como objetivo avaliar possíveis sobretensões decorrentes do fenômeno da ferorrressonância em virtude da abertura simultâneas de duas fases, nesse caso as Fases A e B no primário do transformador. Deve-se frisar que essa abertura tenta reproduzir um defeito que pode ocorrer em equipamentos responsáveis pela proteção ou que tem como o objetivo a manobra do transformador. Deve-se salientar que nesta avaliação o transformador está operando em vazio, o que implica a presença de pequeno amortecimento atribuído às perdas no próprio equipamento e no cabo.

O tempo total de simulação será de 0,2 s e os pólos da chave que simula um equipamento de manobra serão abertos em 0,02 s. Para essa simulação, os cabos utilizados terão comprimentos de 50, 100 e 300 m. Entretanto, algumas simulações podem ter tempos de simulação maiores cujo objetivo é verificar a evolução da variável tensão com o tempo.

Os gráficos resultantes da simulação apresentam a tensão no primário do transformador para os três casos de cabos considerados. As tensões são identificadas pela letra P (primário) e em seguida por um número que representa o comprimento do circuito correspondente. Por exemplo, v: P-50A significa a tensão na fase A no ponto de conexão do primário do transformador. Interpretação semelhante pode ser feita com a nomenclatura utilizada para medição de corrente, cujo valor representa a corrente que passa pelo equipamento de manobra.

A nomenclatura utilizada na identificação das tensões e das correntes utilizadas no circuito simulado é fornecida a seguir:

- a) *Tensão no primário para comprimento de 50 m: cor vermelha*
- b) *Tensão no primário para comprimento de 100 m: cor verde*
- c) *Tensão no primário para comprimento de 300 m: cor azul*
- d) *Corrente no primário para comprimento de 50 m: cor vermelha*
- e) *Corrente no primário para comprimento de 100 m: cor verde*
- f) *Corrente no primário para comprimento de 300 m: cor azul*

A Tabela 6.10 sintetiza os valores de picos das sobretensões encontrados na Fase A do primário do transformador de 500 kVA em função da abertura monopolar para os três comprimentos do circuito: 50, 100 e 300 m.

Tabela 6. 10: Valores de picos das sobretensões em pu – 500kVA

Modelo	50 m	100 m	300 m
SATURABLE	1,52	1,8	Sem verificação
BCTAN	1,4	1,8	Sem verificação
Híbrido	1,4	1,93	1,23

6.3.3 Abertura (Fases A e B) – Transformador de 75 kVA

6.3.3.1 Caso 1 - Modelo SATURABLE

A metodologia utilizada nessa simulação é utilizar o modelo SATURABLE na representação do comportamento do transformador e verificar a resposta do sistema decorrente da utilização deste.

A Fig. 6.41 apresenta a tensão na Fase A no primário do transformador. Através dessa figura é possível verificar que o estado transitório ainda permanece no sistema por causa da mudança da topologia do circuito, uma vez que houve manobra simultânea em duas fases do circuito que alimenta o transformador. O tempo de simulação empregado nas seções anteriores é insuficiente para detectar o comportamento global da solução, ou seja, não é possível verificar com certa qualidade e nitidez a evolução das variáveis de estado do sistema, nesse caso apenas a tensão.

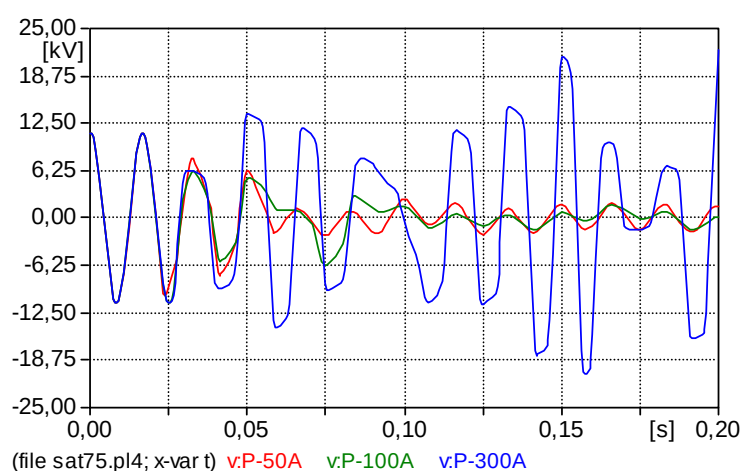


Fig. 6. 41: Tensões na Fase A no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA).

Para esse caso, também foi empregado um tempo de simulação maior (0,8 s) com o objetivo de verificar se a resposta entrou em regime permanente com elevados níveis de sobretensão, sendo apresentado na Fig. 6.42.

Com base na Fig. 6.42, as sobretensões foram mais severas do que aquelas apresentadas para o caso monopolar e verificou-se que o tempo de simulação de 0,2 s é pequeno quando se deseja visualizar a resposta do sistema em regime permanente. A sobretensão foi verificada para o circuito com comprimento de 300 m, enquanto para os cabos

de 50 e 100 m não foram verificadas sobretensões. O valor de pico da sobretensão apresentado em regime permanente foi de aproximadamente 5,0 pu tanto na Fase A quanto na Fase B.

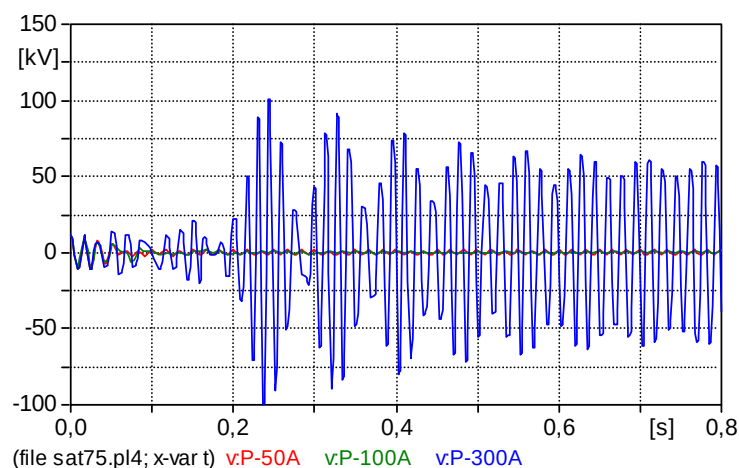


Fig. 6. 42: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador - (SATURABLE – 75 kVA).

A Fig. 6.43 mostra a tensão na Fase B (fase aberta) com elevados níveis de sobretensão que se mantém no sistema por muitos ciclos. Também nesta fase, a sobretensão ocorreu para o cabo de maior comprimento.

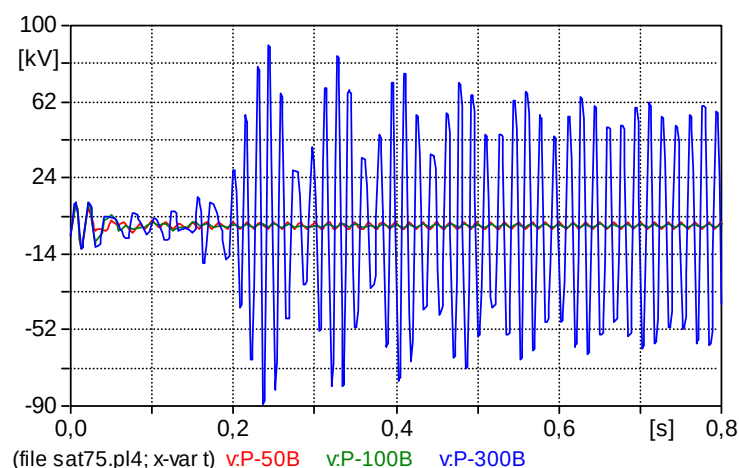


Fig. 6. 43: Tensões na Fase B (abertura simultânea) no primário do transformador – SATURABLE.

A Fig. 6.44 apresenta o resultado da corrente que circula na Fase C quando o sistema se encontra em estado de ferorrressonância. Esse valor de corrente reflete o estado de

saturação do núcleo magnético do transformador decorrente do valor de tensão presente em seus terminais. Trata-se de uma corrente fortemente distorcida que mantém uma relação não linear com o fluxo no núcleo do transformador.

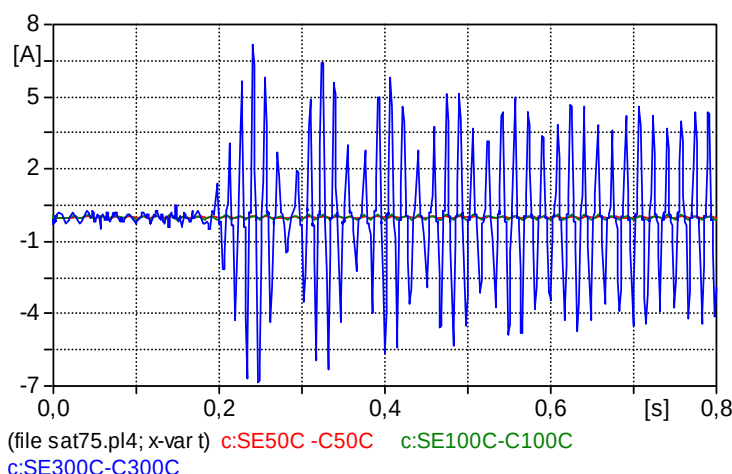


Fig. 6. 44: Corrente na Fase C no circuito ferorrressonante - (SATURABLE – 75 kVA).

6.3.3.2 Caso 2 – Modelo BCTRAN

A Fig. 6.45 apresenta o resultado da simulação através do modelo BCTRAN. Ao utilizar esse modelo para representar o comportamento do transformador, as formas de onda da tensão no primário do transformador apresentaram valores de sobretensão para o cabo de 50 e 300 m apresentando resultados semelhantes tanto na fase A quanto na fase B com pico de tensão de aproximadamente 2,9 pu depois de cessado o transitório para o circuito com cabo de 50 m, enquanto para 300 m houve sobretensão com pico de 8,2 pu e em regime permanente esta atingiu pico de aproximadamente 4,8 pu. Para o circuito com cabo de 100 m, não houve sobretensão.

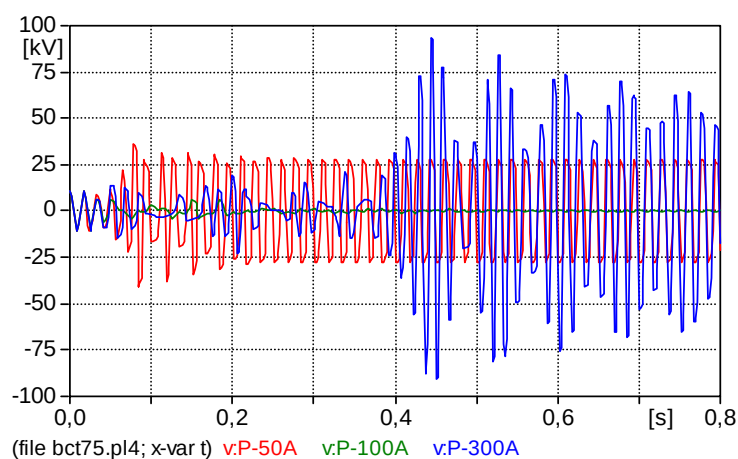


Fig. 6. 45: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador – BCTRAN.

A Fig. 6.46 apresenta o resultado da simulação para as tensões na Fase B, para os cabos de 50, 100 e 300 m como indicado na legenda presente na figura.

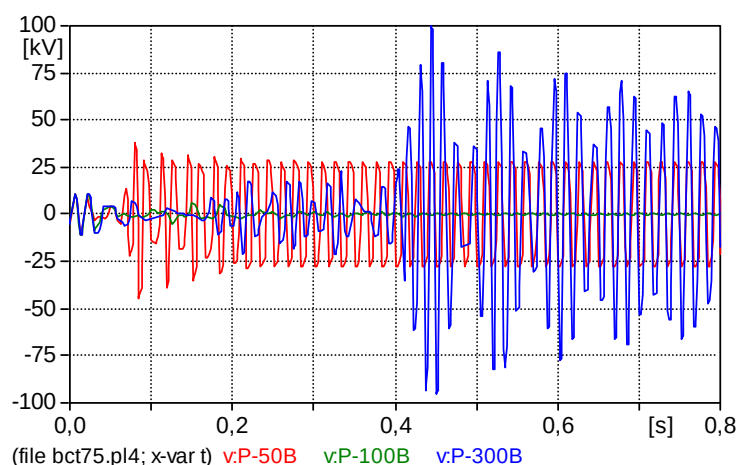


Fig. 6. 46: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador – BCTRAN.

A Fig. 6.47 apresenta a corrente que circula na Fase C como consequência da mudança da topologia do circuito. Trata-se de uma corrente com alto grau de distorção e sendo maior que a corrente a vazio do transformador.

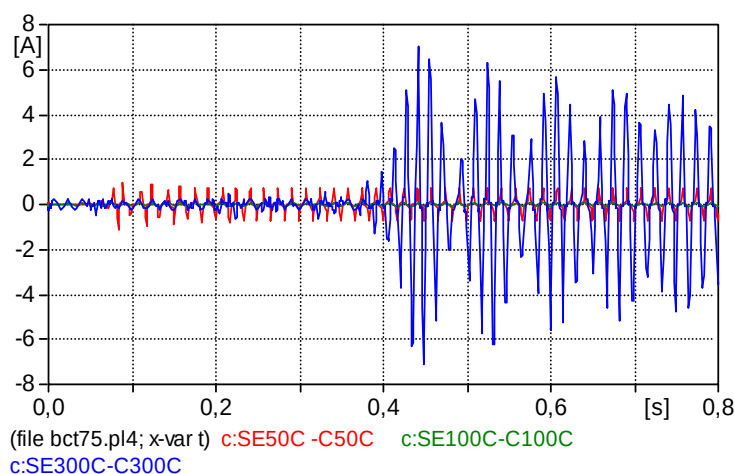


Fig. 6. 47: Corrente na Fase C no circuito ferorrressonante – BCTRAN.

6.3.3.3 Caso 3 – Modelo Híbrido

A Fig. 6.48 apresenta o resultado da simulação com o modelo híbrido. Consta-se a partir desse resultado, que as sobretensões foram moderadas quando comparadas com as respostas obtidas a partir do modelo SATURABLE e BCTRAN para o caso do circuito de 300 m e que elas estão presentes quando são utilizados os três comprimentos de cabos. Para o circuito que foi utilizado o cabo com comprimento de 50 m, as sobretensões em regime permanente tiveram picos de aproximadamente 2,9 pu tanto na fase A quanto na fase B. Para o cabo de 100m, podem ser verificados picos de tensão de 2,89 pu após o transitório inicial e no caso de 300 m podem ser verificados picos de tensão 2,6 pu de maneira sustentada.

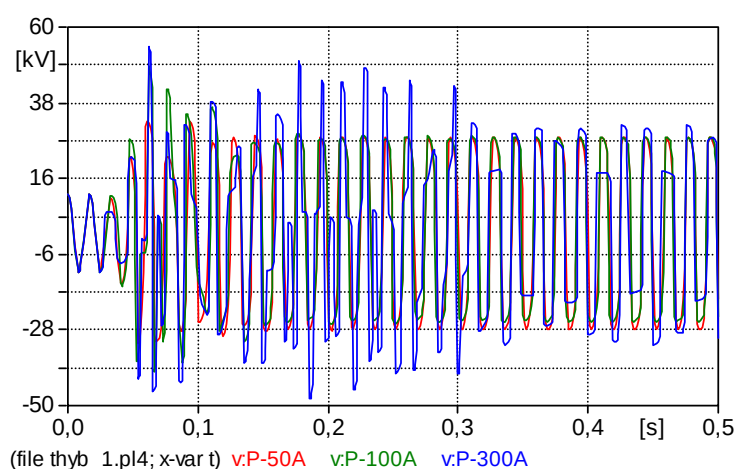


Fig. 6. 48: Tensões na Fase A (abertura simultânea) no primário do transformador – HÍBRIDO.

A Fig. 6.49 mostra o resultado da simulação do circuito para a Fase B. O comportamento das tensões no primário do transformador nessa fase foi semelhante ao caso da fase A.

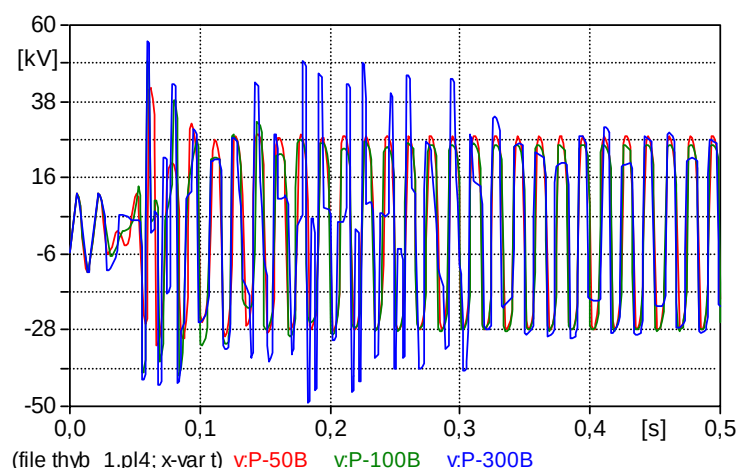


Fig. 6. 49: Tensões na Fase B (abertura simultânea) no primário do transformador – HÍBRIDO.

A Tabela 6.11 sintetiza os valores das sobretensões encontrados nas Fases A e B em função da abertura simultânea dessas fases para o caso do transformador de 75 kVA. Como as formas de onda das tensões encontradas nas duas fases foram iguais, a tabela apresentará apenas os dados oriundos da Fase A.

Tabela 6. 11: Valores das sobretensões em pu – Abertura Fases A e B – 75 kVA

Modelo	50 m	100 m	300 m
SATURABLE	Sem verificação	Sem verificação	5,0
BCTAN	2,9	Sem verificação	4,8
Híbrido	2,9	2,89	2,6

6.3.4 Abertura (Fases A e B) – Transformador de 500 kVA

Para as simulações a seguir será utilizado um transformador de 500 kVA em que será avaliado o nível de sobretensão em virtude do chaveamento simultâneo de duas de fases. Outro objetivo dessas simulações é verificar as repostas obtidas em virtude do tipo de modelo utilizado para representar o transformador.

6.3.4.1 Caso 1 – Modelo SATURABLE

A Fig. 6.50 apresenta o resultado da simulação com o transformador modelado através do modelo SATURABLE. Como se tem verificado nas simulações envolvendo abertura simultânea de duas fases, as sobretensões atingem picos elevados de tensão e perduram no sistema durante muito ciclos, mantendo-se em determinado nível de tensão após o transitório inicial. Alguns comentários podem ser feitos a partir da Fig. 6.50. Para esse tipo de manobra, as sobretensões ocorrem para os comprimentos de cabo de 50, 100 e 300 m. Para o circuito com comprimento de 50 m, a componente fundamental da sobretensão alcançou 2,4 pu e esta foi predominante no espectro de frequência da onda de tensão. Para o caso do comprimento de 100 m a sobretensão atingiu pico de aproximadamente 3,0 pu e permaneceu no sistema sem sinais de amortecimento aparente. Para o comprimento de 300 m, a onda de sobretensão foi altamente distorcida tendo picos superiores às ondas de sobretensão para 50 e 100 m respectivamente.

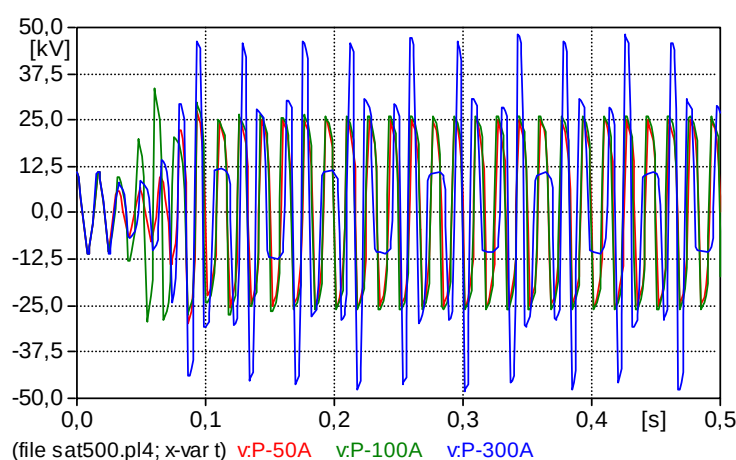


Fig. 6. 50: Tensões na Fase A no primário (abertura simultânea)
SATURABLE - 500 kVA.

As Figs. 6.51 a 6.53 apresentam as formas de onda referentes aos comprimentos de cabo de 50, 100 e 300 m respectivamente. Verifica-se com base nessas figuras, sobretensões elevadas e que se sustentam no sistema por muitos ciclos.

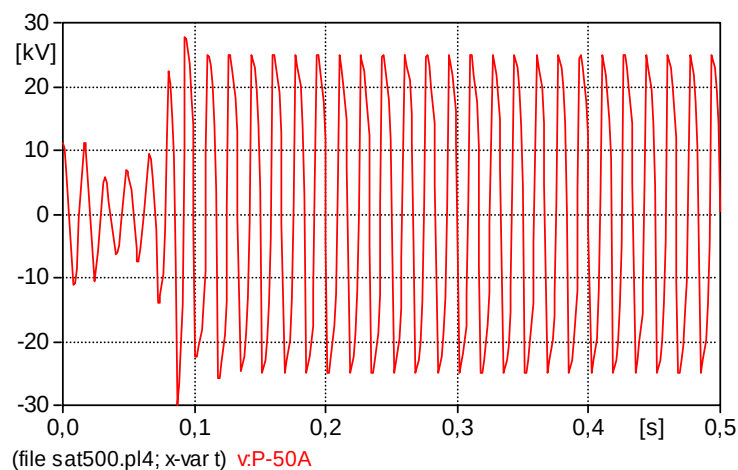


Fig. 6. 51: Forma de onda de tensão para
50 m (abertura simultânea) – Fase A – SATURABLE.

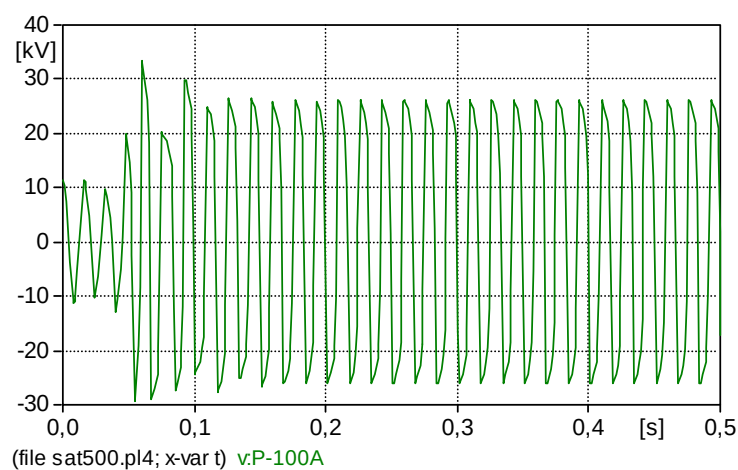


Fig. 6. 52: Forma de onda de tensão para
100 m (abertura simultânea) – Fase A – SATURABLE.

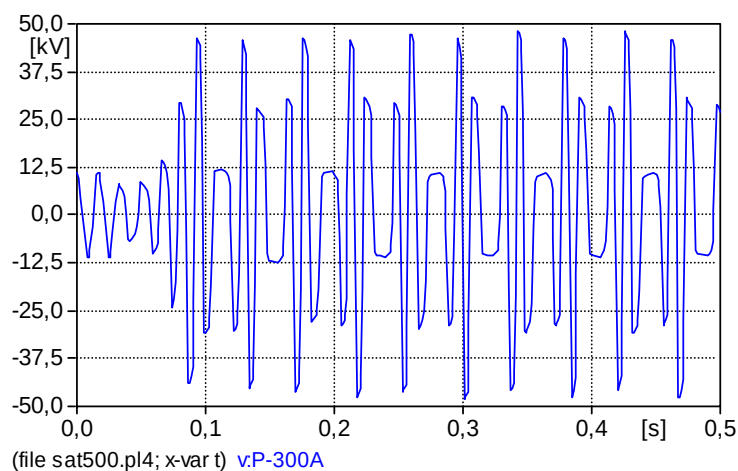


Fig. 6. 53: Forma de onda de tensão para
300 m (abertura simultânea) – Fase A – SATURABLE.

As formas de onda de tensão na Fase B no primário do transformador foram semelhantes às obtidas na Fase A.

A Fig. 6.54 mostra a forma de onda de corrente que circula pelo circuito em condição de ferorressonância. A principal característica é que ela é altamente distorcida e maior que a corrente a vazio do transformador quando ele está com tensão nominal aplicada.

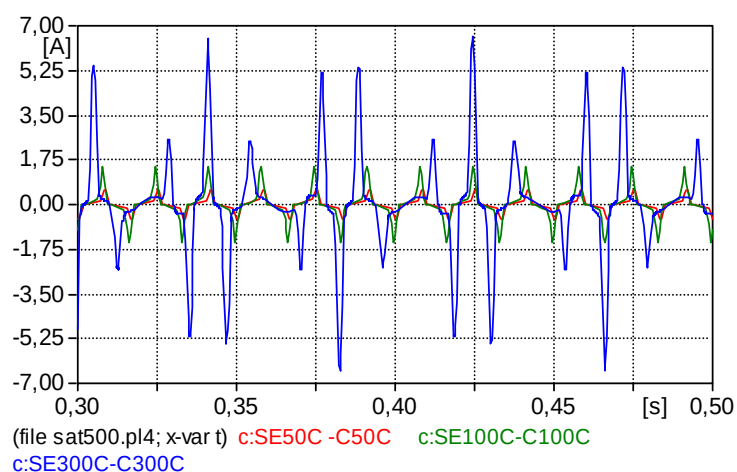


Fig. 6. 54: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea) – SATURABLE – 500 kVA.

6.3.4.2 Caso 2 – Modelo BCTRAN

A Fig. 6.55 apresenta o resultado da simulação com o transformador sendo modelado a partir do modelo BCTRAN.

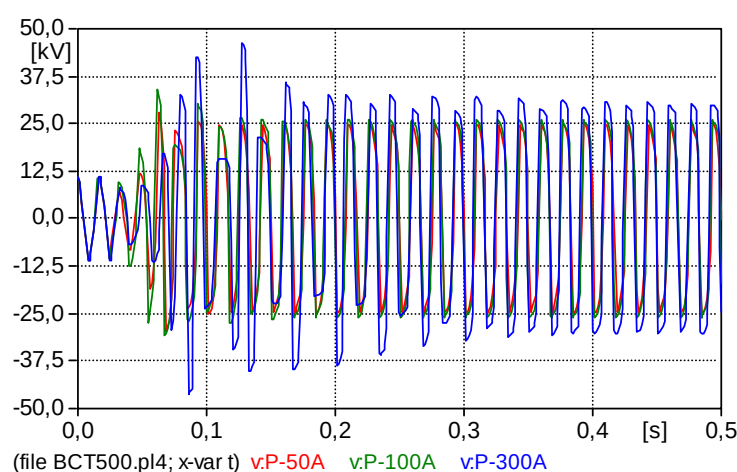


Fig. 6. 55: Tensões na Fase A no primário (abertura simultânea) – BCTRAN – 500 kVA.

Constata-se através da Fig. 6.55 que ocorrem sobretensões para os três comprimentos de cabo. Ao comparar o resultado obtido utilizando o modelo BCTRAN com o resultado obtido a partir do SATURABLE, verifica-se que eles apresentam formas de onda semelhantes o que pode ser comprovado pelas formas de onda apresentadas pelas Figs. 6.56, 6.57 e 6.58, para os circuitos de 50, 100 e 300 m respectivamente.

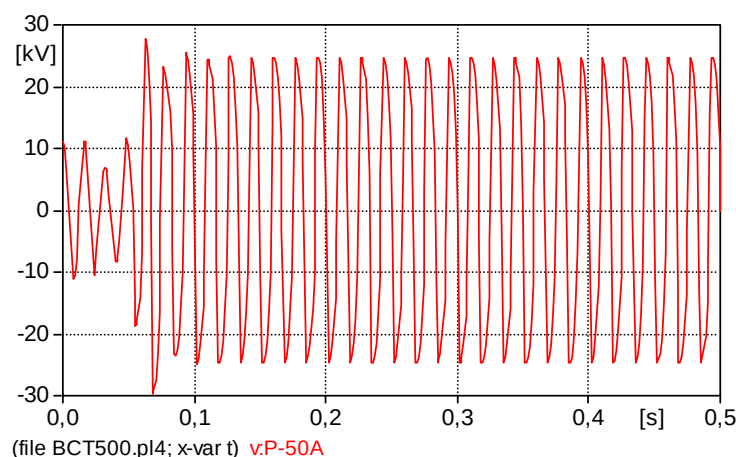


Fig. 6. 56: Forma de onda de tensão para 50 m (abertura simultânea) – Fase A – BCTRAN.

Com base Fig. 6.56, a sobretensão permaneceu estável com valor de 2,2 pu apresentando-se de forma distorcida o que caracteriza a presença de harmônicas.

A Fig. 6.57 apresenta a tensão na Fase A no primário do transformador para circuito de 100 m. O nível de sobretensão alcançado pelo circuito foi semelhante ao obtido para o caso de 50 m.

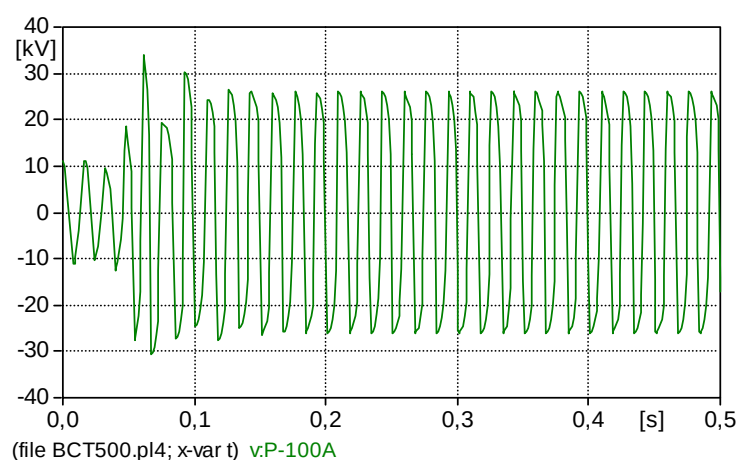


Fig. 6. 57: Forma de onda de tensão para 100 m (abertura simultânea) – Fase A – BCTRAN.

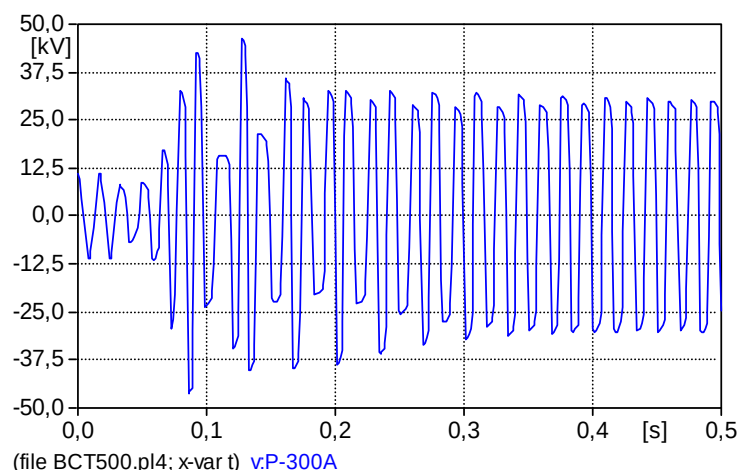


Fig. 6. 58: Forma de onda de tensão para 300 m (abertura simultânea) – Fase A – BCTRAN.

A Fig. 6.58 apresenta a forma de onda da tensão na Fase A no primário do transformador para comprimento do circuito de 300 m. A sobretensão foi mais elevada quando comparada com as sobretensões obtidas para os circuitos com comprimentos de 50 e 100 m. O valor de pico alcançado foi de 3,4 pu com característica sustentada.

A Fig. 6.59 mostra a forma de onda de corrente que circula por cada circuito (50, 100 e 300 m) em condição de ferorrressonância. A principal característica é que ela é altamente distorcida e maior que a corrente a vazio do transformador quando ele está com tensão nominal aplicada. Verifica-se também que ocorre maior valor de corrente para o circuito com maior comprimento de cabo.

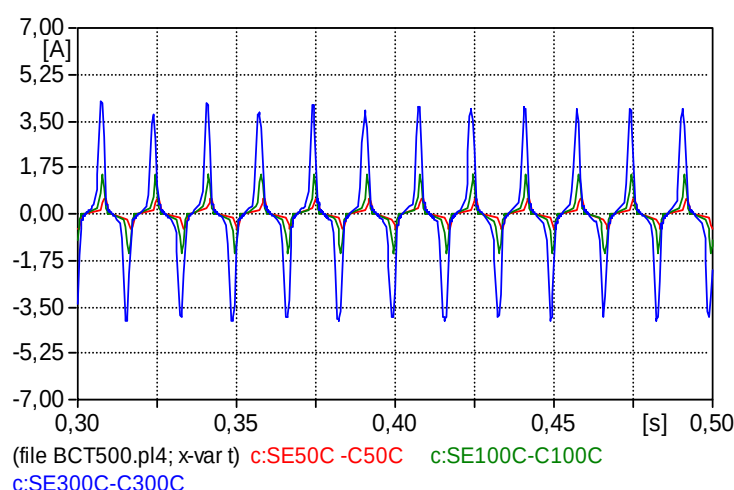


Fig. 6. 59: Corrente na fase C no primário do transformador (abertura simultânea) – BCTRAN – 500 kVA.

6.3.4.3 Caso 3 – Modelo Híbrido

A Fig. 6.60 apresenta o resultado da simulação com o transformador sendo a partir do modelo híbrido.

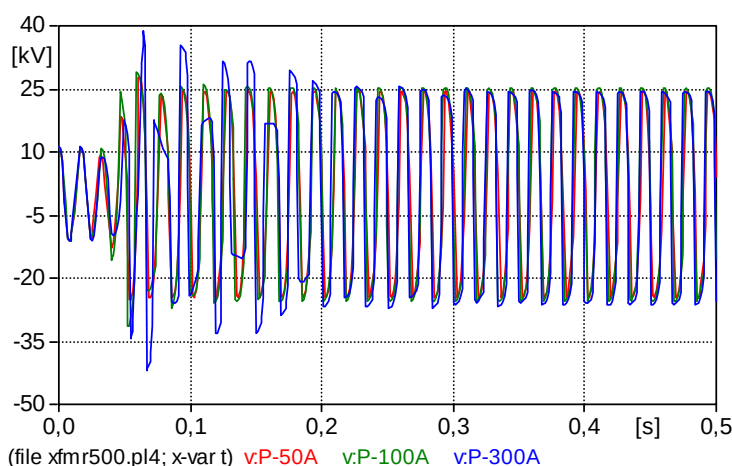


Fig. 6. 60: Tensões na Fase A no primário (abertura simultânea) – Híbrido – 500 kVA.

Verifica-se com base na Fig. 6.60 que as formas de onda apresentadas para os comprimentos de 50, 100 e 300 m são praticamente coincidentes com pico de tensão de aproximadamente 2,2 pu de maneira sustentada. As Figs. 6.61 a 6.63 apresentam as formas de onda da tensão para cada comprimento de circuito separadamente.

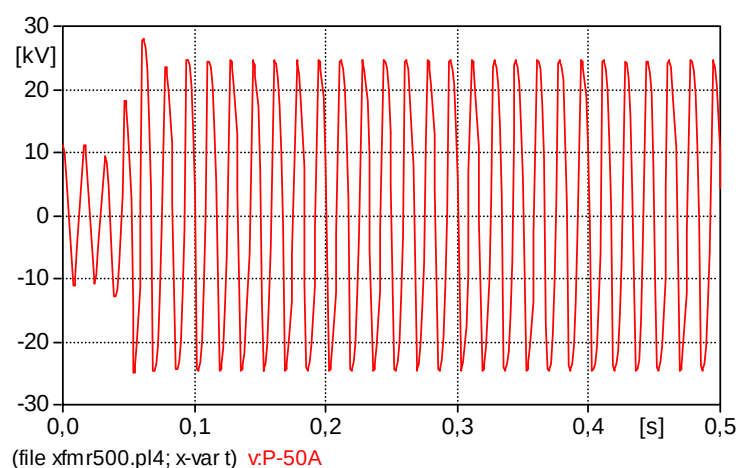


Fig. 6. 61: Forma de onda de tensão para 50 m (abertura simultânea) – Fase A – Híbrido

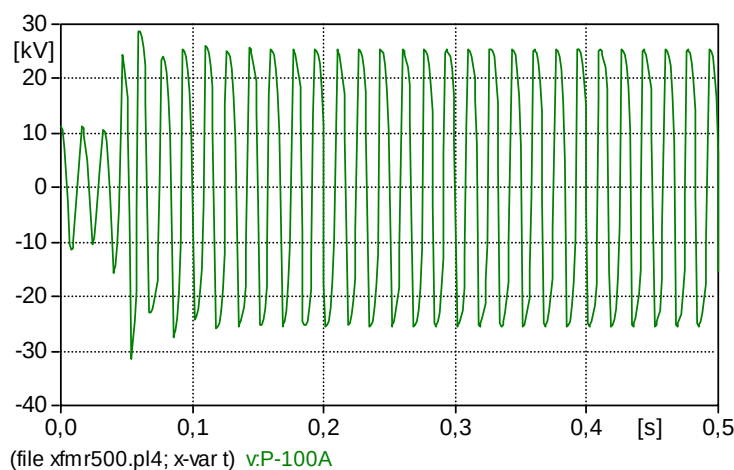


Fig. 6. 62: Forma de onda de tensão para 100 m (abertura simultânea) – Fase A – Híbrido.

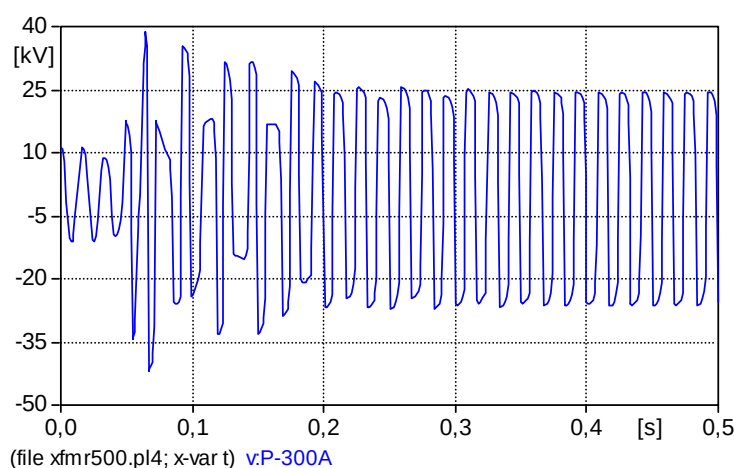


Fig. 6. 63: Forma de onda de tensão para 300 m (abertura simultânea) – Fase A – Híbrido.

As Figs. 6.61 a 6.63 apresentam como principal característica a predominância da componente fundamental em sua forma de onda, com presença de harmônicas. Ao alterar a faixa de valores no eixo tempo, visualiza-se uma onda na forma quadrada. Procurou-se mostrar aqui apenas a forma de onda da Fig. 6.63, na Fig.6.64. Isto ocorre devido à saturação do núcleo magnético que responsável pelo aparecimento da forma de onda apresentada na Fig. 6.64. Esta característica é encontrada em (FERRACI, 1998).

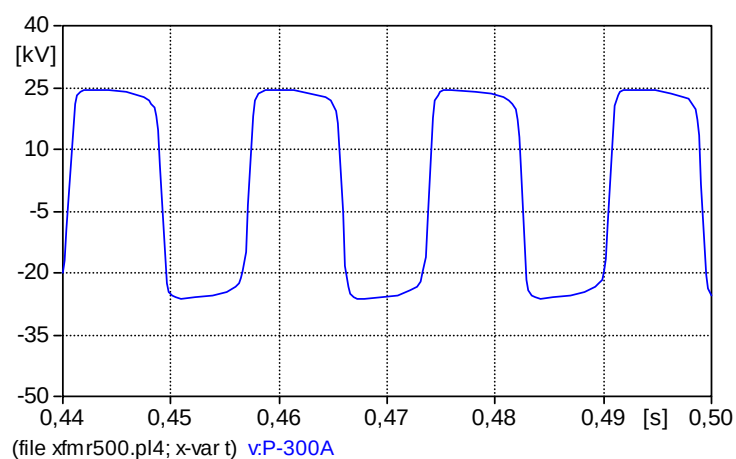


Fig. 6. 64: Visualização de onda quadrada da Fig. 6. 63.

As Figs. 6.65 a 6.67 apresentam as formas de onda da corrente que circula pela Fase C para cada comprimento de circuito correspondente.

Pode ser verificado a partir da Fig. 6.65 que as formas de onda apresentam distorção, reflexo da presença de harmônicas decorrentes da saturação do núcleo magnético do transformador.

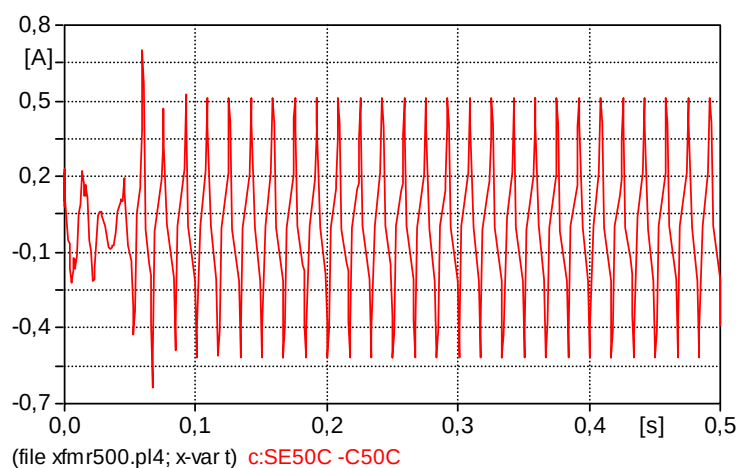


Fig. 6. 65: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea – 50 m) Híbrido – 500 kVA.

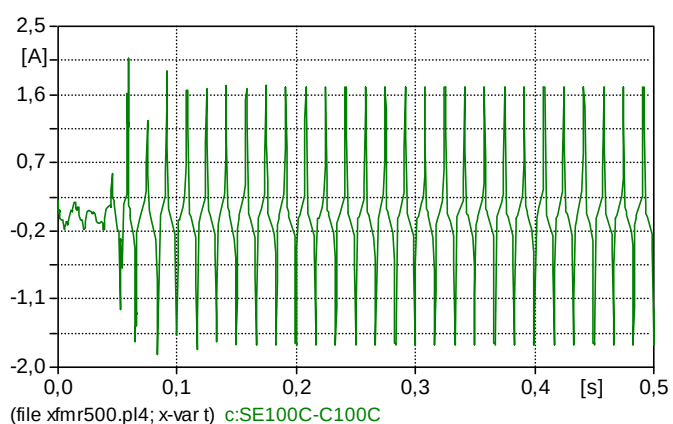


Fig. 6. 66: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea – 100 m) Híbrido – 500 kVA.

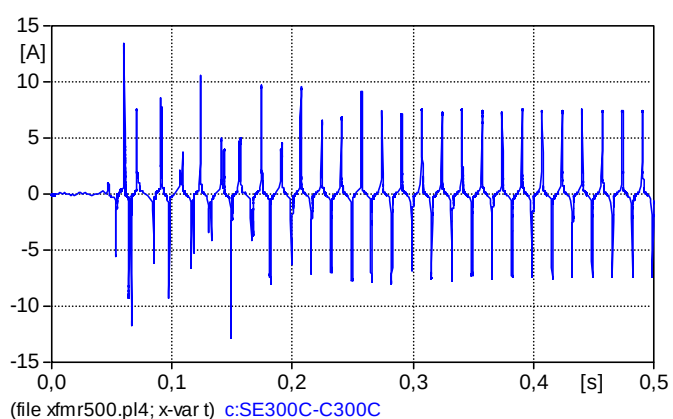


Fig. 6. 67: Corrente na Fase C no primário do transformador (abertura simultânea – 300 m) Híbrido – 500 kVA.

A Tabela 6.12 sintetiza os valores de pico das sobretensões encontrados nas Fases A e B em função da abertura simultânea dessas fases e do tipo de modelo de transformador utilizado para o caso do transformador de 500 kVA. Como as formas de onda das tensões encontradas nas duas fases foram iguais, a tabela apresentará apenas os dados oriundos da Fase A.

Tabela 6. 12: Valores das sobretensões em pu – Abertura Fases A e B – 500 kVA

Modelo	50 m	100 m	300 m
SATURABLE	2,4	3,0	4,11
BCTAN	2,2	3,0	4,1
Híbrido	2,5	2,56	3,43

6.4 Efeitos da carga no secundário do transformador

O objetivo desta subseção é investigar a influência do carregamento do transformador no amortecimento das sobretensões. A análise consiste em colocar no secundário um valor de carga igual a 1% da capacidade nominal de cada transformador e efetuar a medição da tensão quando é realizada a abertura simultânea de duas chaves. É evidente que são inúmeras as combinações possíveis para estudar a influência da carga no aparecimento do fenômeno tais como, provocar a abertura de uma chave e variar a carga no secundário verificando o comportamento da tensão para o nível de carga correspondente, como também é possível simular a abertura simultânea de duas chaves e analisar a forma de onda de tensão em função do percentual de carregamento do transformador. Entretanto, a metodologia que será adotada nesse trabalho é estabelecer a carga de 1% da capacidade nominal e simular a abertura simultânea de duas chaves. Essa escolha está relacionada com os valores de sobretensão e o tempo de duração que o sistema ficou sujeito em virtude deste tipo de chaveamento. Deve-se ressaltar ainda, que cada transformador será representado por cada modelo apresentado em seções anteriores.

6.4.1 Transformador de 75 kVA

6.4.1.1 Modelo SATURABLE

A Fig. 6.68 apresenta o resultado da simulação com o transformador modelado através do modelo SATURABLE e com carga de 1% no secundário. Nessa simulação a carga será considerada 100 % resistiva sendo representada por um ramo RLC em estrela, cujo valor da resistência por fase é igual $64,6 \, \Omega$. Com base na Fig. 6.68, a carga produz um efeito de amortecimento no circuito com os três comprimentos de cabo.

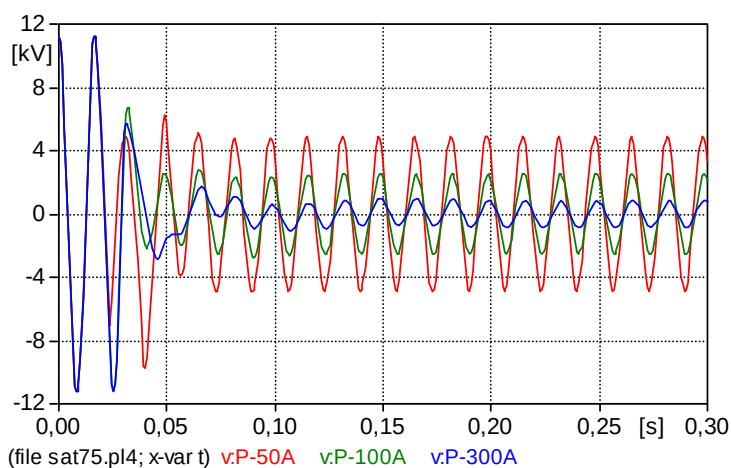


Fig. 6. 68: Formas de onda da tensão na Fase A com 1% de carga – 75 kVA – SATURABLE.

As Figs. 6.68 e 6.69 mostram que tanto na Fase A quanto na Fase B as tensões não alcançaram valores de picos superiores ao valor de pico nominal, diferentemente de quando ocorreu a mesma manobra com o transformador em vazio.

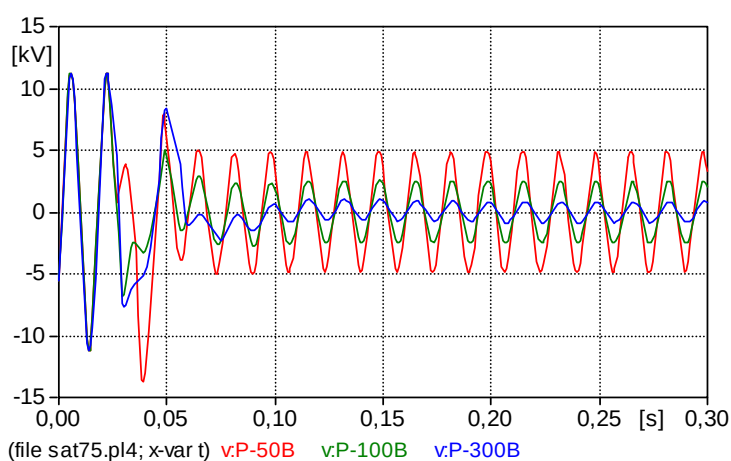


Fig. 6. 69: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga – 75 kVA – SATURABLE.

6.4.1.2 Modelo BCTRAN

A Fig. 6.70 apresenta o resultado da simulação com o transformador sendo modelado através do modelo BCTRAN. Esta figura mostra as formas de onda de tensão para os três comprimentos de cabo, com carga de 1% no secundário do transformador. Nesse caso também, não foram verificadas sobretensões, tanto na Fase A quanto na Fase B.

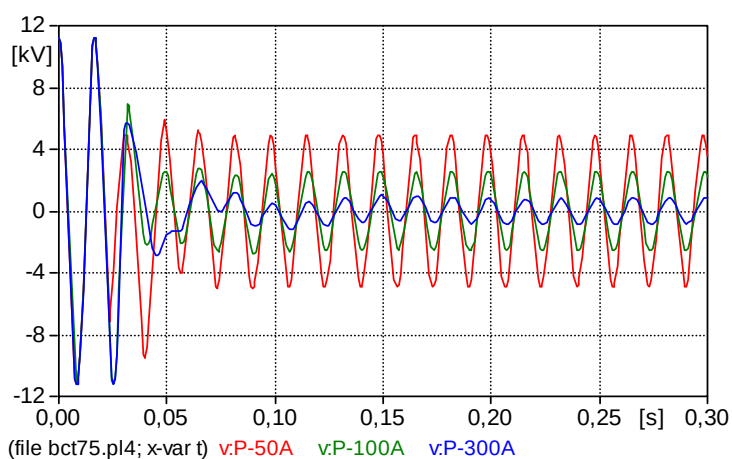


Fig. 6. 70: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga – 75 kVA- BCTRAN.

A Fig. 6.71 mostra a forma de onda da tensão para cada comprimento de cabo na Fase B. Nesse caso também não foram verificadas a ocorrência do fenômeno da ferorrressonância.

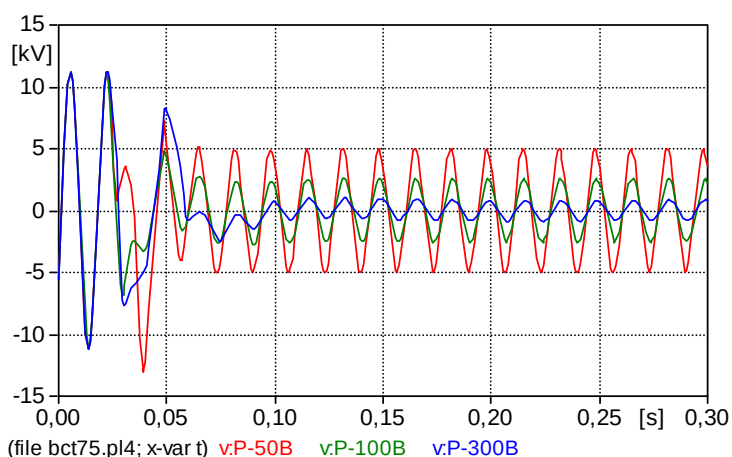


Fig. 6. 71: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga – 75 kVA – BCTRAN.

6.4.1.3 Modelo Híbrido

A Fig. 6. 72 apresenta o resultado da simulação com a representação feita através do modelo híbrido.

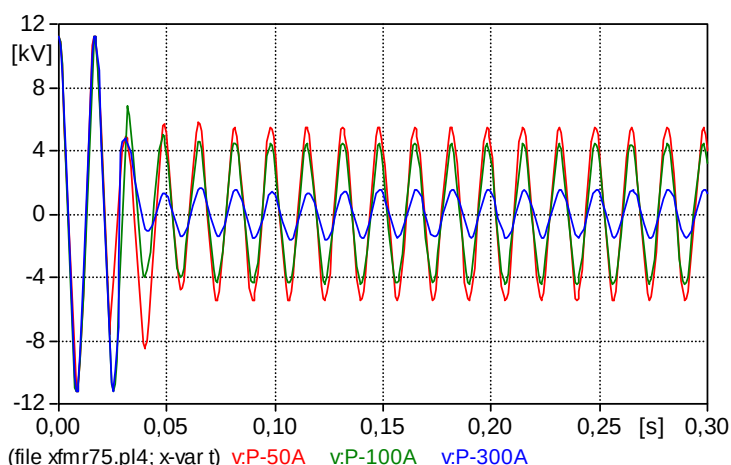


Fig. 6. 72: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga – 75 kVA – Híbrido.

Com base na Fig. 6.72, não foram verificadas sobretensões quando a carga com valor correspondente a 1% da potência nominal do transformador foi adicionada ao secundário, tanto para Fase A no primário do transformador quanto para Fase B, o que pode ser verificado na Fig. 6.73.

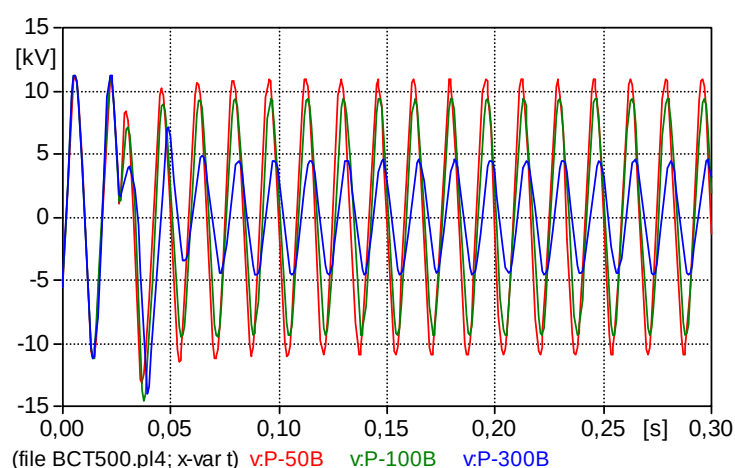


Fig. 6. 73: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga 75 kVA – Híbrido.

6.4.2 Transformador de 500 kVA

6.4.2.1 Modelo SATURABLE

A Fig. 6.74 mostra o resultado da simulação com o transformador de 500 kVA sendo modelado a partir do modelo SATURABLE para formas de onda da tensão na Fase A no

primário do transformador. Verifica-se com base nesta figura que não há presença de sobretensões para os três comprimentos de cabo que constituem cada circuito.

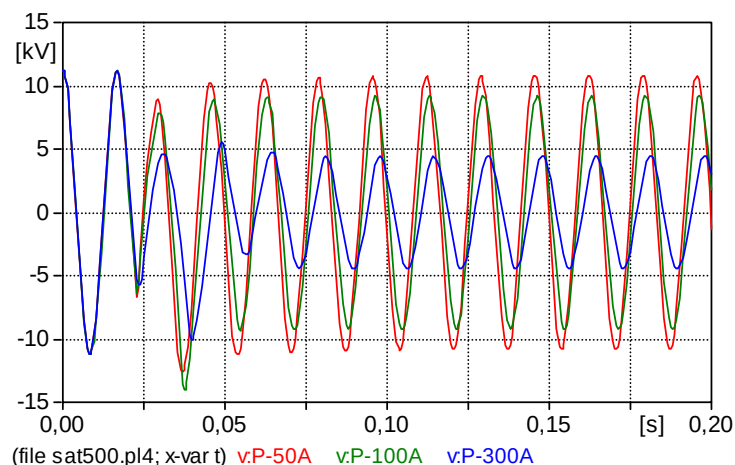


Fig. 6. 74: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga
500 kVA – SATURABLE.

A Fig. 6.75 mostra as formas de onda da Fase B no primário do transformador.

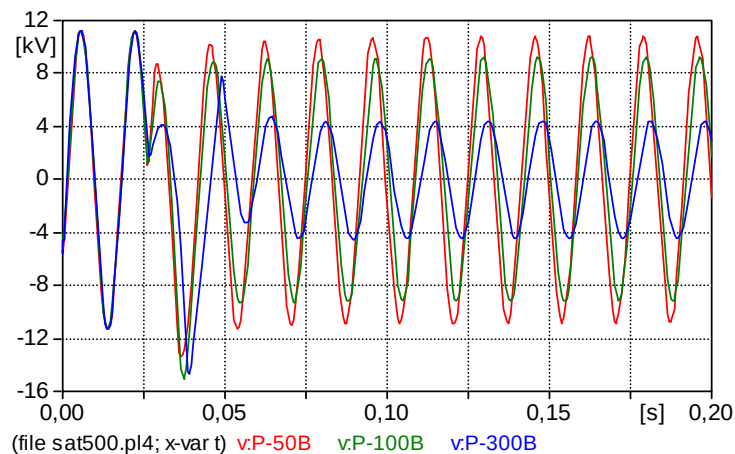


Fig. 6. 75: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga
500 kVA – SATURABLE.

6.4.2.2 Modelo BCTRAN

A Fig. 6. 76 mostra o resultado da simulação com o transformador de 500 kVA sendo modelado a partir do modelo BCTRAN para formas de onda tensão na Fase A no primário do transformador.

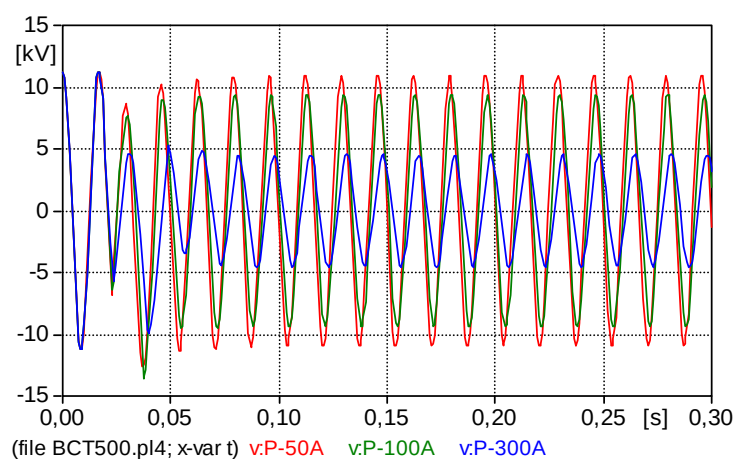


Fig. 6. 76: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga
500 kVA – BCTRAN.

A partir da Fig. 6. 76 é possível verificar que não ocorrem sobretensões quando há presença de carga no secundário.

A Fig. 6.77 mostra as formas de onda da Fase B no primário do transformador.

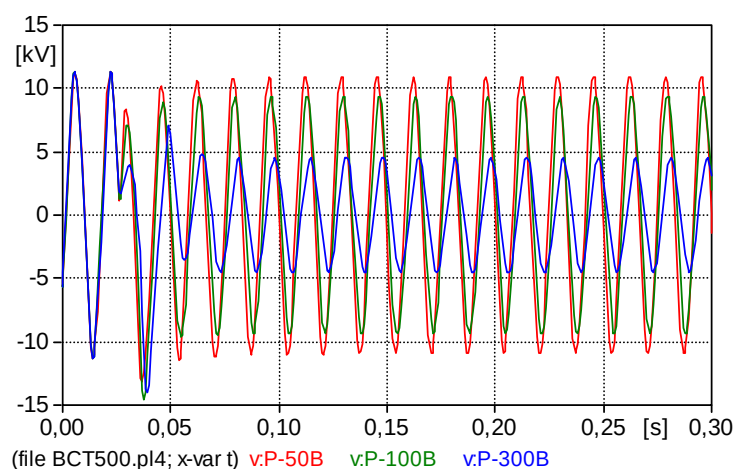


Fig. 6. 77: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga
500 kVA – BCTRAN.

6.4.3.3 Modelo Híbrido

A Fig. 6. 78 mostra o resultado da simulação com o transformador de 500 kVA sendo modelado a partir do modelo híbrido para formas de onda tensão na Fase A no primário do transformador. Verifica-se com base nesta figura que não foram verificadas sobretensões para os três comprimentos de cabo de cada circuito separadamente.

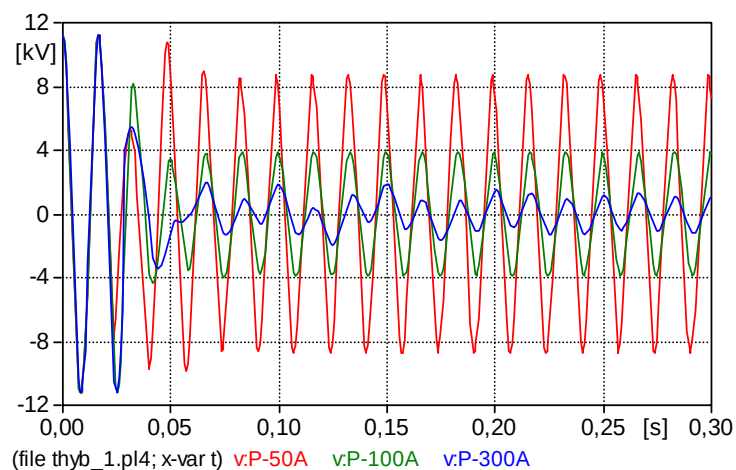


Fig. 6. 78: Formas de onda de tensão na Fase A com 1% de carga
500 kVA – Híbrido

A Fig. 6.78 mostra as formas de onda da Fase B no primário do transformador. Elas são semelhantes às formas de onda da Fase A.

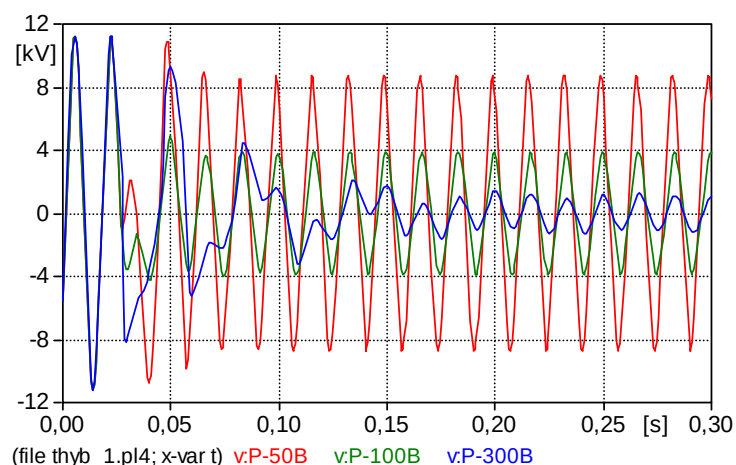


Fig. 6. 79: Formas de onda de tensão na Fase B com 1% de carga
500 kVA – Híbrido

Para a Fase B, como é mostrada na Fig. 6.79 a tensão de pico para cada comprimento de circuito é menor do que a tensão de pico da tensão nominal.

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

7.1 Conclusões

A ferrorressonância é um fenômeno não-linear de característica oscilatória que pode produzir sobretensões elevadas altamente distorcidas prejudicando os componentes do sistema elétrico. A verificação das causas de sua ocorrência ou detecção de risco iminente devido a algum procedimento de operação requer a utilização de modelos adequados de transformadores cujo objetivo é tentar reproduzir o comportamento do componente real. Uma das maneiras de se estudar o fenômeno da ferrorressonância é a partir da utilização de simuladores digitais de transitórios eletromagnéticos, dentre os quais se destaca o programa ATP.

Para o caso específico do transformador, no ATP existem atualmente três modelos que podem ser utilizados na sua representação. Cada um possui as suas especificidades, o que pode resultar em respostas diferentes quando se estuda, por exemplo, a ferrorressonância. Recentemente, foi implementado no ATP um modelo avançado de transformadores, o qual é conhecido como modelo híbrido (XFMR) que leva em consideração as características geométricas do transformador, como, por exemplo, altura de colunas, comprimento de jugos, seção transversal dos fios que constituem os enrolamentos, número de espiras, altura de enrolamentos, além do tipo de material de que é constituído o núcleo. No entanto, essas informações nem sempre são fornecidas pelos fabricantes desses equipamentos, especialmente para fins de estudos acadêmicos, o que torna difícil a comparação entre um modelo considerado avançado, como o HÍBRIDO e modelos mais simples, como são os casos dos modelos SATURABLE e BCTRAN.

Nesse trabalho, foram realizadas simulações de situações ferrorressonantes em transformadores trifásicos de distribuição de potências nominais distintas e também para

manobras envolvendo abertura monopolar e bipolar. A capacitância foi suprida por cabos de diferentes comprimentos. O sistema elétrico simulado é semelhante às configurações de sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica principalmente para empreendimentos que requerem cabos subterrâneos. Os três modelos distintos de transformadores citados acima foram utilizados para sua modelagem.

Embora as simulações não tenham sido comparadas com casos reais, considera-se que a dissertação apresenta uma contribuição importante para o entendimento do fenômeno da ferorressonância e devido à simulação com o modelo híbrido, o qual ainda é muito pouco utilizado pela comunidade científica. Além disso, as simulações mostraram que, para certas situações as respostas obtidas com cada modelo foram bem semelhantes e que em outras situações houve divergências significativas. Desta forma, conclui-se que há casos em que a utilização de um determinado modelo pode apresentar resultados mais confiáveis do que outros. Também foi verificada a importância do comprimento dos cabos para a ocorrência do fenômeno, destacando-se que nem sempre os cabos de maior comprimento são responsáveis por gerar as maiores sobretensões. Outro aspecto importante foi a verificação de que cargas leves podem ser capazes de evitar a ocorrência de sobretensões devido à ferorressonância.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser citados:

1. Validação dos resultados com casos reais de ferorressonância gerados em laboratórios ou fornecidos por oscilografias de concessionárias de energia elétrica;
2. Simulação de condições ferorressonantes envolvendo bancos de capacitores série ou *shunt*;
3. Análise da ferorressonância em transformadores de potencial capacitivos;
4. Estudo dos modos ferorressonantes.

REFERÊNCIAS

AUER, G. G.; SCHULTZ, A. J.; **An analysis of 14.4/24.9 kV grounded-wye distribution system overvoltages**, Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 75, pp. 31-34, August 1954.

BETHENOD, J. **Sur Le transformateur et resonance**, L'Eclairage Electrique, pp. 289-296, Novembro 1907.

BOUCHEROT, P. **Éxistence de Deux Régimes en ferro-résonance**, R.G.E., pp. 827-828, Dezembro 1920.

BUIGUES, G.; MAZÓN, A. J.; SAN MARTÍN, J. I.; VALVERDE, V.; ZAMORA, I. **Ferroresonance in three-phase Power distribution transformers: sources, consequences and prevention**, presented at the 19th Int. Conf. on Electricity Distribution, Vienna, 2007.

BUTLER, J. W.; CONCORDIA, C. **Analysis of series capacitor application problems**, *AIEE Trans.*, vol. 56, pp. 975-988, Agosto 1937.

BRANDWAJN, V.; DOMMEL, H.W.; DOMMEL, I.I. **Matrix representation of three-phase n-winding transformers for steady-state and transient studies**, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 101, no. 6, pp. 1369-1378, Junho 1982.

CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

CHAUDHARY, A.K.S; GIESBRECHT, W.J; HASSAN, I.E.; IRAVANI, M.R.; KERI, J.F; LEE, K.C; MARTINEZ, J.A; MORCHED, A.S; MORK, B.A; PARNIANI, M.; SHARSHAR, M.; SHIRMOHAMMADI, D.; WALLING, R.A; WOODFORD, D.A. **Modeling and analysis guidelines for slow transients – Part III: The study of ferroresonance slow transients task force of the IEEE working group on modeling and analysis of systems transients using digital programs**, IEEE Trans. Power Del., vol.15, no.1, pp. 255-265, January 2009.

DOMMEL, H. W., **EMTP Theory Book**, University of British Columbia, Vancouver, Canada, August 1986.

DOMMEL, H. W., **Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 88, no.4, April 1969.

DURBAK, D.; MARTIN-ARNEDO, J.; MARTINEZ, J.A.; MORK, B.A.; WALLING, R. **Parameter determination for modeling system transients – Part III: Transformers**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no.3, pp. 2051-2061, July 2005.

DUGAN, R. C.; NEDWICK, P.; SANTOSO, S. **Modeling ferroresonance phenomena in an underground distribution system**, presented at the Int. Conf. on Power Systems Transients (IPST), Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

DUGAN, R. C. **Examples of ferroresonance in distribution systems**, Power Engineering Society General Meeting, vol. 2, pp. 1213-1215, July 2003.

FERRACI, P. **Ferroresonance**, Cahier Technique n° 190, Groupe Schneider, 1998.

GREENWOOD, A., **Electrical Transients in Power Systems**, 2. ed. Canada: John Wiley & Sons, 1991.

HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. New York: CRC PRESS, 2000.

HEATHCOTE, M. J. **J&P Transformer Book**. 30. ed. New York: Elsevier, 2007.

HOPKINSON, R. H. **Ferroresonant overvoltage control based on TNA tests on three-phase delta-wye transformer banks**, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 101, no. 6, pp. 1258-1265, October 1968.

HOPKINSON, R. H. **Ferroresonance during single phase switching of 3 – phase distribution transformer banks**, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 101, no. 6, pp. 1258-1265, April 1965.

HORAK, J., **A Review of Ferroresonance**, presented at the 57th Conference for Protective Relay Engineers, 2004.

HUI, M.; ZHANG, Y.; LIU, C. **Elimination of Chaotic Ferroresonance in Power System With Nonlinear Core Loss**, presented the ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009.

IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std. C57.12.90, 1999.

IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers, IEEE Std. C57.12.91, 2001.

IEEE Guide for Transformer Loss Measurement, IEEE Std.123,2002.

IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distributions Systems, IEEE C57.105TM-1978 (R2008).

JACOBSON, D.A.N.; MENZIS, R.W. **Investigation of station service transformer ferroresonance in Manitoba Hydro's 230 kv Dorsey Converter Station**, presented at the International Conference on Power Systems Transients IPST, Rio de Janeiro, June 2001.

KULKARNI, S. V.; KHAPERDE, S. A. **Transformer Engineering: Design and Practice**. New York: Marcel Dekker, 2004.

LEUVEN EMTP CENTER, **Alternative Transients Program Rule Book**, Heverlee, Belgium: Leuven EMTP Center, 1987.

MARTINEZ, J. A.; MORK, B. A. Transformer **Modeling for Low Frequency Transients – the state of the art**, presented at the Int. Conf. on Power Systems Transients, New Orleans, USA, 2003.

MARTINEZ, J. A.; MORK, B. A. **Transformer modeling for low and mid frequency transients – A review**, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1625-1631, April 2005.

MORK, B. A.; GONZALEZ, F.; ISHCENKO, D.; STUEHM, D. L.; MITRA, J., **Hybrid transformer model for transient simulation - Part I: development and parameters**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, January 2007.

MORK, B. A.; GONZALEZ, F.; ISHCENKO, D.; STUEHM, D. L.; MITRA, J., **Hybrid transformer model for transient simulation - Part II: laboratory measurements and benchmarking**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, January 2007.

PARKS, O. C.; GIRGIS, A. A.; FRICK, M. E. **Simulating ferroresonance in a series compensated distribution network**, presented at the Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, vol.1, pp. 162-167, August 2002.

PEIXOTO, E. B., **Impacto dos defeitos das linhas e redes de distribuição na qualidade de energia elétrica**, Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador/2004.

PRIKLER, L; HOIDALEN, H. K., **ATPDRAW Version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista – Users’ Manual**, Norwegian University of Technology Trondheim, Norway, November 2009.

ROY, M.; ROY, C. K. **Experiments on ferroresonance at various line conditions and its damping**, Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008.

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

SHORT, T. A. **Electric power distribution handbook**. New York: CRC Press, 2004.

VALVERDE, V.; MAZÓN, A.J.; ZAMORA, I.; BUIGUES, G. **Ferroresonance in voltage transformers: analysis and simulations**, presented at the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), Sevilla, Spanish, 2007.

WALLING, R. A.; BARKER, K. D. **Ferroresonant overvoltages in grounded wye-wye padmount transformers with low loss silicon steel cores**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no.3, pp. 1647 – 1660, July 1993.

WALLING, R. A. **Ferroresonance in low loss distribution transformers**, Power Engineering Society General Meeting, vol. 2, pp. 1220-1222, July 2003.