

ESTUDO DE UM TAP HVDC BIDIRECIONAL EM FLUXO DE ENERGIA

Felipo Corrêa Machado

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

Prof. Luis Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2006

MACHADO, FELIPO CORRÊA

Estudo de um Tap HVDC Bidirecional
em Fluxo de Energia [Rio de Janeiro] 2006

XVIII, 96 p. 29,7cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação de Mestrado - Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Transmissão em Corrente Contínua
2. Tap HVDC
3. Conversores cc-ca

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida.

*Ao professor Maurício Aredes pelo apoio, insistência, amizade e dedicação
destinados à confecção desta Dissertação.*

*A todos os familiares, em especial aos meus pais, que me incentivaram no decorrer
de mais essa etapa da minha vida.*

*A minha esposa Fernanda pelo apoio e compreensão justo nos nossos primeiros
meses de matrimônio.*

Aos amigos e funcionários do Laboratório de Eletrônica de Potência.

A todos vocês, meu

Muito Obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DE UM TAP HVDC BIDIRECIONAL EM FLUXO DE ENERGIA

Felipo Corrêa Machado

Setembro/2006

Orientador: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

Os modelos de Tap HVDC unidirecionais em fluxo de energia proporcionam acesso de pequenos e médios consumidores a um Sistema HVDC em qualquer ponto do elo cc, podendo ter suas cargas supridas por este sem influenciar em sua operação. Este trabalho vem apresentar a proposta de um novo Tap HVDC com topologia tal que permita que tanto consumidores quanto geradores possam se conectar ao Sistema HVDC e realizar intercâmbio de energia com este, descaracterizando os Sistemas HVDC como sistemas de transmissão ponto-a-ponto. O sistema ca local pode ser isolado ou estar conectado a um sistema ca qualquer com o qual o Tap HVDC deverá ser sincronizado.

A nova topologia se propõe a manter o mesmo nível de confiabilidade e estabilidade original do Sistema HVDC ao qual estará conectada. No circuito de alta tensão do Tap HVDC Bidirecional tem-se três Pontes-H em série com o elo cc. Para compor cada Ponte-H, quatro GTO são dispostos de forma tal que permite o controle do sentido da corrente sobre o capacitor e o enrolamento do transformador no ramo central. A potência envolvida é da ordem de 5 % da potência do elo cc, o que justifica o tipo de conexão proposto para este conversor.

Para composição da tensão trifásica os enrolamentos secundários de cada um dos três transformadores são conectados em Y. Este conversor cc-ca transforma corrente contínua em tensão alternada utilizando chaveamento PWM para entregar ao sistema ca energia de qualidade. Para isto, o sistema de controle de cada Ponte-H tem como objetivo controlar a tensão no secundário dos transformadores do Tap HVDC atuando na referência de corrente a ser aplicada no primário dos transformadores. O sistema completo, compreendendo o Sistema HVDC, o Tap HVDC e um Sistema ca, é modelado no simulador PSCAD, de onde são apresentados os resultados obtidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A BIDIRECTIONAL LOAD FLOW HVDC TAP STUDY

Felipo Corrêa Machado

September/2006

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

The unidirectional load flows HVDC Tap models provide access to small sized and medium sized consumers to HVDC System in any point of the dc link, which may have their loads supplied by the HVDC Tap with no influence in its operation. The present work intends to present a proposal of a new HVDC Tap with a topology which allow not only consumers but also generators to connect themselves to the HVDC System and perform an interchange of power with it, not characterizing the HVDC Systems as point-to-point transmissions. The local ac system can be isolated or be connected to any other ac system in which the HVDC Tap must be synchronized.

The new topology intends to keep the same level of reliability and original stability with the HVDC System that it will be connected. In the Bidirectional HVDC Tap high voltage circuit, there are three H-Bridges in series with the dc link. To compose each H-Bridge, four GTO are disposed in order to allow the control of the current in the passive elements of H-Bridge. The power is about 5 % of the dc link power, which justify the type of connection proposed to this converter.

To compose the three phase voltage, the secondary of the transformers are connected in Y. The dc-ac converter changes the continuous current in three phase voltage using PWM techniques to deliver to the ac system energy with quality. For this porpouse, the control of each H-Bridge controls the secondary voltages acting in the reference of current to be applied in the primary of the transformers. The complete system, embracing the HVDC system, the Bidirectional HVDC Tap and ac system, is modelated in the PSCAD simulator, where the results were obtained from.

Sumário

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xviii
1 Introdução	1
1.1 Identificação do Problema	5
1.2 Motivação	7
1.3 Objetivos do Trabalho	8
1.4 Estrutura do Texto	8
2 O Tap HVDC e sua conexão com o sistema HVDC	10
2.1 Definições e Tipos de Derivações em Sistemas HVDC	11
2.2 Histórico do Tap HVDC	13
2.3 Proposta para o Tap HVDC Bidirecional	16
2.4 O Novo Circuito do Tap HVDC Bidirecional	19
3 Modelagem do Tap HVDC	21
3.1 Princípios Básicos de Funcionamento	22
3.1.1 Determinações das tensões, correntes e das potências envolvidas	24
Potência calculada pelo método convencional	25
Potência calculada pela Teoria p-q	25
3.2 A Ponte-H	27
3.2.1 Modos de Operação da Chave-H e da Ponte-H	28
O funcionamento da Chave-H do Tap HVDC Unidirecional	28
O funcionamento da Ponte-H do Tap HVDC Bidirecional	30
3.2.2 Cálculo do Capacitor da Ponte-H	32
3.3 O Banco de Transformadores	33
3.3.1 Transformador convencional com núcleo de ferro	34

3.3.2	Transformador com núcleo de ar	36
	Redimensionamento para obter o banco trifásico	38
3.4	Controlador do Tap HVDC	42
3.4.1	Corrente de controle	43
3.4.2	Minimização da potência reativa consumida pelo banco de transformadores	44
3.4.3	Sincronização com o sistema ca	46
3.4.4	Geradores de onda triangular	47
3.4.5	Geração de tempo morto	48
3.4.6	Chaveamento unipolar	48
4	Análise do desempenho do conversor cc-ca	52
4.1	O Simulador PSCAD	53
4.2	Sistema ca local	54
4.3	Distúrbios	56
4.3.1	Variação da corrente do elo cc	56
4.3.2	Variações de carga	56
4.3.3	Variações da fonte ca	56
4.4	Resultados de simulação	58
4.4.1	Caso 1: sistema ca com geração local e operando com banco de transformadores com núcleo de ar	58
	Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 4,0$ s	58
	Resultados - $2,75 < t < 2,95$ s	64
4.4.2	Caso 2: sistema ca sem geração local e operando com banco de transformadores com núcleo de ar	71
	Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 1,4$ s	71
	Resultados - $0,55 < t < 0,75$ s	74
4.4.3	Caso 3: sistema ca sem geração local e operando com banco de transformadores com núcleo de ferro	75
	Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 1,2$ s	77
	Resultados - $0,55 < t < 0,65$	80
4.4.4	Caso 4: o Tap HVDC Bidirecional inserido em um Sistema HVDC completo	82
	O <i>CIGRÉ HVDC Benchmark</i>	83
	Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 2,0$ s	84
5	Conclusões	88
5.1	Conclusões	89
5.2	Propostas para trabalhos futuros	90
	Chaveamento com ZVS e ZCS	90
	Novas Topologias	90

Novo Controlador com ajustes independentes de módulo e ângulo	92
Transformadores e Capacitores	93
Referências Bibliográficas	94

Lista de Abreviações e Símbolos

$\alpha\beta 0$	Sistema de referências estacionário
ω	Frequência angular
θ	Defasagem entre tensão e corrente
a	Relação de espiras
a, b, c	Fases
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
C	Capacitor paralelo do Tap HVDC Unidirecional
C_H	Capacitor da Chave-H ou da Ponte-H
C_{cc}	Capacitor do barramento cc do Tap HVDC Unidirecional
ca	Corrente alternada
cc	Corrente contínua
$COPPE$	Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia
$\cos(\alpha)$	Cosseno do ângulo de disparo das chaves de um retificador controlado
$\cos(\phi)$	Cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente na respectiva fase
D_1 e D_2	Diodos
e	Erro entre $y(t)$ e a tensão de entrada do EPLL
$EPLL$	Enhanced Phase Locked Loop
f_{ca}	Frequência do sistema ca
f_{PWM}	Frequência de chaveamento

fp Fator de potência
 G_1, G_2, G_3 e G_4 , Numeração de GTO
 GTO Gate Turn-Off Thyristor
 $HVDC$ High Voltage Direct Current
 i_D, I_D corrente no elo cc
 I_I Corrente fornecida pela Estação Inversora ao Sistema ca
 I_m Corrente de magnetização
 i_p Corrente de controle para compensação de potência ativa
 i_q Corrente de controle para compensação de potência reativa
 I_R Corrente fornecida pelo Sistema ca à Estação Retificadora
 i_α e i_β Correntes nas coordenadas $\alpha\beta$
 i_{AT_a}, i_{AT_b} e i_{AT_c} Correntes nos enrolamentos de alta tensão dos transformadores
 i_a, i_b e i_c Correntes nas coordenadas abc
 $I_{b_{AT_{5M}}}$ Corrente base do lado AT do Tap HVDC Unidirecional de 5 MW
 $I_{b_{AT}}$ Corrente base no lado AT
 i_{BT_a}, i_{BT_b} e i_{BT_c} Correntes nos enrolamentos de baixa tensão dos transformadores
 $I_{BT_{1\phi}}$ Corrente base no lado BT
 i_{C_a}, i_{C_b} e i_{C_c} Correntes nos capacitores das Pontes-H
 i_{cc}, I_{cc} Corrente na saída do barramento cc do Tap HVDC Unidirecional
 i_{Ch_a}, i_{Ch_b} e i_{Ch_c} Correntes nos ramos centrais das Pontes-H
 I_{Ch} Corrente no ramo central da Ponte-H do Tap HVDC Unidirecional
 i_{ctrl} Corrente de controle
 I_{DI1} Corrente na entrada do inversor do pólo positivo
 I_{DI2} Corrente na saída do inversor do pólo negativo
 I_{DR1} Corrente na saída do retificador do pólo positivo
 I_{DR2} Corrente na entrada do retificador do pólo negativo

I_{L1}	Corrente no enrolamento AT do transformador do Tap HVDC Unidirecional
I_{L2}	Corrente no enrolamento BT do transformador do Tap HVDC Unidirecional
$i_{tri_A}, i_{tri_B}, i_{tri_C}$	Ondas Triangulares para as fases a, b e c respectivamente
$IGBT$	Insulated Gate Bipolar Transistors
K	Ganho
k	Fator de acoplamento
K_i	Ganho do integrador
K_p	Ganho proporcional
L	Indutância
L_1	Indutância de dispersão do enrolamento no. 1
L_m	Indutância de magnetização do transformador
L_{115M}	Indutância do enrolamento AT do transformador do Tap HVDC Unidirecional de 5 MW
L_{11}	Indutância do lado AT
L_{225M}	Indutância do enrolamento BT do transformador do Tap HVDC Unidirecional de 5 MW
L_{22}	Indutância do lado BT
L_{LT}	Indutância da linha de transmissão
LT	Linha de Transmissão
M	Indutância mútua
m_x	Índice de modulação instantâneo ($x = a, b, c$)
M_{5M}	Indutância mútua do transformador do Tap HVDC Unidirecional de 5 MW
n	Relação entra a corrente no capacitor de filtro e a corrente no circuito filtrado
p	Potência ativa ou real
P_b	Potência ativa base
P_{ca}	Potência eficaz calculada nos terminais dos transformadores
p_{ca}	Potência instantânea calculada nos terminais dos transformadores

P_{cc}	Potência eficaz calculada nos terminais do Tap HVDC conectados ao elo cc
p_{cc}	Potência instantânea calculada nos terminais do Tap HVDC conectados ao elo cc
PLL	Phase Locked Loop
PWM	Pulse Width Modulation
q	Potência reativa ou imaginária
R	Resistência
R_{11}	Resistência do enrolamento primário
R_{22}	Resistência do enrolamento secundário
rms	Root mean square
S_b	Potência aparente base
$S_{b_{50M}}$	Potência aparente base do Tap HVDC Unidirecional de 50 MW
$S_{b_{5M}}$	Potência aparente base do Tap HVDC Unidirecional de 5 MW
$S_{trafo_{1\phi}}$	Potência aparente base para um transformador
SIN	Sistema Interligado Nacional
t_{morto}	Tempo morto (atraso) adicionado no bloqueio das chaves
$UFRJ$	Universidade Federal do Rio de Janeiro
V_I	Tensão no Sistema ca na saída da Estação Inversora
V_m	Valor de pico das tensões de fase
V_R	Tensão no Sistema ca na entrada da Estação Retificadora
v_α e v_β	Tensões nas coordenadas $\alpha\beta$
v_{AT_a} , v_{AT_b} e v_{AT_c}	Tensões nos terminais dos enrolamentos de alta tensão dos transformadores e sobre os capacitores
v_a , v_b e v_c	Tensões nas coordenadas abc
$V_{b_{AT}}$	Tensão base no lado de AT
$V_{b_{BT_{5M}}}$	Tensão base do lado BT do Tap HVDC Unidirecional de 5 MW
$V_{b_{BT}}$	Tensão base no lado do sistema ca

v_{BT_a}, v_{BT_b} e v_{BT_c}	Tensões nos enrolamentos de baixa tensão dos transformadores
$V_{BT_{1\phi}}$	Tensão base fase-neutro no lado BT
V_{cc}	Tensão no barramento cc
$v_{Ch_a}, v_{Ch_b}, v_{Ch_c}$	Tensões sobre as Pontes-H
V_{Ch}	Tensão no ramo central da Ponte-H do Tap HVDC Unidirecional
v_{col}	Valor eficaz coletivo de tensão
V_{DI1}	Tensão na entrada do inversor do pólo positivo
V_{DI2}	Tensão na saída do inversor do pólo negativo
V_{DR1}	Tensão na saída do retificador do pólo positivo
V_{DR2}	Tensão na entrada do retificador do pólo negativo
v_{erro}	Erro de tensão
V_{L1}	Tensão no enrolamento AT do transformador do Tap HVDC Unidirecional
V_{L2}	Tensão no enrolamento BT do transformador do Tap HVDC Unidirecional
V_{LL}	Tensão entre fases
V_{ref}	Tensão de referência
v_{tap}	Tensão sobre os terminais do Tap HVDC conectados ao elo cc
VSC	Voltage Source Converter
x	Índice que representa as fases a, b e c
X_C	Reatância capacitiva
X_L	Reatância Indutiva
x_{disp}	Reatância de dispersão
y	Sinal suavizado extraído da tensão de entrada do EPLL
$Z_{b_{AT}}$	Impedância base referida ao lado AT
$Z_{b_{BT}}$	Impedância base referida ao lado BT
ZCS	<i>Zero Current Switching</i>
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i>

Lista de Figuras

1.1	Comparativo dos custos de transmissão em cc e em ca em função do comprimento do sistema de transmissão.	4
1.2	Principais linhas de transmissão, centros geradores e consumidores do SIN.	5
2.1	Sistema HVDC e um conversor em derivação série com o pólo positivo deste.	12
2.2	Sistema HVDC e um conversor por pólo em derivação paralela. A operação com um só conversor é possível.	12
2.3	Tap HVDC Unidirecional inserido no pólo positivo do Sistema HVDC e identificação dos Sistemas ca a serem representados.	15
2.4	O Tap HVDC Unidirecional em detalhes.	15
2.5	Diagrama em blocos de um circuito proposto para o Tap HVDC Bidirecional.	16
2.6	Tap HVDC proposto por Aghaebrahimi e Menzies.	17
2.7	Circuito estudado anteriormente para o Conversor cc-cc do Tap HVDC Bidirecional.	18
2.8	Tap HVDC Bidirecional inserido no pólo positivo do Sistema HVDC e identificação dos Sistemas ca a serem representados.	18
2.9	Circuito proposto para o Conversor cc-ca do Tap HVDC Bidirecional.	19
3.1	Circuito de potência com as variáveis indicadas.	23
3.2	Funcionamento da Chave-H do Tap HVDC Unidirecional.	29
3.3	Funcionamento da Ponte-H do Tap HVDC Bidirecional.	31
3.4	Transformador do Tap HVDC redimensionado para o Tap HVDC de 25 MW.	38
3.5	Controlador do Tap HVDC Bidirecional.	42
3.6	Tensão de referência como função da corrente de controle para o Tap HVDC Bidirecional com banco de transformadores com núcleo de ar.	44
3.7	Tensão de referência como função da corrente de controle para o Tap HVDC Bidirecional com banco de transformadores com núcleo de ferro.	45
3.8	Diagrama em blocos do EPLL.	47
3.9	Ondas triangulares defasadas.	48

3.10	Circuito de controle do Tap HVDC Bidirecional.	50
3.11	Geração dos sinais de disparo dos GTO por interpolação e com adição de tempo morto de uma das Pontes-H (conforme implementado no PSCAD).	51
3.12	Chaveamento unipolar e geração de tempo morto: sinais de controle e disparo de uma das Pontes-H.	51
4.1	Diagrama unifilar do sistema ca local.	54
4.2	Corrente de controle fornecida pelo controlador PI do Tap HVDC Bidirecional.	59
4.3	Tensão de referência para os terminais do lado BT do banco de transformadores.	59
4.4	Potência ativa no lado AT do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor cc-ca para o sistema ca).	60
4.5	Potência reativa no lado BT do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).	60
4.6	Potência reativa no lado AT do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).	60
4.7	Potência reativa no lado BT do banco de transformadores sem minimizar o consumo de potência reativa (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).	61
4.8	Potência reativa no lado AT do banco de transformadores sem minimizar o consumo de potência reativa (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).	61
4.9	Tensões de linha na barra do sistema ca local.	62
4.10	Tensão média instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.	62
4.11	Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc com i_{tri_A} , i_{tri_B} e i_{tri_C} defasadas entre si.	63
4.12	Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc com gerador de onda triangular único ($i_{tri_A} = i_{tri_B} = i_{tri_C}$).	63
4.13	Tensão aplicada na entrada do PLL $v_{BT_a}(t)$ e tensão suavizada extraída $y(t)$	64
4.14	Amplitude da tensão suavizada e erro de tensão aplicado ao controlador PI.	64
4.15	Frequência angular detectada pelo PLL.	65
4.16	Sinal de sincronismo para o controlador.	65
4.17	Frequência angular detectada pelo PLL para o Caso 1.	65
4.18	Correntes de controle fornecidas pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.	66

4.19	Correntes nos enrolamentos do transformador com núcleo de ar da fase a.	66
4.20	Tensões nos terminais do transformador com núcleo de ar da fase a. . .	67
4.21	Tensões de linha na barra do sistema ca local.	67
4.22	Tensões sobre as Pontes-H.	68
4.23	Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.	68
4.24	Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc com gerador de onda triangular único ($i_{tri_A} = i_{tri_B} = i_{tri_C}$).	68
4.25	Tensão e corrente no GTO 1 da Ponte-H da fase a.	69
4.26	Tensão e corrente no GTO 2 da Ponte-H da fase a.	69
4.27	Tensão e corrente da fase a no lado BT e sinais de controle associados.	70
4.28	Corrente de controle fornecida pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.	71
4.29	Tensão de referência para o sistema ca.	71
4.30	Tensão média instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.	72
4.31	Tensão nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.	72
4.32	(a) v_{tap} com o conversor operando com 50 MW e $i_D = 2,61$ kA e (b) v_{tap} com o conversor operando com 50 MW e $i_D = 2,00$ kA.	73
4.33	Potências aparente, ativa e reativa consumidas pelo sistema ca.	74
4.34	Tensões coletivas no lado BT do banco de transformadores e na barra do sistema ca.	74
4.35	Correntes de controle fornecidas pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.	75
4.36	Tensões de linha na barra do sistema ca local.	75
4.37	Correntes nos enrolamentos do transformador com núcleo de ar da fase a.	76
4.38	Tensões nos terminais do transformador com núcleo de ar da fase a. . .	76
4.39	Corrente de controle fornecida pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.	77
4.40	Tensão de referência para o sistema ca.	77
4.41	Tensões de linha na barra do sistema ca local.	78
4.42	Potências aparente, ativa e reativa consumidas pela carga passiva. . .	79
4.43	Potência ativa nos dois lados do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).	79
4.44	Potência reativa nos dois lados do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).	79
4.45	Corrente no lado AT do transformador com núcleo de ferro da fase a.	80

4.46	Corrente no lado BT do transformador com núcleo de ferro da fase a.	80
4.47	Tensão nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.	81
4.48	Correntes de controle fornecidas pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.	81
4.49	Correntes nos enrolamentos do transformador com núcleo de ferro da fase a.	82
4.50	Tensões nos terminais do transformador com núcleo de ferro da fase a.	82
4.51	Tensões de linha na barra do sistema ca local.	82
4.52	Tap HVDC Bidirecional inserido no <i>CIGRÉ HVDC Benchmark</i> .	83
4.53	Tensão média instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional.	84
4.54	Tensão em p.u. na barra do sistema ca local.	85
4.55	Potência calculada nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.	85
4.56	Corrente na saída da Estação Retificadora.	86
4.57	Tensão na entrada da Estação Inversora.	86
4.58	Tensão na saída da Estação retificadora.	86
4.59	Tensão no meio do elo cc com o Tap HVDC Bidirecional operando.	87
4.60	Tensão no meio do elo cc sem o Tap HVDC Bidirecional operando.	87
5.1	Outra configuração para o Tap HVDC Bidirecional.	91
5.2	Uma proposta de configuração para o Tap HVDC Bidirecional baseada em acionadores de motores com chaveamento não dissipativo.	92

Lista de Tabelas

3.1	Características do transformador convencional com núcleo de ferro. . .	37
3.2	Características do transformador base calculado pelo prof. Portela. . .	39
3.3	Características do transformador com núcleo de ar.	41
4.1	Referências para variações de carga com o tempo.	57
4.2	Referências para variações de tensão da fonte ca e a potência resultante na barra.	57

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar os tópicos abordados nesta dissertação e situar o leitor sobre os temas aqui tratados. São apresentadas as principais vantagens da transmissão em corrente contínua em relação à corrente alternada, o problema identificado em uma das desvantagens da transmissão em corrente contínua que motivou este trabalho e a estrutura do texto.

”A direção é mais importante do que a velocidade.”

Robert Scaringella

O primeiro sistema de distribuição de energia elétrica em corrente contínua foi concebido e construído por Thomas Alva Edison entre 1878 e 1882. Desde então estes sistemas foram desenvolvidos com o objetivo de transmitir mais potência, alcançar distâncias maiores, diminuir as perdas e obter maior controlabilidade e confiabilidade, entre os principais. Assim, os sistemas de distribuição de energia elétrica foram disponibilizados para um número cada vez maior de consumidores e com qualidade sempre em evolução.

Mais de um século depois do projeto piloto, a concepção dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica continua praticamente a mesma, assim como os transformadores e as máquinas rotativas elétricas. Porém o mesmo não se pode dizer quanto aos níveis de potência em questão, pois na atualidade já operam, por exemplo, algumas linhas de transmissão de até alguns bilhões de watts. Também aumentaram a diversidade de fins de consumo, das técnicas utilizadas e dos materiais empregados.

O primeiro elo de transmissão em corrente contínua comercial começou a operar em 1954 (100 kV, 20 MW, 96 km de cabo submarino), interconectando a ilha de Gotland com a Suécia continental [1]. Com o advento da eletrônica de potência desde a metade do século passado, a substituição das válvulas de mercúrio por elementos semicondutores possibilitou inúmeras melhorias nesses sistemas e diversas outras aplicações no setor elétrico.

Muitos países já têm construídos grandes sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica fortemente malhados sobre regiões de densidades populacionais médias ou altas. Mas é notável também que em muitos dos países citados, países estes desenvolvidos, as regiões a serem cobertas e atendidas com o fornecimento de energia elétrica não se comparam às dimensões do nosso país, onde muitas regiões com grandes potenciais de desenvolvimento e crescimento econômico não dispõem de atendimento adequado.

O Brasil possui um grande potencial hídrico ainda não explorado que deverá ser aproveitado para aumentar o parque de geração. Estes recursos hídricos estão disponíveis em regiões afastadas dos grandes centros consumidores, compreendendo a Bacia do Tocantins e o Rio Madeira, além de outros. Para aproveitar este potencial será necessária a construção de grandes linhas de transmissão para interligar as

novas usinas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) [2]. Com isto, grandes linhas de transmissão de energia elétrica cruzarão todo o país por suas diversas regiões, incluindo localidades ainda não atendidas, fortalecendo a malha que interliga todo o SIN a fim de oferecer maior robustez, estabilidade e confiabilidade a este [3] e possibilitando o atendimento de novas áreas.

A maior parte do potencial hídrico disponível e a ser explorado em nosso país se encontra muito afastada dos grandes centros consumidores, e quase todo o potencial disponível nas regiões sul e sudeste já foi aproveitado, restando apenas locais para pequenas usinas geradoras. Para melhor aproveitar a energia vinda de regiões mais afastadas, a transmissão em corrente contínua (cc) é a melhor opção, se comparada à transmissão em corrente alternada (ca). Uma das vantagens é o menor custo por comprimento que faz o custo total da transmissão em cc ser menor para grandes distâncias.

A distância a partir da qual a transmissão em corrente contínua tem custo menor que a transmissão em corrente alternada é chamada de *break-even distance*. Esta distância pode assumir valores entre 500 e 1500 km para transmissão aérea, entre 24 e 48 km para transmissão por cabos submarinos, ou entre 48 e 96 km para transmissão por cabos subterrâneos [1]. Então, a partir do ponto definido como *break-even distance* o custo total de um sistema de transmissão cc é menor que o custo total de um sistema de transmissão ca convencional, mesmo incluindo os custos das estações retificadora e inversora. Na Figura 1.1 são mostrados os custos das transmissões em cc e em ca e como suas variações podem afetar a determinação do ponto *break-even distance* para a mesma potência transmitida.

Entretanto o Sistema HVDC (*High Voltage Direct Current*) se caracteriza como um sistema de transmissão ponto-a-ponto, da estação retificadora à estação inversora. Não existe a possibilidade de drenar ou injetar potência ao longo da linha pela conexão através de um transformador. O que existe de convencional é a conexão de outra estação retificadora ou inversora, com a contrapartida do grande aumento do custo. Com isto as regiões que seriam atravessadas pelos grandes sistemas de transmissão HVDC continuariam sem serem atendidas pelo serviço de fornecimento de energia elétrica - direito garantido de todo cidadão brasileiro e regulamentado por leis e decretos próprios.

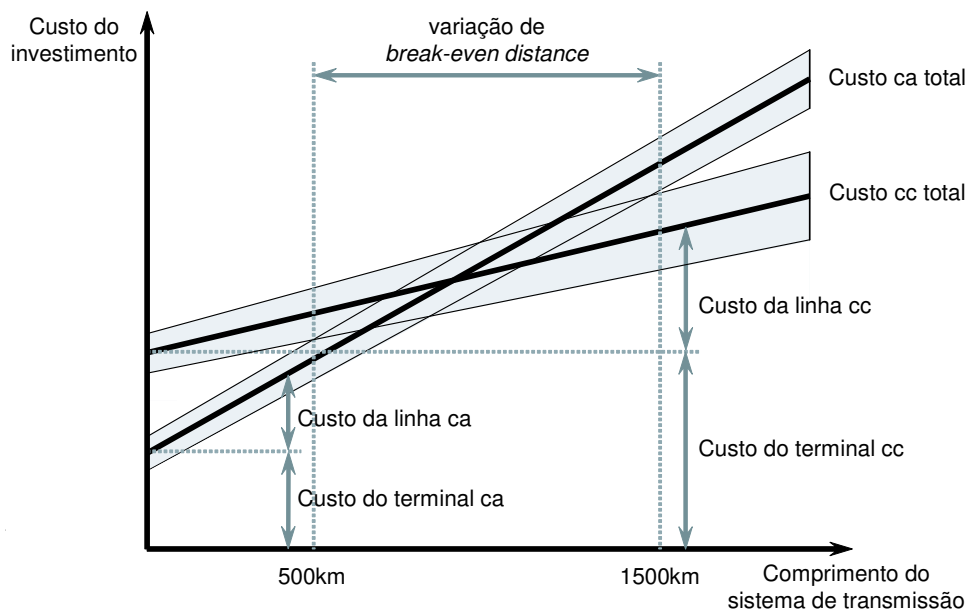


Figura 1.1: Comparativo dos custos de transmissão em cc e em ca em função do comprimento do sistema de transmissão.

Somos todos fortemente dependentes desta forma de energia. Recentes levantamentos realizados pelos estados e pelas concessionárias de energia revelam a existência de cerca de 100 mil comunidades e mais de 3 milhões de propriedades rurais desassistidas, representando cerca de 20 milhões de pessoas (11 % da população do país) sem energia elétrica [4]. O índice de atendimento com o fornecimento de energia elétrica chega, então, a 89 %. Este índice ultrapassa o da telefonia (59 %), o do saneamento básico (68 %) e o de abastecimento de água (82 %) [5]. Porém em muitos locais o atendimento fica longe dos padrões estabelecidos e cumpridos nos grandes centros urbanos no que se refere à qualidade.

Esta parcela de 11 % da população desassistida se localiza em grande parte em regiões de baixa densidade populacional e distantes dos grandes centros consumidores, onde grandes distâncias a serem transpostas para conectá-las aos sistemas existentes mais próximos tornam a distribuição de energia elétrica desinteressante economicamente, o que é agravado por ser a distribuição um serviço prestado por empresas privadas. Pode-se ter uma idéia do problema de isolamento de várias regiões observando a Figura 1.2 [6].

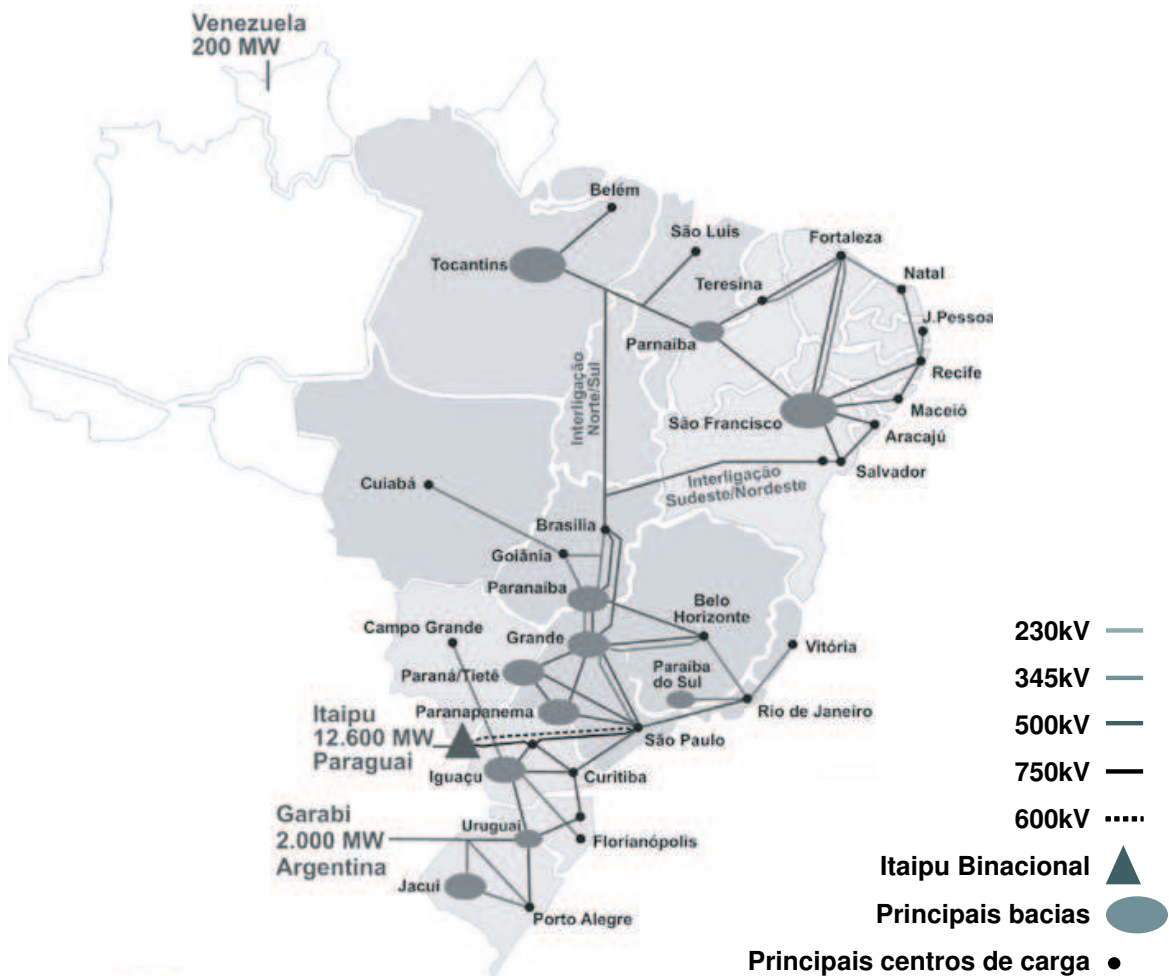


Figura 1.2: Principais linhas de transmissão, centros geradores e consumidores do SIN.

1.1 Identificação do Problema

Um dos fatores que possibilitou grande avanço na distribuição de energia elétrica foi o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos transformadores, que permitiram a transmissão em níveis elevados de tensão, reduzindo as perdas para transmissão em grandes distâncias e elevando a capacidade de transmissão, e a distribuição em níveis de tensão ideais para os diversos tipos de consumidores. Assim, os potenciais hídricos disponíveis em regiões afastadas dos grandes centros consumidores puderam ser aproveitados e os sistemas elétricos existentes puderam ser interligados, para maior aproveitamento dos recursos energéticos e incremento da confiabilidade dos mesmos. Com isto temos na atualidade os diversos níveis de tensão e a frequência padronizados, o que permitiu que os subsistemas de diferentes níveis de tensão, e

anteriormente de diferentes frequências, fossem interconectados formando o SIN, como visto na figura anterior. O SIN é composto pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, e apenas 3,4 % da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica [2].

Ao longo das linhas de transmissão, onde há a necessidade de realizar algum intercâmbio de energia, constroem-se subestações de acordo com a potência exigida e capacidade da linha. Ao longo de uma mesma linha temos várias subestações alimentando zonas industriais, urbanas ou rurais, ou mesmo fazendo intercâmbio de potência conectando esta linha a outras ou a unidades geradoras, com os transformadores conectando sistemas de diferentes níveis de tensão. O mesmo já não pode ser feito com a corrente contínua, onde emprega-se neste caso conversores cc-cc e cc-ca.

Na atualidade, grande parte do avanço da Engenharia Elétrica tem se dado com o desenvolvimento das chaves semicondutoras de potência, no ramo da Eletrônica de Potência, com aplicações em vários campos. Com isto foram desenvolvidos os Sistemas HVDC. Estes sistemas compõem-se de uma estação retificadora, a linha de transmissão (monopolar ou bipolar), e uma estação inversora. Estes sistemas apresentam também a vantagem de poderem ser usados para interconectarem sistemas assíncronos [1][7]. O maior exemplo que temos é o Sistema HVDC de Itaipú, por onde vem a energia comprada dos geradores paraguaios que operam em 50 Hz, que é distribuída em ca 60 Hz a partir de São Paulo [8].

No Brasil, a importação de equipamentos faz com que as vantagens econômicas da transmissão em corrente contínua em relação à corrente alternada apareçam para distâncias ainda maiores que nos países que detém tais tecnologias. Para estes casos de grandes distâncias porém, uma dificuldade se encontra na legislação que proíbe a construção de troncos de transmissão atravessando territórios sem qualquer ramificação e conseqüente atendimento à comunidades próximas às linhas de transmissão.

As atuais implementações ou estudos em andamento de Sistemas HVDC se concentram nas estações Back-to-back [9], onde os interesses estão apenas na interligação com países vizinhos que operam seus sistemas em 50 Hz, e sem interesse

nas vantagens da transmissão em corrente contínua. Um exemplo é a interligação de 2000 MW Brasil-Argentina em Garabi (Figura 1.2), com uma estação *Back-to-Back* que interliga a Argentina (50 Hz) ao Brasil (60 Hz) [9].

Para descaracterizar os sistemas HVDC como sistemas de transmissão ponto-a-ponto e torná-los flexíveis quanto ao intercâmbio de potência ao longo da linha, como são os sistemas de transmissão em ca, surge o Tap HVDC, dispositivo que atua como um conversor cc-ca, um transformador eletrônico entre o elo cc e o sistema ca local, com a função de realizar intercâmbio de energia com o Sistema HVDC.

1.2 Motivação

Com base na possibilidade de realizar este intercâmbio de energia com o Sistema HVDC para conectar sistemas ca isolados ou atendidos de forma insuficiente por outros sistemas ca, com alimentação de cargas e conexão de pequenas centrais elétricas situadas próximas a este é que este trabalho é apresentado. Isto torna a construção de um Sistema HVDC mais sócio-economicamente interessante quando comparado aos sistemas de transmissão em ca quando se tem em mente grandes blocos de energia. A expansão do SIN, que ocorrerá na Região Norte com a conclusão da segunda metade da Usina Hidrelétrica de Tucuruí e com a construção da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, totalizarão mais 15 GW de geração que precisarão estar disponíveis para consumo em todo o país devido à alternância dos períodos de chuva e seca entre as regiões. Atravessar o país com linhas de transmissão em cc de grandes comprimentos e capacidades de potência atendendo a todos os sistemas ca isolados circunvizinhos deve ser um alvo importante de gestão de todo o sistema elétrico.

Proporcionar menor custo para a expansão do SIN, que pode ganhar maior margem de estabilidade e confiabilidade mesmo sem a construção de grandes usinas geradoras, apenas com mais linhas reforçando sua malha existente, é o desejo de qualquer operador de um sistema elétrico. É mais complicado e custoso construir uma usina hidrelétrica para aproveitar um grande potencial existente, como os citados anteriormente, do que linhas de transmissão. Estas são, dentre outras, as grandes vantagens que o Tap HVDC pode nos trazer.

1.3 Objetivos do Trabalho

Este trabalho propõe um modelo de Tap HVDC capaz não só de drenar energia do elo cc de um Sistema HVDC para suprir cargas pequenas e médias, como também injetar neste elo cc energia gerada por pequenas hidrelétricas, centrais termoelétricas ou outras fontes de energia que porventura estejam disponíveis nas vizinhanças do tronco de transmissão do Sistema HVDC. Entre as cargas estão pequenas indústrias e municípios de até cerca de cem mil habitantes. As potências envolvidas são ditas médias e pequenas quando comparadas ao Sistema HVDC ao qual está conectado: conexão para até 50 MW ou até 5 % da potência do Sistema HVDC, que corresponde a ordem de grandeza das perdas em todo este sistema.

A partir de um primeiro modelo de Tap HVDC Unidirecional de 25 MW [10] serão propostas mudanças nos seus circuitos de potência e controle para tornar possível o fluxo bidirecional de energia entre o elo cc do Sistema HVDC e o sistema ca local.

Serão apresentados os resultados de simulações obtidos com o programa PSCAD/EMTDC para todos os casos estudados, incluindo a operação do Tap HVDC Bidirecional inserido em um Sistema HVDC monopolar de 12 pulsos, 500 kV e 1000 MW, o *CIGRÉ HVDC Benchmark* [11].

1.4 Estrutura do Texto

O texto desta dissertação foi organizado em cinco capítulos. Os próximos capítulos dispõem dos seguintes conteúdos:

No capítulo 2 é apresentado o Tap HVDC. São mostradas as possibilidades de conexão com o elo cc do Sistema HVDC e um breve histórico da pesquisa desde o modelo unidirecional até esta proposta de Tap HVDC Bidirecional em Fluxo de Energia apresentada aqui.

O capítulo 3 apresenta a modelagem do circuito de potência e os circuitos de controle utilizados.

No capítulo 4 é modelado um sistema ca local simples para avaliar o

funcionamento dinâmico do Tap HVDC Bidirecional, com variações de carga, da geração local e da corrente do elo cc. O último caso simulado apresenta o funcionamento do Tap HVDC Bidirecional inserido em um Sistema HVDC completo.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e as considerações sobre os trabalhos futuros.

Capítulo 2

O Tap HVDC e sua conexão com o sistema HVDC

Este capítulo descreverá, de forma simplificada, os circuitos de potência de Taps HVDC e as possíveis conexões destes com o Sistema HVDC. Um breve histórico, com circuitos estudados até então, mostram as etapas pra se chegar ao modelo apresentado aqui.

”Alguns homens vêem as coisas como são, e dizem: Por que? Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo: Por que não?”

George Bernard Shaw

2.1 Definições e Tipos de Derivações em Sistemas HVDC

Tap, ou derivação, pode ser definido como conexão em série ou em paralelo à linha principal de um elo cc de um Sistema HVDC. A diferença entre uma derivação e um terminal de um Sistema HVDC multiterminal pode ser caracterizada pelo fato da primeira ter controle independente do Sistema HVDC, por operar com potência muito menor que a deste sistema - até cerca de 5 %. Este valor é considerado baixo por ser da mesma ordem de grandeza das perdas na linha de transmissão do Sistema HVDC.

A palavra *Tap* também é usada para descrever qualquer ligação intermediária entre dois extremos de um sistema. Um exemplo é a descrição da ligação Sardenha-Córsega-Itália (SACOI) considerando a conexão com a ilha da Sardenha um *Tap*. Ela absorve 50 MW de um total de 200 MW do sistema e tem controle interligado [12]. Neste trabalho, e em todos os outros publicados pelo Grupo de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ, adotou-se a definição de *Tap* pela diferenciação citada acima.

O objetivo do *Tap* HVDC é intercambiar potência com a linha de transmissão à qual estará conectado. O Sistema HVDC convencional de dois terminais, baseado em Estações Conversoras (Retificadora e Inversora) a tiristores, se caracteriza como um elo cc ou fonte de corrente, por conter reatores de alisamento (filtros) na conexão da linha com cada estação [1] conforme ilustrado na Figura 2.1. Para um *Tap* HVDC cuja potência seja muito inferior à nominal do Sistema HVDC, a melhor maneira de conexão é em série com um dos pólos, positivo ou negativo, no caso do HVDC ser bipolar. Para uma derivação da mesma ordem de potência do Sistema HVDC, como a própria estação inversora deste, a conexão mais adequada é a em paralelo (ver Figura 2.2).

A derivação paralela opera com uma fração da corrente do elo cc, mas é submetida à sua tensão total. Já a derivação série opera com a corrente do elo cc e uma tensão que é função das características do *Tap* HVDC, como a potência nominal deste. Na derivação paralela, a maior quantidade de dispositivos semicondutores em série eleva

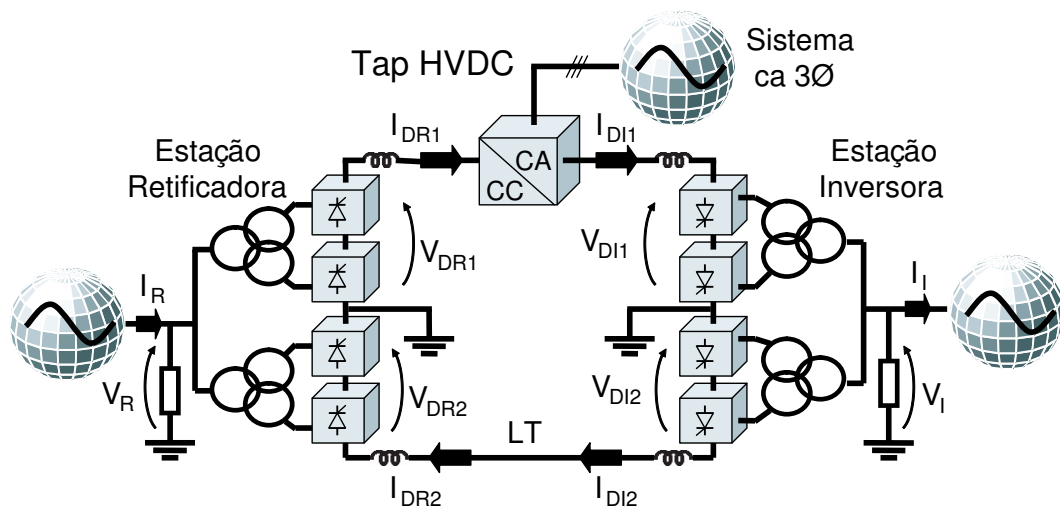


Figura 2.1: Sistema HVDC e um conversor em derivação série com o pólo positivo deste.

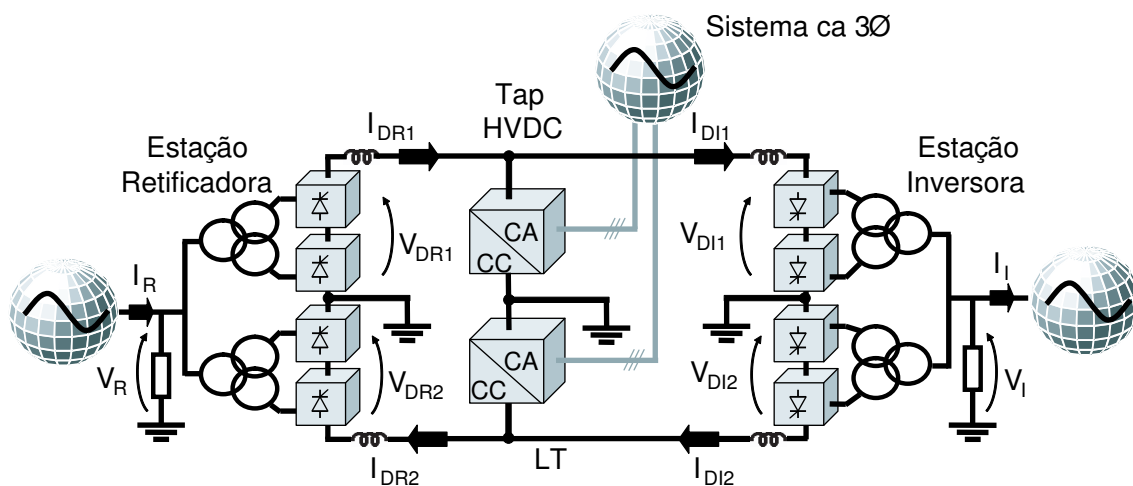


Figura 2.2: Sistema HVDC e um conversor por pólo em derivação paralela. A operação com um só conversor é possível.

em muito o custo desta configuração. Este custo só se justifica quando a potência do Tap HVDC é da mesma ordem de grandeza da potência do elo cc, como é o caso das próprias estações conversoras. Outra justificativa para implementar uma derivação paralela é a capacidade de operar em elos cc com grande variação da corrente (entre $0,1p.u.$ e $1,0p.u.$).

A função do conversor cc-ca do Tap HVDC Bidirecional será trocar potência entre o elo cc e um sistema ca visando atender sistemas ca trifásicos locais com consumidores e geradores conectando-se diretamente ao sistema de distribuição de

energia. No caso destes sistemas ca estarem a alguns quilômetros da linha do HVDC e conseqüentemente do Tap HVDC Bidirecional, pequenas linhas de sub-transmissão farão a conexão entre os terminais ca do Tap HVDC Bidirecional e a barra do sistema ca no qual se deseja fazer a conexão.

A inserção do Tap HVDC no elo cc tem de ser de tal modo que não perturbe a operação das estações do HVDC e que não comprometa a segurança e estabilidade do mesmo. Para isto é necessário que tenha o menor número possível de componentes diretamente conectados ao pólo e a operação destes tem de ser simples, bem como a proteção (*bypass*) no caso de algum defeito no Tap HVDC Bidirecional que comprometa seu funcionamento. A Figura 2.1 mostra o diagrama esquemático do Tap HVDC inserido no pólo positivo de um HVDC bipolar entre as duas estações deste e o sistema ca local conectado a ele. Sendo o Tap HVDC Bidirecional dimensionado para operar com até 50 MW e o modelo de HVDC utilizado de 1000 MW (um pólo com 500 kV e 2,0 kA), a potência envolvida estará em torno de 5 % da potência do Sistema HVDC e, portanto, muito inferior a potência do Sistema HVDC, para que não influa no funcionamento deste.

2.2 Histórico do Tap HVDC

Inicialmente, os modelos de Tap HVDC foram desenvolvidos tendo-se em vista primeiro converter a corrente contínua em tensão contínua para então, através de um inversor, obter tensão alternada trifásica balanceada. Para converter a corrente contínua em tensão contínua dois conversores eram utilizados: um para transformar a corrente contínua em tensão monofásica alternada de alta frequência e esta tensão era então retificada por um retificador monofásico não controlado. Em seguida um inversor PWM (*Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso) fornecia ao sistema ca tensão trifásica senoidal balanceada.

Em 1981, Bowles *et al.* apresentaram a proposta de um Tap HVDC constituído por um conversor cc-ca a tiristores, destinado a extrair potência ativa do Sistema HVDC, e por uma máquina rotativa de corrente alternada, responsável pelo fornecimento da tensão necessária ao acionamento das chaves e por fornecer potência reativa para o sistema ca [13].

Em 1991, Ponte *et al.* apresentaram uma estimativa de custo para um Tap HVDC série para extrair 25 MW do elo cc, incluindo um condensador síncrono e filtros ca. Os autores concluem que esta configuração proposta tem custo menor do que uma geração diesel para a mesma potência, desde que o Sistema HVDC parta de uma hidrelétrica [14]. No mesmo ano, Muniz apresentou uma análise criteriosa de diversas topologias possíveis para conversores cc-ca para alimentar cargas ca trifásicas a partir de um elo cc próximo [15].

Em 1995, Bahrman *et al.* apresentaram um trabalho voltado para a integração de vários Taps HVDC conectados em série com o elo cc [16].

Em 1997, Aghaebrahimi *et al.* apresentaram uma possível solução para derivação de potência do elo cc com um Tap HVDC série composto por uma Ponte-H, um retificador monofásico a diodos e um inversor PWM trifásico [17]. A Ponte-H é composta por quatro tiristores ou quatro GTO [18][19], e no seu ramo central estão um capacitor e o enrolamento primário de um transformador monofásico. Já em 1998, o mesmo grupo apresenta o desenvolvimento analítico de um transformador com núcleo de ar e os resultados obtidos com um protótipo, confrontando os resultados das simulações com as medições feitas em laboratório com o protótipo [20].

Em setembro de 2000, Aquino propôs um Tap HVDC para suprir pequenas cargas de até 5 MW a partir de um Sistema HVDC [21]. Este Tap HVDC é baseado em um novo conversor cc-cc de chaveamento suave, destinado a extração de energia de sistemas de transmissão em corrente contínua, sendo uma alternativa para alimentar cargas nas cercanias de elos cc (ver Figuras 2.3 e 2.4). Um sistema de equações diferenciais envolvendo todos os estágios de operação possíveis foi desenvolvido e teve seus resultados confrontados com os resultados de simulação do circuito. No mesmo mês e ano, Aquino e Aredes apresentaram, sob a forma de artigo, as modelagens analítica e digital dos circuitos e as compararam através dos resultados obtidos com o uso dos *softwares* Mathematica e Saber Design [22].

Em 2000, Aredes *et al.* apresentou em detalhes a modelagem do Tap HVDC dando ênfase na obtenção de chaveamento não-dissipativo mesmo com frequência de chaveamento variável [23].

Em maio de 2001, Aquino *et al.* apresentaram melhorias neste modelo de Tap

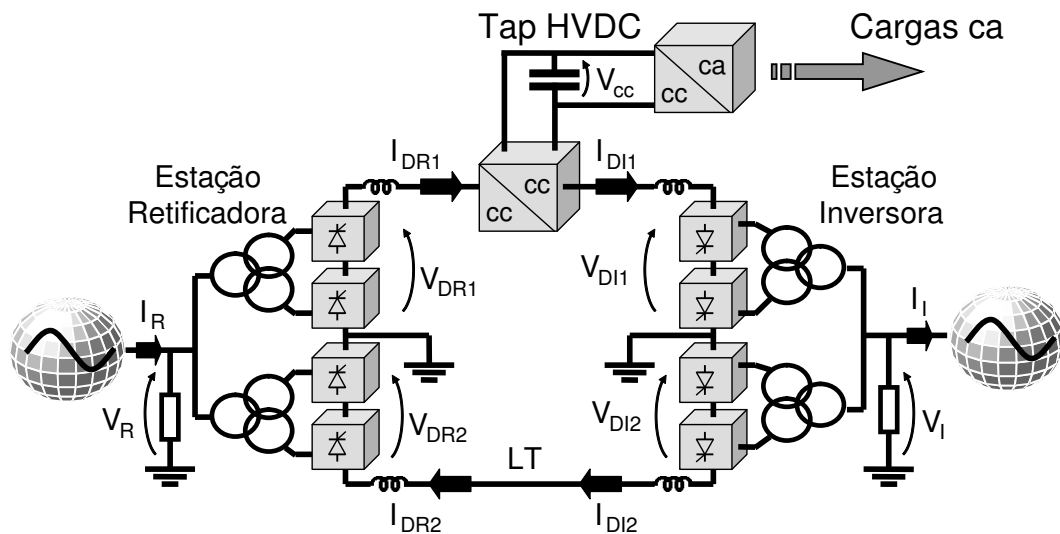


Figura 2.3: Tap HVDC Unidirecional inserido no pólo positivo do Sistema HVDC e identificação dos Sistemas ca a serem representados.

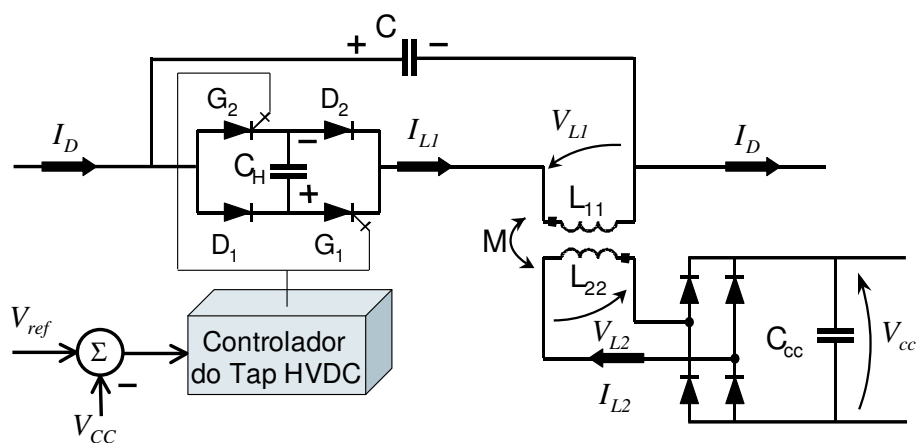


Figura 2.4: O Tap HVDC Unidirecional em detalhes.

HVDC onde a principal diferença era a frequência de chaveamento dos componentes da Ponte-H ser variável de modo a permitir chaveamento não-dissipativo e otimizar alguns componentes do circuito de potência [24]. Trabalho semelhante foi apresentado em agosto 2002, por Aredes *et al.* [25].

Em 2004, Aredes *et al.* apresentou o mesmo modelo de Tap HVDC redimensionado para 25 MW e otimizado. Apresentou seu funcionamento e influência no Sistema HVDC (± 500 kV, 2,0 kA) onde estava inserido, com aplicação de falta a terra no barramento cc do Tap HVDC [10].

Todos esses trabalhos sugeriram soluções para realizar extração de pequenos

blocos de energia para alimentar cargas nas cercanias da linha de transmissão do Sistema HVDC, mas nenhum desses modelos foi de fato implementado até então.

2.3 Proposta para o Tap HVDC Bidirecional

A proposta inicial para tornar o Tap HVDC Bidirecional em fluxo de energia seria manter a estrutura de três conversores interconectados, mas atuando-se nos conversores para que estes fossem bidirecionais em fluxo de energia um a um (Figura 2.5).

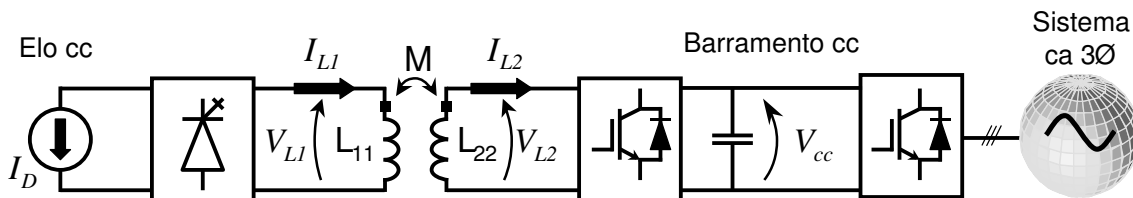


Figura 2.5: Diagrama em blocos de um circuito proposto para o Tap HVDC Bidirecional.

Para tornar o primeiro conversor bidirecional, a primeira mudança foi alterar a Chave-H, substituindo os dois diodos (D_1 e D_2 na Figura 2.4) por dois GTO, e colocando o enrolamento do transformador em paralelo com o capacitor do ramo central. Esta configuração resultante, denominada Ponte-H, foi apresentada por Aghaebrahimi e Menzies [17] como proposta para um Tap HVDC Unidirecional (Figura 2.6). Com esta alteração foi possível controlar o sentido da corrente no ramo central da Ponte-H.

Em seguida, foram adicionados IGBT em antiparalelo aos diodos do retificador monofásico. Com isto, este primeiro Tap HVDC Bidirecional pode ser simplificado de forma que o circuito seja composto por dois conversores bidirecionais, um fonte de corrente e outro fonte de tensão. Estes dois conversores foram conectados através do transformador com núcleo de ar, que serve como indutor de acoplamento para o conversor fonte de tensão. O capacitor da Ponte-H faz o papel de capacitor de acoplamento do conversor fonte de corrente. A fonte de corrente contínua representa o elo cc e uma fonte de tensão contínua pode representar a tensão controlada no barramento cc do Tap HVDC para simplificar o sistema.

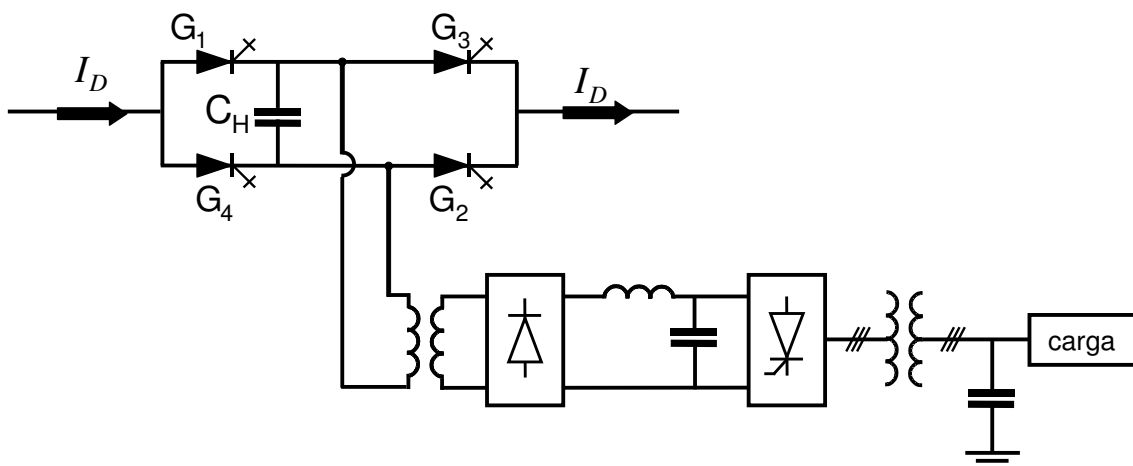


Figura 2.6: Tap HVDC proposto por Aghaebrahimi e Menzies.

O barramento cc deste Tap HVDC pode ser considerado como um elo cc de um HVDC *Light* [9][26]. Como o Tap HVDC opera com corrente contínua no lado da Ponte-H, pode-se até pensar em uma estação convencional controlando corrente e vários Taps alimentando circuitos cc como os dos HVDC *Light*. A grande vantagem é que não é necessário suporte de reativo nas estações que substituem a Estação Inversora, tampouco é necessário que haja tensão proveniente de geradores locais para a operação do conversor.

Alguns Sistemas HVDC *Light* já estão em operação comercial. O Cross Sound Cable Interconnector conecta a parte continental dos EUA a Long Island com 40 km de cabo submarino transmitindo até 300 MW e é considerado o maior projeto VSC (*Voltage Source Converter*) existente. Já o Murraylink Interconnection, com 176 km de cabos subterrâneos transmitindo até 220 MW, é considerado o sistema de transmissão subterrânea mais longo do mundo [26].

No lugar do inversor (conversor conectado ao sistema ca, Figura 2.5), no barramento cc do Tap HVDC podem também ser conectados conversores PWM de um ou mais níveis, garantindo qualidade na tensão aplicada ao sistema ca pelo Tap HVDC Bidirecional, com controle das potências ativa e reativa nos quatro quadrantes.

Esta linha de pesquisa, com o Tap HVDC Bidirecional proposto e apresentado nas Figuras 2.5 e 2.7, continuou a ser estudada dentro do Grupo de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ. Uma outra modelagem, apresentada nas Figuras 2.8 e

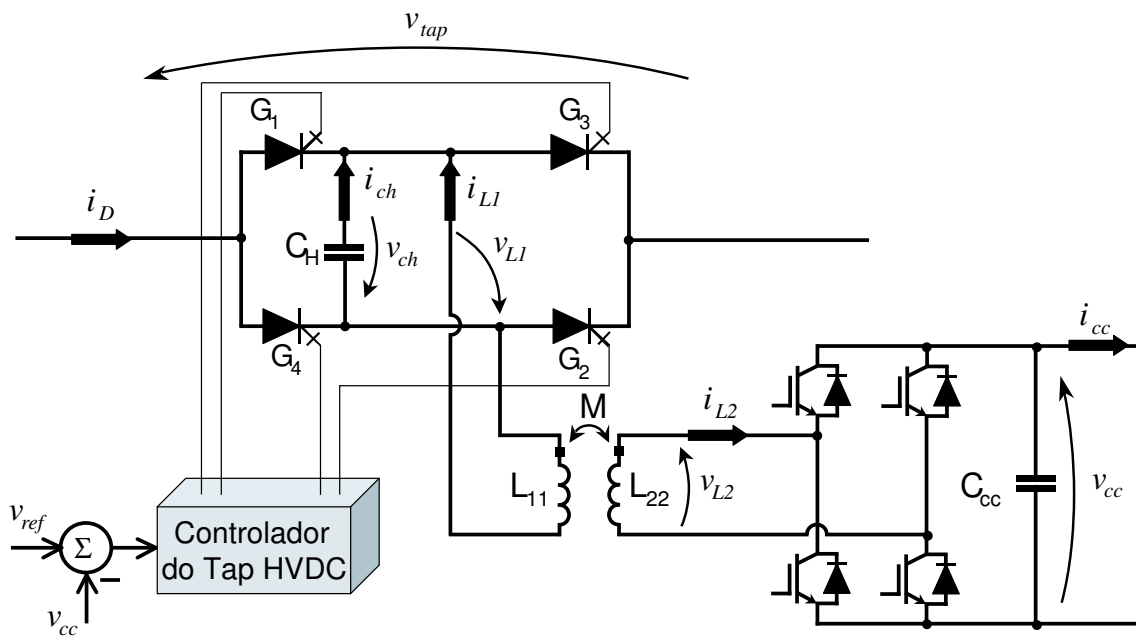


Figura 2.7: Circuito estudado anteriormente para o Conversor cc-cc do Tap HVDC Bidirecional.

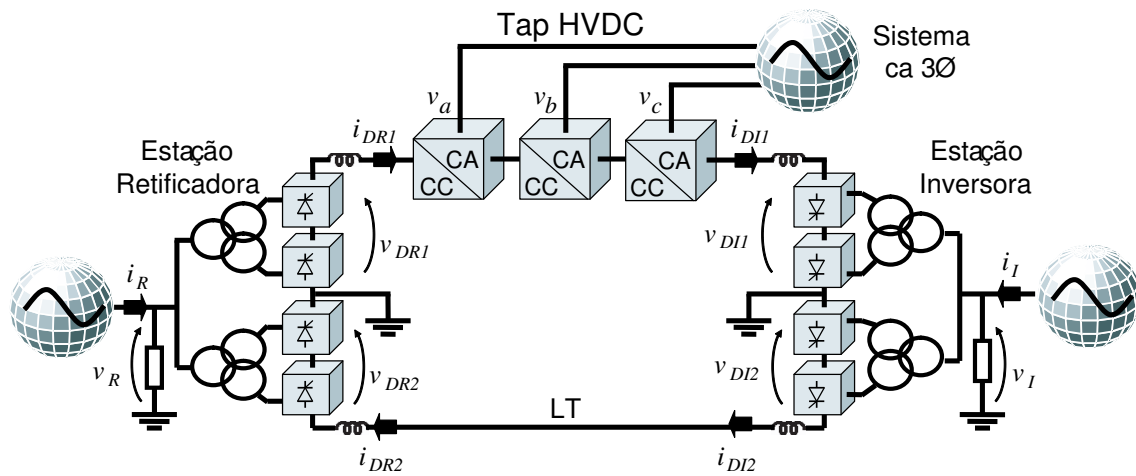


Figura 2.8: Tap HVDC Bidirecional inserido no pólo positivo do Sistema HVDC e identificação dos Sistemas ca a serem representados.

2.9, foi desenvolvida e é apresentada a seguir.

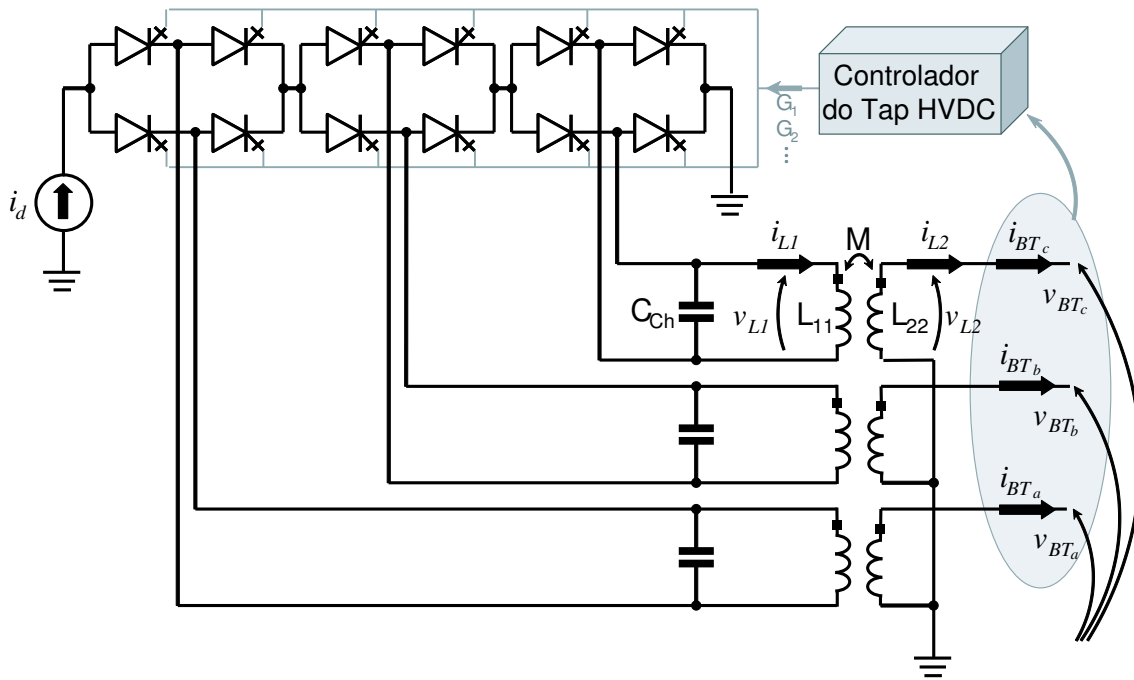


Figura 2.9: Circuito proposto para o Conversor cc-ca do Tap HVDC Bidirecional.

2.4 O Novo Circuito do Tap HVDC Bidirecional

Para maior eficiência na construção do Tap HVDC e menor ripple na tensão que aparece em seus terminais na conexão com o elo cc (v_{tap}), é interessante que esta tensão tenha a forma de onda de uma tensão senoidal retificada por um retificador de onda completa. Com este objetivo, foi construído um novo circuito de potência com três Pontes-H, cada uma com um capacitor e um transformador monofásico. As Pontes-H operam em modo independente, com as referências de corrente defasadas em 120° , de modo a proporcionar idealmente menos ripple na tensão sobre os terminais do Tap HVDC Bidirecional, com forma de onda típica de chaveamento unipolar.

O maior número de Pontes-H não implica em maior número de componentes conectados ao elo cc, já que vários elementos têm que ser associados em série ou em paralelo para que seu equivalente suporte os níveis necessários de tensão ou corrente, respectivamente [27].

Como não é utilizada comutação natural, não é necessário um sistema local ca para fornecer suporte de tensão ou de potência reativa ao conversor, nem mesmo para a partida deste.

Chaves semicondutoras unidirecionais em corrente e bidirecionais em tensão são necessárias para o correto funcionamento das Pontes-H. Neste caso os GTO são a melhor opção também pela capacidade de condução de corrente e corte de tensão disponíveis [18].

Os secundários dos transformadores são ligados em Y, possibilitando a conexão de cargas monofásicas, bifásicas ou trifásicas. Ao invés de três conversores distintos e com funções diferentes em série, este novo Tap HVDC possui apenas um conversor cc-ca composto por três Pontes-H. A relação de componentes passa para doze GTO, três capacitores e um banco de três transformadores monofásicos (idealmente). Este único conversor faz a conversão entre a corrente contínua do elo cc do Sistema HVDC em tensão alternada trifásica balanceada para os sistemas locais (consumidores e pequenos geradores).

Capítulo 3

Modelagem do Tap HVDC

Nesse capítulo pretende-se apresentar a modelagem e o princípio de funcionamento de cada componente do Tap HVDC Bidirecional em Fluxo de Energia.

”Uma corrente é tão forte quanto o seu elo mais fraco.”

Wernher von Braun

3.1 Princípios Básicos de Funcionamento

Cada Ponte-H terá a função de chavear a corrente contínua do elo cc, dentro do seu ramo central, para trocar energia entre o elo cc e o sistema ca. Com este chaveamento é possível converter a corrente do elo cc em tensão alternada senoidal no ramo central da Ponte-H. O capacitor do ramo central e o enrolamento do transformador conectado à Ponte-H formam um filtro que pode ser utilizado como um circuito ressonante. O ideal é que este circuito envolva pouca energia reativa - suficiente apenas para que a tensão no enrolamento do transformador conectado ao sistema ca seja de qualidade. Outro ponto importante e interessante é a possibilidade de utilizar este circuito ressonante para obter chaveamento não dissipativo com tensão nula (*ZVS - Zero Voltage Switching*) ou corrente nula (*ZCS - Zero Current Switching*).

Neste circuito contendo as três Pontes-H em série, com uma Ponte-H para cada fase do sistema ca, as seguintes variáveis são definidas, com base na Figura 3.1:

v_{tap} → tensão sobre os terminais do Tap HVDC conectados ao elo cc;

i_D → corrente no elo cc;

v_{Ch_a} , v_{Ch_b} e v_{Ch_c} → tensões sobre as Pontes-H;

i_{Ch_a} , i_{Ch_b} e i_{Ch_c} → correntes nos ramos centrais das Pontes-H;

i_{C_a} , i_{C_b} e i_{C_c} → correntes nos capacitores das Pontes-H;

v_{AT_a} , v_{AT_b} e v_{AT_c} → tensões nos terminais dos enrolamentos de alta tensão dos transformadores e sobre os capacitores;

i_{AT_a} , i_{AT_b} e i_{AT_c} → correntes nos enrolamentos de alta tensão dos transformadores;

i_{BT_a} , i_{BT_b} e i_{BT_c} → correntes nos enrolamentos de baixa tensão dos transformadores;

v_{BT_a} , v_{BT_b} e v_{BT_c} → tensões nos enrolamentos de baixa tensão dos transformadores.

Na Figura 3.1 pode-se observar que as tensões sobre os capacitores são iguais às tensões nos terminais dos enrolamentos de alta tensão dos transformadores das Pontes-H das respectivas fases. Pela mesma figura, a tensão sobre os terminais do Tap HVDC conectados ao elo cc é dada por (3.1).

$$v_{tap} = v_{Ch_a} + v_{Ch_b} + v_{Ch_c}. \quad (3.1)$$

A corrente do elo cc chaveada pelos GTO é imposta no ramo central de cada

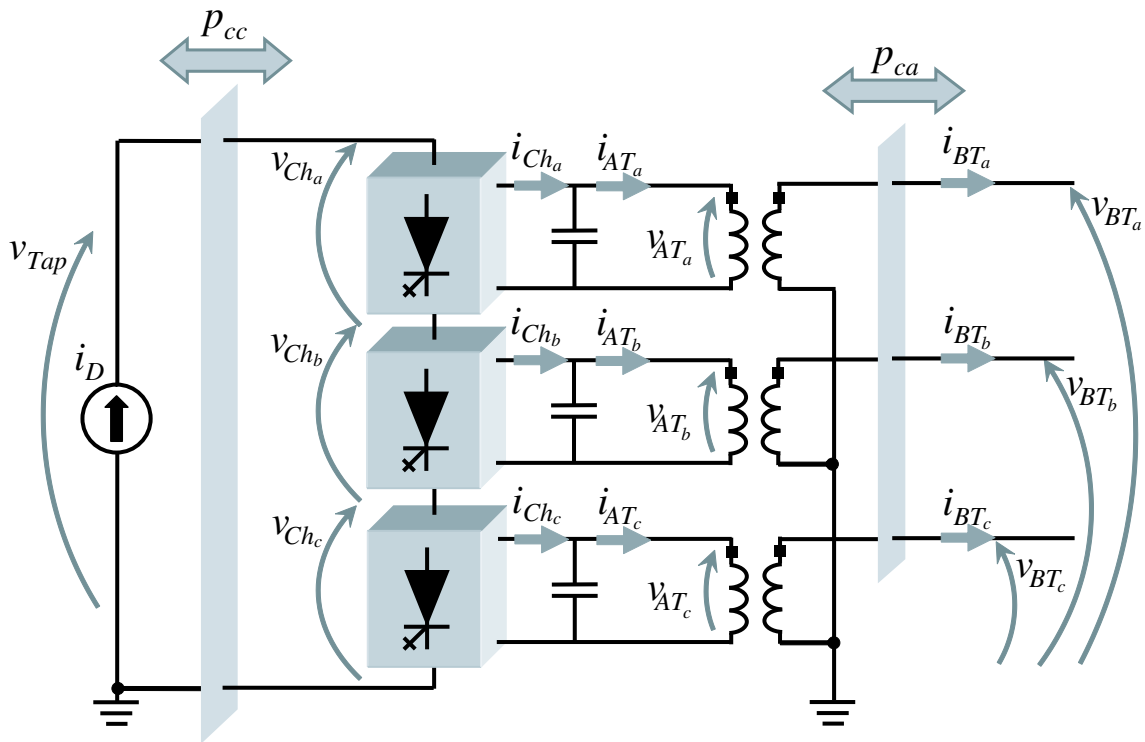


Figura 3.1: Circuito de potência com as variáveis indicadas.

Ponte-H e se divide entre os seus dois elementos:

$$\begin{cases} i_{Ch_a} = i_{C_a} + i_{AT_a} \\ i_{Ch_b} = i_{C_b} + i_{AT_b} \\ i_{Ch_c} = i_{C_c} + i_{AT_c} \end{cases} \quad (3.2)$$

As equações que relacionam as grandezas nos lados do elo cc e do sistema ca são obtidas utilizando-se o circuito da Figura 3.1. Nos terminais do lado ca, pode-se colocar a impedância equivalente do sistema ca como sendo $Z \angle \phi$ para fechar o circuito.

Variáveis instantâneas serão sempre escritas em letras minúsculas (por exemplo $x(t)$). Quando representadas por valores eficazes, serão escritas em letras maiúsculas (o valor eficaz de $x(t)$ será X). Quando se tratar de médias instantâneas de variáveis, conceito utilizado para desconsiderar o efeito do chaveamento, essas variáveis serão representadas com um traço sobre a letra (segundo o exemplo, $\bar{x}(t)$). No caso de conversores com modulação PWM [19], isto equivale a considerar que a frequência de chaveamento é praticamente infinita. Por último, valores de pico de variáveis serão representados por \hat{x} . Outras representações podem ser necessárias durante o

desenvolvimento do assunto e serão evidenciadas na oportunidade.

3.1.1 Determinações das tensões, correntes e das potências envolvidas

Para determinar as relações entre as tensões, correntes, potências e cargas do sistema, serão utilizadas relações para aproximações em circuitos com sinais chaveados com modulação PWM, como em [12].

A relação entre as médias instantâneas das correntes $\bar{i}_{Ch_a}(t)$, $\bar{i}_{Ch_b}(t)$ e $\bar{i}_{Ch_c}(t)$ e a corrente I_D ou $i_D(t)$ é dada por:

$$\begin{cases} \bar{i}_{Ch_a}(t) = m_a(t) \cdot I_D \\ \bar{i}_{Ch_b}(t) = m_b(t) \cdot I_D \\ \bar{i}_{Ch_c}(t) = m_c(t) \cdot I_D \end{cases} \quad (3.3)$$

com $-1 \leq m_x(t) \leq 1$, $x = a, b, c$.

O termo $m_x(t)$ representa o índice de modulação instantâneo para a fase x e o seu significado será detalhado a seguir. Para efeito de equacionamento pode-se modelar cada Ponte-H como um transformador cc-ca com relação de transformação $m_x(t)$ variável.

A potência a cada instante pode ser calculada em três pontos do circuito: nos terminais conectados ao elo cc e nos terminais dos dois lados do banco de transformadores. A potência nos terminais do Tap HVDC do lado do Sistema HVDC tem seus valores instantâneo e eficaz dados respectivamente pelas Equações 3.4 e 3.5 abaixo. Considerando I_D constante em (3.5), se V_{tap} mudar de sinal, P_{cc} também mudará de sinal.

$$p_{cc}(t) = v_{tap}(t) \cdot i_D(t). \quad (3.4)$$

$$P_{cc} = V_{tap} \cdot I_D. \quad (3.5)$$

As outras duas formas de calcular a potência envolvem os terminais do Tap HVDC do lado do sistema ca e do ramo central da Ponte-H, que são aqui denominados de lado de baixa tensão BT e lado de alta tensão AT, numa referência

ao potencial do campo elétrico ao qual estarão sujeitos: potencial do sistema ca local e potencial do elo cc do Sistema HVDC, respectivamente.

Potência calculada pelo método convencional

É apresentado abaixo o cálculo da potência ativa instantânea (Equação 3.6) e eficaz (Equação 3.7) para o lado BT do transformador, onde $\cos(\phi)$ é o ângulo de fase entre a tensão e a corrente na respectiva fase. O mesmo pode ser feito para o lado AT apenas trocando as tensões, correntes e ângulos.

$$p_{ca}(t) = v_{BT_a}(t) \cdot i_{BT_a}(t) + v_{BT_b}(t) \cdot i_{BT_b}(t) + v_{BT_c}(t) \cdot i_{BT_c}(t) \quad (3.6)$$

$$P_{ca} = V_{BT_a} \cdot I_{BT_a} \cdot \cos(\phi_a) + V_{BT_b} \cdot I_{BT_b} \cdot \cos(\phi_b) + V_{BT_c} \cdot I_{BT_c} \cdot \cos(\phi_c) \quad (3.7)$$

Como existem elementos armazenadores de energia, o balanço de energia a todo instante pode não ser zero, com $p_{cc}(t)$ diferente de $p_{ca}(t)$. Porém, em termos eficazes e num caso ideal desprezando-se as perdas, a Equação 3.8 é válida a todo tempo, pois considera os valores eficazes.

$$P = V_{tap} \cdot I_D = V_{BT_a} \cdot I_{BT_a} \cdot \cos(\phi_a) + V_{BT_b} \cdot I_{BT_b} \cdot \cos(\phi_b) + V_{BT_c} \cdot I_{BT_c} \cdot \cos(\phi_c) \quad (3.8)$$

Nos dois lados dos transformadores, a potência pode também ser calculada utilizando a *Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas - Teoria p-q* [28][29][30][31][32]. No desenvolvimento da Teoria p-q apresentado abaixo é apresentada a obtenção do valor de potência real (parcela ativa) e também do valor da potência imaginária (parcela reativa) a partir das grandezas medidas nos terminais do banco de transformadores.

Potência calculada pela Teoria p-q

A Teoria p-q aplica-se em todos os casos onde se deseja analisar o sistema elétrico, tanto nos casos onde a teoria convencional se aplica de modo suficiente quanto nos casos em que esta nos leva a erros de interpretação ou insuficiência na sua abrangência de aplicações. Esta teoria será utilizada na validação do modelo digital

e no controle que busca minimizar o consumo de potência reativa pelo banco de transformadores com núcleo de ar (seção 3.4.2).

Através da *Transformada de Clarke* [33], um sistema trifásico de coordenadas abc pode ser transformado e representado por um sistema bifásico de referência também estacionário mas de coordenadas $\alpha\beta 0$ ortogonais entre si. A coordenada 0 (zero) corresponde à componente de seqüência zero. Em sistemas a três fios, a componente de seqüência zero da corrente é nula, assim é usual a utilização da Transformada de Clarke normalizada apresentada nas Equações 3.9 e 3.10 para tensões e correntes, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Uma vez determinadas as tensões e correntes nas componentes de Clarke, as potências p e q em termos das variáveis neste novo sistema de coordenadas são definidas por meio da Equação 3.11.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Admitindo-se que as Pontes-H tenham perdas nulas e não disponham de elementos armazenadores de energia (ou seja, desprezando-se os *snubbers*, o capacitor e a indutância do transformador), as potências instantâneas nos lados cc e ca são iguais e pode-se igualar as Equações 3.4 e 3.6 resultando nas Equações 3.12 e 3.13, válidas para o lado BT e para o lado AT, respectivamente.

$$p(t) = v_{tap}(t) \cdot i_D(t) = v_{BT_a}(t) \cdot i_{BT_a}(t) + v_{BT_b}(t) \cdot i_{BT_b}(t) + v_{BT_c}(t) \cdot i_{BT_c}(t). \quad (3.12)$$

$$p(t) = v_{tap}(t) \cdot i_D(t) = v_{AT_a}(t) \cdot i_{AT_a}(t) + v_{AT_b}(t) \cdot i_{AT_b}(t) + v_{AT_c}(t) \cdot i_{AT_c}(t). \quad (3.13)$$

Substituindo-se as correntes da Equação 3.3 na Equação 3.13, e considerando que a corrente no elo cc $i_D(t)$ é constante e igual a I_D , tem-se:

$$v_{tap}(t) = m_a(t) \cdot v_{AT_a}(t) + m_b(t) \cdot v_{AT_b}(t) + m_c(t) \cdot v_{AT_c}(t). \quad (3.14)$$

Uma vez que as tensões trifásicas nos terminais BT dos transformadores devem ser senoidais e, conseqüentemente, as componentes fundamentais das tensões nos terminais AT, os índices de modulação $m_x(t)$ e as médias instantâneas das tensões \bar{v}_{AT_x} podem ser definidos a partir das relações 3.15 e 3.16:

$$\begin{cases} m_a(t) = \hat{m} \cdot \cos(\omega t - \phi) \\ m_b(t) = \hat{m} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \phi) \\ m_c(t) = \hat{m} \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \phi) \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} \bar{v}_{AT_a}(t) = V_m \cos(\omega t) \\ \bar{v}_{AT_b}(t) = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \bar{v}_{AT_c}(t) = V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.16)$$

sendo V_m e \hat{m} os valores de pico das tensões de fase e do índice de modulação por fase. Substituindo-se as Equações 3.15 e 3.16 na Equação 3.14 resulta na Equação 3.17:

$$\bar{v}_{tap}(t) = \frac{3}{2} \cdot \hat{m} \cdot V_m \cdot \cos(\phi) = V_{tap}. \quad (3.17)$$

Pode-se verificar que a média instantânea $\bar{v}_{tap}(t)$ é constante e difere pouco do valor obtido em um retificador trifásico controlado (ponte completa com ângulo de disparo α):

$$\bar{v}(t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos(\alpha) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos(\alpha). \quad (3.18)$$

A potência instantânea $\bar{p}(t)$ é obtida reescrevendo-se a Equação 3.13 na forma:

$$\bar{p}(t) = \bar{v}_{tap}(t) \cdot i_D(t) = V_{tap} \cdot I_D = \frac{3}{2} \cdot \hat{m} \cdot V_m \cdot \cos(\phi) \cdot I_D \quad (3.19)$$

que é constante.

3.2 A Ponte-H

Como não se quer que a corrente no elo cc (ou da fonte de corrente representando o elo cc) seja interrompida, a Ponte-H deve sempre prover um caminho para esta corrente. Desse modo serão necessários pelo menos dois GTO conduzindo a cada instante numa mesma perna da Ponte-H (posições 1 e 3 ou 2 e 4, Figura 3.1) ou em posições opostas (posições 1 e 2 ou 3 e 4). Com dois GTO conduzindo em uma

mesma perna (posições 1 e 3 ou 2 e 4), tem-se um *bypass* da Ponte-H correspondente, e fecha-se um circuito entre o capacitor e o enrolamento primário do transformador. Com dois GTO conduzindo nas posições 1 e 2 ou 3 e 4, pode-se determinar o sentido da corrente que será aplicada nos elementos passivos que compõem o ramo central da Ponte-H. Três ou quatro GTO conduzindo causam o *bypass* do conversor e formam um circuito elétrico fechado entre os dois elementos do ramo central da Ponte-H.

3.2.1 Modos de Operação da Chave-H e da Ponte-H

O funcionamento da Chave-H do Tap HVDC Unidirecional

O Tap HVDC Unidirecional drena potência através do chaveamento dos GTO. Para elevadas frequências e em conversores de elevada potência a perda devida à comutação pode ser inaceitável, comprometendo o rendimento do conversor e mesmo a confiabilidade deste em relação ao sistema ao qual está conectado. Nesta topologia, mantidos os valores nominais de potência drenada pelo Tap HVDC Unidirecional e corrente nominal do HVDC, garantidos em funcionamento normal ou pela ação de limitadores no controlador quando sob defeito, o chaveamento se dará sempre com tensão ou corrente nula. Além disto C_H sempre estará em série no circuito quando os diodos ou os GTO estiverem conduzindo e, portanto, armazenando ou devolvendo energia, conforme os sentidos da corrente e tensão sobre ele.

O funcionamento da Chave-H utilizada no Tap HVDC Unidirecional é simples e será analisado a seguir, com o acompanhamento pela Figura 3.2. Para ilustrar o estado das chaves colocamos as chaves fechadas com preenchimento e as chaves abertas sem preenchimento.

I - início do período de condução dos GTO S_1 e S_2 . Inicia-se considerando que o capacitor C_H está carregado e que nenhuma chave estava conduzindo no instante anterior. Isto equivale ao estado final do último estágio **IV**. Aplicando sinal no gate dos GTO estes conduzem e o capacitor se descarrega, dado o sentido da corrente. Durante este período, os diodos permanecem reversamente polarizados (bloqueados).

II - início do período de condução dos diodos D_1 e D_2 . Quando o capacitor

estiver totalmente descarregado, portanto com tensão nula em seus terminais, os diodos passam a conduzir naturalmente e a corrente através da chave é dividida em seus dois ramos.

III - abertura dos GTO S_1 e S_2 . Este terceiro estágio é marcado pela abertura dos GTO sob tensão nula (ZVS), pois o capacitor está descarregado. Isto faz com que a corrente tenha agora que passar pelo capacitor carregando-o. Como existe uma grande indutância em série com a Chave-H, o primário do transformador, e mesmo a linha de transmissão do HVDC, a corrente não vai instantaneamente a zero e o capacitor vai se carregando.

IV - abertura dos diodos D_1 e D_2 . Quando a corrente finalmente vai a zero e tenta se reverter os diodos param de conduzir e a chave fica aberta com o capacitor carregado. Termina aqui o ciclo de operação e o próximo passo é aplicar sinal no gate dos GTO e reiniciar o processo a partir do estágio I. Como a corrente aqui é nula, o fechamento dos GTO no próximo estágio se dará com corrente nula (ZCS), com di/dt limitado pelas indutâncias do transformador (L_{11} , M e L_{22}).

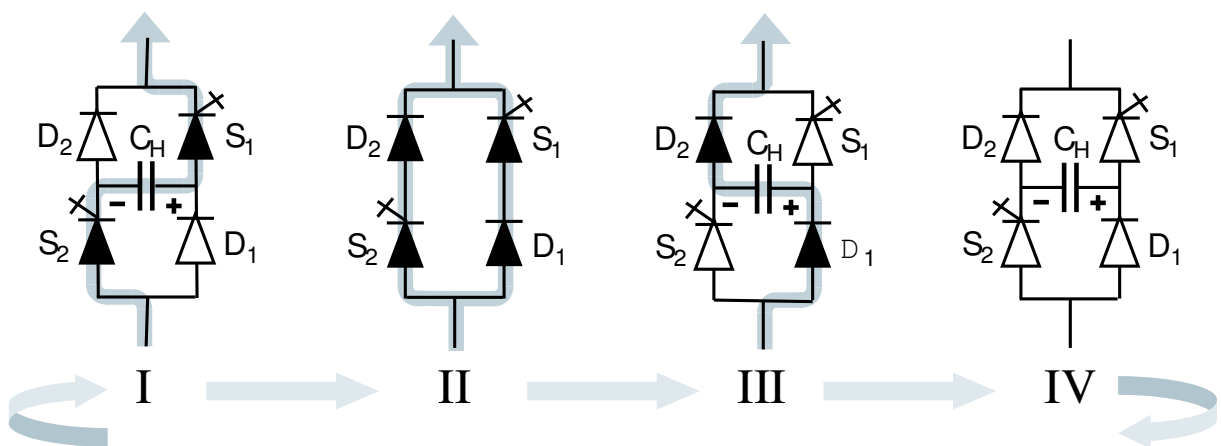


Figura 3.2: Funcionamento da Chave-H do Tap HVDC Unidirecional.

Estes quatro estágios de operação correspondem à operação da Chave-H em condições normais. Nestas condições tem-se o chaveamento suave ou não dissipativo. O funcionamento e equacionamento completo para todos os possíveis casos e estágios de operação da chave podem ser encontrados em [21][22].

O funcionamento da Ponte-H do Tap HVDC Bidirecional

Como a Ponte-H é semelhante a Chave-H analisada na seção anterior, um desenvolvimento semelhante será realizado na intenção de manter o chaveamento não-dissipativo mesmo com alteração do circuito de potência. Agora o enrolamento do transformador conectado ao elo cc faz parte do ramo central da Ponte-H (ver Figura 3.1) e o capacitor C (ver Figura 2.4) não existe mais.

Considerando como condição inicial que os elementos armazenadores de energia estão descarregados e que toda a corrente do elo cc tem que passar pela Ponte-H, considera-se que inicialmente as chaves 1 e 3 ou 2 e 4 estão conduzindo e as demais abertas, correspondendo, respectivamente, aos estágios **I** e **III** da Figura 3.3, ou ainda que todas as quatro chaves estão conduzindo, situação pouco provável. No caso de apenas duas chaves conduzindo, para iniciar a operação da Ponte-H basta comutar o estado de uma das chaves da mesma perna, por exemplo a chave 3, e comutar também o estado de uma chave correspondente na outra perna da Ponte-H, neste caso a chave 2. Então, se antes da operação as chaves 1 e 3 estão conduzindo (estágio **I**), para iniciar sua operação fecha-se a chave 2 e abre-se a chave 3, resultando no estágio **II**. No segundo caso, as chaves 2 e 4 estão conduzindo (estágio **III**). Para iniciar a operação fecha-se a chave 3 e abre-se a chave 2, resultando no estágio **IV**. Como o circuito é baseado em fonte de corrente, é necessário primeiro fechar uma chave para então abrir a correspondente para sempre garantir um caminho para a corrente. Estes dois casos podem ser combinados e seqüenciados tanto na ordem apresentada quanto na ordem inversa.

Iniciando a operação do Tap HVDC alterando o estado das chaves do estágio **I** para o estágio **II**, teremos a corrente do elo cc passando primeiramente toda pelo capacitor da Ponte-H, pois sua tensão é zero e a corrente não pode variar instantaneamente no enrolamento do transformador. A corrente no enrolamento do transformador então aumenta a partir de zero e o capacitor se carrega até que a corrente no enrolamento do transformador seja igual à corrente do elo cc. Como há tensão positiva sobre os terminais do transformador, a corrente neste continua aumentando enquanto o capacitor se descarrega. Neste ponto a tensão na Ponte-H é zero e pode-se chavear de 1 para 4 com ZVS, alterando para o estágio **III**, alterando o ramo de chaves que está conduzindo. Como a corrente no enrolamento

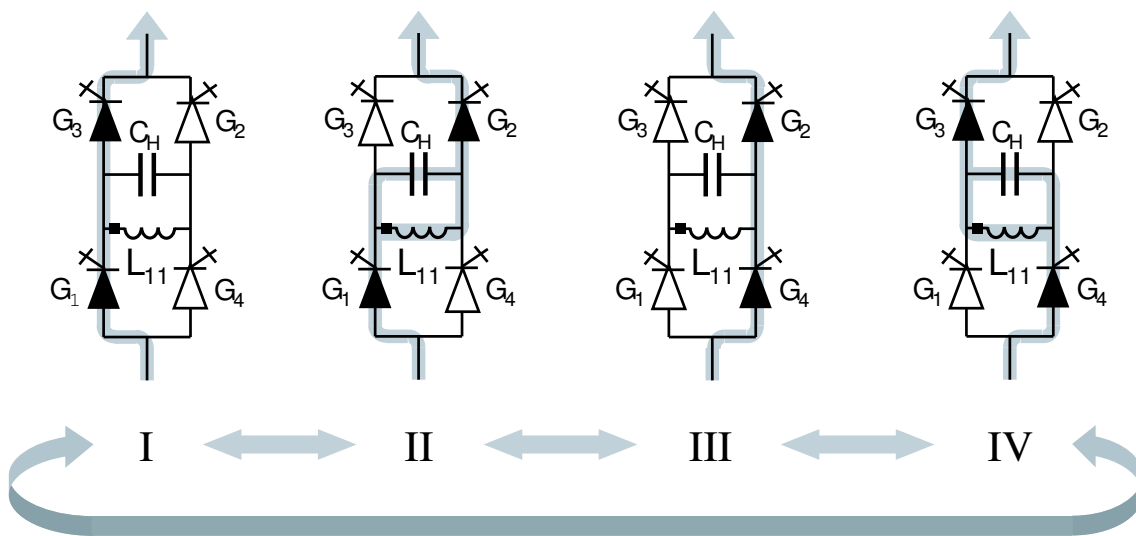


Figura 3.3: Funcionamento da Ponte-H do Tap HVDC Bidirecional.

do transformador não cai instantaneamente, a tensão no capacitor se reverte e a sua corrente tem o mesmo módulo que a corrente no enrolamento do transformador, mas com sinal contrário. A Ponte-H fica momentaneamente em *bypass* até que as correntes nos elementos do ramo central da Ponte-H se anulem quando então é disparada a chave 3 e cortada a chave 2, revertendo o sentido da corrente do elo cc dentro da Ponte-H e resultando no estágio **IV**. O capacitor continua a se carregar negativamente e a corrente no transformador muda de sinal. Quando seu valor é igual em módulo à corrente do elo cc a corrente no capacitor muda de sinal e este começa a se descarregar. Quando a tensão no capacitor é zero, fecha-se a chave 1 e abre-se a chave 4, retornando ao estágio **I** e completando um ciclo.

O ciclo descrito anteriormente carrega o capacitor cc após o retificador para o Tap HVDC Bidirecional proposto inicialmente (Figura 2.5) e que trabalha com frequência independente da frequência do sistema ca local, de modo ressonante e, assim, com chaveamento não dissipativo.

No caso do Tap HVDC Bidirecional operar injetando energia no elo cc, deve-se analisar também como se fará para a energia fluir no sentido contrário ao analisado anteriormente, com a corrente no barramento cc se invertendo e indo deste para o ramo central da Ponte-H. O conversor monofásico ca-cc (conversor central) da Figura 2.5 descarrega o capacitor do barramento cc colocando corrente no enrolamento BT do transformador com núcleo de ar. A corrente que aparece no

enrolamento AT deste carrega o capacitor. Neste ponto as chaves têm que ser operadas de modo a transmitir esta energia para o elo cc.

Deverá ser definido um circuito de controle para cada GTO da Ponte-H, já que em nenhum momento na descrição acima duas ou mais chaves são comutadas simultaneamente. Deverá, também, ser implementado um controle de rampa com *hold* e *reset* semelhante ao do controle do Tap HVDC Unidirecional desenvolvido anteriormente [10]. A parte lógica de *hold* e *reset* pode estar diretamente ligada às condições de corrente no primário do transformador e tensão sobre o capacitor da Ponte-H.

A corrente total no ramo central da Ponte-H pode ser interrompida pelos GTO, fazendo um *bypass* do Tap HVDC Bidirecional, sem que a corrente no enrolamento AT do transformador seja interrompida. Neste caso, que ocorre com a alteração dos estágios **II** ou **IV** para os estágios **I** ou **III** da Figura 3.3, a corrente passa a ser suprida pelo capacitor, que se descarregará ou se carregará negativamente.

Para o funcionamento do modelo de Tap HVDC Bidirecional modelado neste trabalho, os mesmo estágios são observados, mas o chaveamento não-dissipativo não foi obtido chaveando em 1500 Hz comutando entre os estágios **II** e **IV** somente.

3.2.2 Cálculo do Capacitor da Ponte-H

O cálculo a seguir é válido para o Tap HVDC Bidirecional operando com banco de transformadores convencionais (com núcleo de ferro), onde a menor corrente de magnetização permite um dimensionamento mais convencional do circuito e conseqüentemente do capacitor da Ponte-H que atua como um filtro [12].

Utilizando modulação PWM para obter formas de onda senoidais, o valor de pico da componente fundamental da corrente no lado AT é constante e igual a $\hat{m} \cdot I_D$ de acordo com a Equação 3.20:

$$\bar{i}_x(t) = \bar{m}_x(t) \cdot I_D = \hat{m} \cdot I_D \cos(\omega t - \phi + \theta_x) \quad (3.20)$$

$$\text{onde } \begin{cases} x = a, b, c \\ \theta_x = 0, -\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3} \end{cases} .$$

A média instantânea da corrente nos capacitores \bar{i}_{C_x} é uma fração n da corrente \bar{i}_{Ch_x} fornecida por cada Ponte-H, ou seja:

$$\bar{i}_{C_x}(t) = n \cdot \hat{m} \cdot I_D \quad (3.21)$$

onde $n < 1$. Para efeitos práticos adota-se $0,1 < n < 0,2$ de modo a limitar a corrente reativa fornecida pela Ponte-H ao seu capacitor e manter a ondulação de tensão dentro de limites preestabelecidos. A capacitância de filtro é obtida a partir da Equação 3.22:

$$C = \frac{n \cdot \hat{m} \cdot I_D}{\omega \cdot V_m} \quad (3.22)$$

Para $I_D = 2,0$ kA (valor mínimo esperado) e $P = 50$ MW (potência nominal do conversor cc-cc) tem-se que, pela Equação 3.5, $V_{tap} = 25$ kV. Com este valor e com valor de pico do índice de modulação por fase igual a um (pior caso), pela Equação 3.14 obtém-se $V_m = 20,8333$ kV. Pela Equação 3.22 tem-se que as capacitâncias mínima e máxima são respectivamente:

$$C_{MIN} = \frac{0,1 \cdot 1 \cdot 2000}{\omega \cdot V_m} = 25,5 \mu F \quad (3.23)$$

e

$$C_{MAX} = \frac{0,2 \cdot 1 \cdot 2000}{\omega \cdot V_m} = 50,9 \mu F, \quad (3.24)$$

sendo este último o valor utilizado.

O valor dos capacitores das Pontes-H do Tap HVDC Bidirecional operando com banco de transformadores com núcleo de ar foi obtido observando-se os resultados das simulações e mantendo a proporcionalidade com o Tap HVDC Unidirecional. Para isto foram utilizados três capacitores equivalentes de $650 \mu F$ cada por Ponte-H.

3.3 O Banco de Transformadores

O banco de transformadores do Tap HVDC, além de ajustar as tensões para os níveis desejados nos enrolamentos conectados ao sistema ca, tem como função isolar o sistema ca do nível de tensão do elo cc do Sistema HVDC, como por exemplo ± 500 kV, do Cigré HVDC *Benchmark*, ou ± 600 kV, do Sistema HVDC de Furnas.

O conversor do Tap HVDC opera com frequência de chaveamento elevada, com o conversor cc-cc do Tap HVDC Unidirecional chaveando em torno de 450 Hz (frequência variável determinada pelo circuito de controle) e com o conversor cc-ca do Tap HVDC Bidirecional, a Ponte-H, chaveando em 1500 Hz (fixo).

A utilização de transformadores convencionais, com núcleo de ferro, em frequências de algumas centenas de Hertz, traria perdas por histerese e correntes parasitas que comprometeriam a eficiência do Tap HVDC Unidirecional. Esse era um dos motivos para a utilização de transformadores com núcleo de ar no Tap HVDC Unidirecional. Já no Tap HVDC Bidirecional, a baixa frequência das componentes fundamentais das tensões e correntes permite a utilização de transformadores com núcleo de ferro.

Utilizando um transformador convencional com núcleo de ferro, o isolamento entre os seus dois enrolamentos terá de ser muito confiável para que não ocorra um defeito como um curto circuito entre os dois enrolamentos, o que será quase que como um curto para o potencial de terra da linha de transmissão do Sistema HVDC. Para contornar este problema, a segunda proposta é utilizar um transformador com núcleo de ar como no Tap HVDC Unidirecional. As duas propostas são apresentadas a seguir.

Como a avaliação dos custos de cada tipo de transformador não faz parte do escopo deste trabalho, os dois serão modelados dentro do sistema e os resultados de simulação para cada um apresentados. O fator crítico para a construção do transformador com núcleo de ferro para esta aplicação é o custo da isolação da tensão do elo cc para o potencial de terra. Já o fator crítico para a construção do banco de transformadores com núcleo de ar envolve o grande número de espiras de cabo isolado para o nível de tensão do elo cc e a área necessária para compor este banco trifásico. Uma análise mais criteriosa envolvendo os custos de cada uma das duas opções é o subsídio para a melhor solução técnica e econômica.

3.3.1 Transformador convencional com núcleo de ferro

Como já mencionado, a frequência de operação dos transformadores será 60 Hz, motivo que fez com que os transformadores convencionais fossem considerados neste

trabalho.

Não será possível utilizar somente um transformador trifásico pois é necessário ter acesso aos seis terminais do lado onde se fará a conexão com as Pontes-H, porém este fato pode ser levado em conta no projeto de construção do mesmo. Do lado do sistema ca os enrolamentos serão conectados em Y para que o fechamento e aterramento do neutro sirva de referência para o restante do sistema. Contudo, nada impede que os enrolamentos sejam conectados em Δ , com a referência dada pelo sistema ca local.

Como dados necessários para a modelagem de cada um dos três transformadores do banco trifásico, tem-se os dados abaixo.

Potência ativa (base):

$$P_b = \frac{50 \cdot 10^6}{3} = 16,667 MW. \quad (3.25)$$

Considerando que o fator de potência do sistema ca local é 0,8, a potência base é:

$$S_b = \frac{P}{0,8} = 20,833 MVA. \quad (3.26)$$

Tensão base no lado do sistema ca:

$$V_{bBT} = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7,967 kV. \quad (3.27)$$

Para calcular a tensão base no lado da Ponte-H a corrente base no lado AT I_{bAT} será igual à menor corrente no elo cc que garanta o funcionamento a plena carga do Tap HVDC Bidirecional. O valor adotado foi $I_D = 2,0$ kA. Então $I_{bAT} = 2,0$ kA. Com este valor e o valor da potência base obtém-se a tensão base V_{bAT} no lado da Ponte-H conforme abaixo:

$$V_{bAT} = \frac{S_b}{I_{bAT}} = \frac{20,833 \cdot 10^6}{2,0 \cdot 10^3} = 10,4167 kV. \quad (3.28)$$

A relação de espiras é obtida em seguida pela relação das duas tensões base:

$$a = \frac{V_{bAT}}{V_{bBT}} = 1,3074. \quad (3.29)$$

A indutância de magnetização L_m , referida ao lado de alta tensão, é calculada considerando-se que a corrente de magnetização de um transformador convencional é $I_{m\%} = 1,0\%$.

$$L_m = \frac{V_{b_{AT}}}{\omega \cdot I_m} = \frac{V_{b_{AT}}}{\omega \cdot I_{m_{pu}} \cdot I_{b_{AT}}} = \frac{10,4167 \cdot 10^3}{377 \cdot 0,01 \cdot 2 \cdot 10^3} = 1,3816H. \quad (3.30)$$

Considerando que a indutância de dispersão x_{disp} está distribuída igualmente entre os dois enrolamentos, e que o valor normalmente utilizado em transformadores convencionais é $x_{disp_{pu}} = 0,1\%$, tem-se que:

$$L_1 = \frac{1}{2} \frac{x_{disp_{pu}} \cdot Z_{b_{AT}}}{\omega} = \frac{1}{2} \frac{x_{disp_{pu}} \cdot V_{b_{AT}}^2 / S_b}{\omega} = 0,2303mH \quad (3.31)$$

Com o valor de L_1 e L_m obtém-se os valores das indutâncias próprias dos dois enrolamentos (L_{11} e L_{22}) e a indutância mútua M :

$$L_{11} = L_1 + L_m = 2,303 \cdot 10^{-4} + 1,3816 = 1,3818H, \quad (3.32)$$

$$L_{22} = \frac{L_{11}}{a^2} = \frac{1,3818}{1,3074^2} = 0,8084H, \quad (3.33)$$

e

$$M = \frac{L_m}{a} = \frac{1,3816}{1,3074} = 1,0567H. \quad (3.34)$$

O fator de acoplamento pode então ser obtido através da equação abaixo.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = 0,9998. \quad (3.35)$$

Todas as características acima estão resumidas na Tabela 3.1.

3.3.2 Transformador com núcleo de ar

Como o Tap HVDC Unidirecional opera com frequência de chaveamento elevada, a tensão e a corrente no transformador têm também frequência elevada, igual a frequência de chaveamento. Sendo assim, pode-se reduzir a indutância necessária nos enrolamentos do transformador, já que a reatância é proporcional à frequência (Equação 3.36). Adicionado a isto a isolação segura devido às distâncias entre os enrolamentos, chega-se a esta opção que é o Transformador com núcleo de ar.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (3.36)$$

Tabela 3.1: Características do transformador convencional com núcleo de ferro.

Grandeza	Valor	Descrição
S_b	20,8333 MVA	Potência base por transformador
L_{11}	1,3818 H	Indutância do enrolamento AT
L_{22}	0,8084 H	Indutância do enrolamento BT
M	1,0567 H	Indutância mútua
a	1,3074	Relação de espiras
k	0,9998	Fator de acoplamento
$V_{b_{BT}}$	7,9674 kV	Tensão base do lado BT
$V_{b_{AT}}$	10,4167 kV	Tensão base do lado AT
$I_{m\%}$	1 %	Corrente de magnetização
$x_{disp_{pu}}$	0,1 p.u.	Reatância de dispersão

No caso deste modelo de Tap HVDC Bidirecional, a principal vantagem do transformador com núcleo de ar, que seria a de operar satisfatoriamente em frequências elevadas, perdera sua importância. Mesmo assim, pelas características de confiabilidade no isolamento galvânico e possibilidade de chavear com ZVS ou ZCS ele será mantido como um segundo caso para estudo.

As principais características do transformador com núcleo de ar serão:

- Deve ser capaz de isolar tensões contínuas de até centenas de kilovolts em relação ao potencial de terra (a tensão nominal do elo cc mais suas oscilações e as oscilações provocadas pelo Tap HVDC Bidirecional);
- Deve ser capaz de suportar corrente contínua do elo cc de 2,61 kA (no enrolamento AT; valor utilizado no elo cc de Furnas);
- Deve suportar tensões alternadas de até 35 kV (pico) aplicadas no enrolamento de alta tensão (gerada pelo chaveamento);
- Deve suportar picos de corrente de até 4 kA no lado do sistema ca e até 10 kA no lado do elo cc (ambos em função da potência aparente máxima do conversor cc-ca).

O arranjo proposto e seu dimensionamento físico de acordo com os valores

de indutâncias do primário e secundário e o acoplamento entre os enrolamentos necessários para o Tap HVDC Unidirecional foram concebidos pelo Professor Carlos Portela (COPPE/UFRJ) inicialmente para o Tap HVDC Unidirecional de 5 MW [23]. Posteriormente foi redimensionado para o Tap HVDC de 25 MW [10][27], sendo este um equivalente de um banco com cinco transformadores do Tap HVDC de 5 MW. No caso atual, como teremos um transformador por fase onde o banco de transformadores deverá trabalhar com 50 MW, teremos três transformadores de 16,67 MW cada, e a potência aparente dependerá da potência reativa máxima determinada para operação satisfatória do sistema completo. O arranjo para o transformador do Tap HVDC redimensionado para 25 MW é mostrado na Figura 3.4.

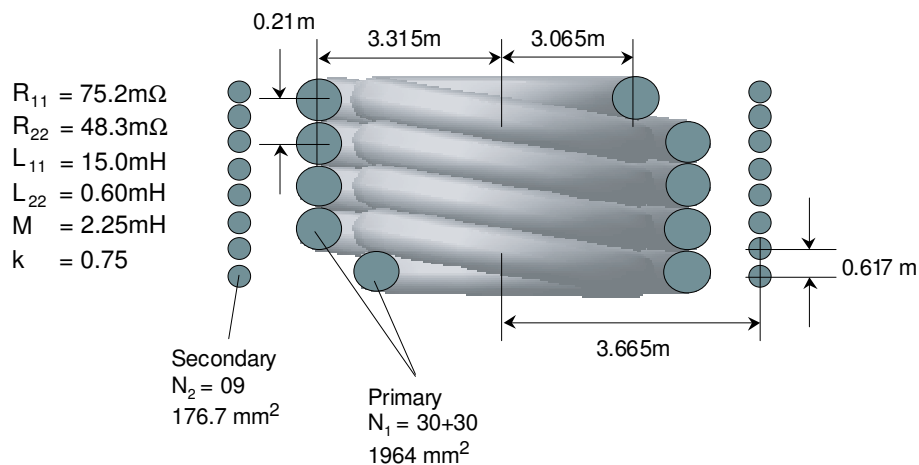


Figura 3.4: Transformador do Tap HVDC redimensionado para o Tap HVDC de 25 MW.

As características elétricas do transformador base calculado pelo prof. Portela são apresentadas na Tabela 3.2.

Redimensionamento para obter o banco trifásico

Para compor a tensão trifásica no lado do sistema ca, necessitamos de três transformadores idênticos compondo um banco trifásico de transformadores cuja potência ativa base será $P_b = 50\text{ MW}$. Determinou-se que o Tap HVDC deverá ser capaz de alimentar o sistema ca fornecendo potência ativa e reativa para cargas com fator de potência de até 0,8 para a potência nominal. A frequência nominal

Tabela 3.2: Características do transformador base calculado pelo prof. Portela.

Grandeza	Valor	Descrição
$L_{11_{5M}}$	3 mH	Indutância do enrolamento AT
$L_{22_{5M}}$	3 mH	Indutância do enrolamento BT
M_{5M}	2,25 mH	Indutância Mútua
$V_{b_{BT_{5M}}}$	5 kV	Tensão base do lado BT
$I_{b_{AT_{5M}}}$	2 kA	Corrente base do lado AT (corrente nominal do elo cc)
$S_{b_{5M}}$	5 MW	Potência base (potência nominal do barramento cc)
k	0.75	Fator de acoplamento

de operação do banco de transformadores será a frequência nominal do sistema ca local, ou seja, $f = 60$ Hz. Conseqüentemente, para cálculo das reatâncias a partir das indutâncias, tem-se que $\omega = 2\pi f = 377$ rad/s. A tensão base nos terminais dos transformadores conectados ao sistema ca será $V_{b_{BT}} = 13,8$ kV.

Para obter a potência total do banco trifásico de transformadores, deverá ser modelado um banco trifásico com capacidade total equivalente a dez dos transformadores da Tabela 3.2 ($10 \cdot 5$ MW = 50 MW). Considerando que este transformador já estava dimensionado para correntes maiores que a responsável pela potência ativa e que então pode trabalhar plenamente com f.p. = 0,8 (por análise dos resultados de trabalhos anteriores) será considerado que a nova potência base será:

$$S_{b_{50M}} = 50MVA. \quad (3.37)$$

A potência total do banco de transformadores $S_{b_{50M}}$ será a soma das potências dos três transformadores que o compõem. Então a potência por transformador será:

$$S_{trafo_{1\phi}} = \frac{S_{b_{50M}}}{3} = 16,67MVA. \quad (3.38)$$

Como no lado AT o conversor cc-ca trabalha com fonte de corrente, a indutância do enrolamento AT L_{11} tem que aumentar para suportar o novo limite de tensão na razão a seguir:

$$L_{11} = \frac{S_{b_{50M}}}{S_{trafo_{1\phi}}} \cdot L_{11_{5M}} = \frac{50}{16,67} \cdot L_{11_{5M}} = 10mH. \quad (3.39)$$

A nova tensão base no lado BT por transformador será:

$$V_{BT_{1\phi}} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = 7,967kV. \quad (3.40)$$

Este valor é 1,593 vezes o valor da tensão base utilizado no transformador de 5 MVA (5 kV).

A nova corrente base no lado BT por transformador será:

$$I_{BT_{1\phi}} = \frac{S_{trafo_{1\phi}}}{V_{BT_{1\phi}}} = 2,092kA. \quad (3.41)$$

Este valor é 2,092 vezes o valor da corrente base utilizado no transformador de 5 MVA (1 kA).

Para suportar a nova tensão base do lado BT deve-se colocar 1,593 enrolamentos em série:

$$L'_{22} = 1,593 \cdot L_{22_{5M}} = 4,780mH. \quad (3.42)$$

Finalmente, para suportar a nova corrente base deve-se colocar 2,092 enrolamentos L'_{22} em paralelo:

$$L_{22} = \frac{L'_{22}}{2,092} = \frac{4,780mH}{2,092} = 2,285mH. \quad (3.43)$$

Com isto a potência do transformador no enrolamento do lado BT aumentou $1,593 \cdot 2,092 = 3,333$ vezes, passando de 5 MVA para 16,667 MVA.

Com os valores das indutâncias dos dois enrolamentos e com o valor do fator de acoplamento definido na Tabela 3.2, obtém-se o valor da indutância mútua:

$$M = k \cdot \sqrt{L_{11} \cdot L_{22}} = 3,585mH. \quad (3.44)$$

Para obter a tensão base no lado AT, calcula-se a relação de espiras que é obtida pela razão abaixo:

$$a = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} = 2,092. \quad (3.45)$$

Com este valor da relação de espiras e com o valor da tensão base do lado BT pode ser obtido o valor da tensão base no lado de AT:

$$V_{b_{AT}} = a \cdot V_{b_{BT}} = 16,667kV. \quad (3.46)$$

Para obter o valor da corrente de magnetização I_m em % (modo de entrada deste dado no PSCAD) são necessários os valores da indutância do enrolamento AT e da corrente base do lado AT. A corrente base no lado de alta tensão $I_{b_{AT}}$ pode ser calculada como:

$$I_{b_{AT}} = \frac{S_{b_{1\phi}}}{V_{b_{AT}}} = 1000A. \quad (3.47)$$

A corrente de magnetização em % é dada pela equação abaixo:

$$I_{m\%} = 100 \cdot \frac{V_{b_{AT}}}{\omega L_{11} I_{b_{AT}}} = 442,1\%. \quad (3.48)$$

Para obter o valor da reatância de dispersão em p.u. (modo de entrada deste dado no PSCAD) é necessário conhecer o valor da impedância base do lado AT $Z_{b_{AT}}$. Este valor pode ser obtido a partir dos valores de tensão base $V_{b_{AT}}$ e potência base $S_{b_{50M}}$, como a seguir:

$$Z_{b_{AT}} = \frac{V_{b_{AT}}^2}{S_{b_{1\phi}}} = 16,667\Omega. \quad (3.49)$$

A reatância de dispersão em pu é então:

$$x_{disp_{pu}} = \omega \cdot \frac{L_{11} + a^2 \cdot L_{22} - 2 \cdot a \cdot M}{Z_{b_{AT}}} = 0,1131pu. \quad (3.50)$$

Todas as características acima estão resumidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Características do transformador com núcleo de ar.

Grandeza	Valor	Descrição
S_b	16,667 MVA	Potência base por transformador
L_{11}	10,000 mH	Indutância do enrolamento AT
L_{22}	2,285 mH	Indutância do enrolamento BT
M	3,585 mH	Indutância mútua
a	2,092	Relação de espiras
k	0,750	Fator de acoplamento
$V_{b_{BT}}$	7,967 kV	Tensão base do lado BT
$V_{b_{AT}}$	16,667 kV	Tensão base do lado AT
$I_{m\%}$	442,1 %	Corrente de magnetização
$x_{disp_{pu}}$	0,1131 p.u.	Reatância de dispersão

3.4 Controlador do Tap HVDC

A filosofia de controle implementada reside em impor e controlar as tensões nos terminais do banco de transformadores conectados ao sistema ca local. O controlador não trabalha com referências de potências ativa e reativa, como uma ordem de despacho do operador do SIN. Ao invés disto, tem como variáveis de entrada as tensões e correntes em seus terminais conectados ao sistema ca e o estado do disjuntor da geração local (fonte ca), visando ser o mais automatizado possível e ser também sensível às necessidades de demanda de potência das cargas do sistema ca local ou a possibilidade de injetar no elo cc a potência excedente da geração local.

Com estes objetivos foi desenvolvido o circuito de controle apresentado na Figura 3.5. Alguns blocos do controlador terão funções dedicadas ao sistema ca local, como controle de reativo (bloco **Teoria p-q**), sincronização por **PLL**, controle **PI** de amplitude da corrente de controle i_p , referência para modulação **sin** e tensão de compensação v_{ref} . Outros serão dedicados ao elo cc, como geração de ondas triangulares defasadas i_{tri} e chaveamento unipolar.

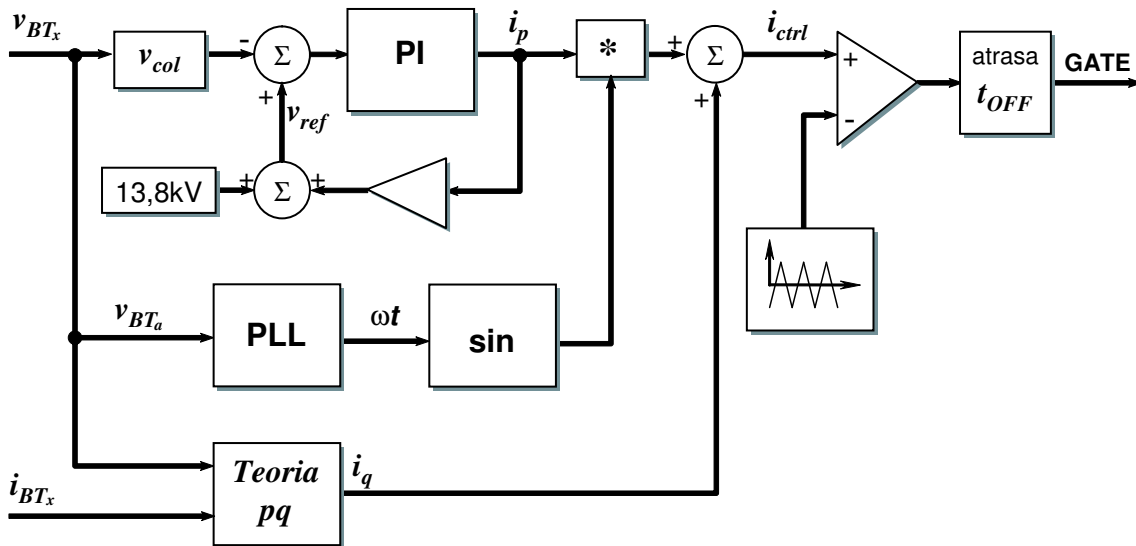


Figura 3.5: Controlador do Tap HVDC Bidirecional.

As funções de cada bloco do controlador serão descritas nas seções a seguir.

3.4.1 Corrente de controle

Para controlar as formas de onda das tensões nos terminais do banco de transformadores conectados ao sistema ca, tem-se o núcleo do circuito de controle que é a geração de uma corrente de controle para cada fase. As correntes sintetizadas são impostas ao circuito para obter a tensão desejada no lado BT dos transformadores.

Para gerar cada uma destas correntes de controle, o controle recebe como sinais de entrada os valores instantâneos das tensões que irá controlar e calcula o valor rms utilizando-se o conceito de valor eficaz coletivo de tensão (no inglês, *collective rms value*) [29] dado por:

$$v_{col} = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2}. \quad (3.51)$$

O controlador então compara o valor coletivo v_{col} com o valor de referência de tensão v_{ref} . Dividindo-se o valor coletivo pela tensão base tem-se o restante do controle em p.u., com a referência em 1 p.u. A diferença entre o valor medido e a referência, o erro de tensão v_{erro} , é aplicado a um controlador PI ajustado para eliminar erros de regime permanente e adequar a corrente de controle i_p o mais rápido possível a cada alteração das tensões no sistema ca local. A saída do PI é modulada para gerar as correntes senoidais defasadas e em fase com as tensões nos terminais dos transformadores pelo lado BT conforme Equação 3.52.

$$i_{p_x}(t) = i_p \cdot \sin(\omega t + \theta_x) \quad (3.52)$$

$$\text{onde } \begin{cases} x = a, b, c \\ \theta_x = 0, \frac{2\pi}{3}, -\frac{2\pi}{3} \end{cases} .$$

De acordo com o sentido da corrente, a tensão na barra do sistema ca pode ser maior ou menor que o valor de referência v_{ref} por haver entre esta e o conversor cc-ca a impedância dos transformadores e da linha equivalente. Para minimizar este efeito, o valor de referência de tensão do Tap HVDC Bidirecional variará em função da corrente de controle i_p e, conseqüentemente, da corrente que causa quedas de tensão nos transformadores e nas indutâncias da linha de distribuição (ou transmissão) entre o conversor cc-ca e a barra do sistema ca local. Para tanto, foi criado um controle de compensação por realimentação de i_p com v_{ref} como função de i_p que

funciona em função da presença ou não de fonte ca no sistema ca local (ver curvas das Figuras 3.6 e 3.7). Os valores apresentados nos dois gráficos foram obtidos heurísticamente após sucessivas simulações dos circuitos estudados.

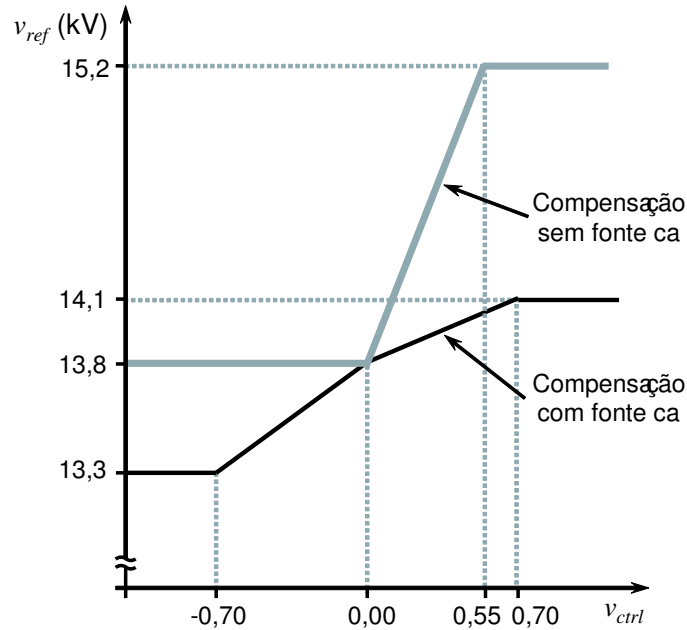


Figura 3.6: Tensão de referência como função da corrente de controle para o Tap HVDC Bidirecional com banco de transformadores com núcleo de ar.

3.4.2 Minimização da potência reativa consumida pelo banco de transformadores

Quando o Tap HVDC opera em conjunto com alguma geração local, este tende a consumir potência reativa do sistema ca, seja qual for a potência ativa nos terminais do Tap HVDC (injetando ou drenando energia do elo cc). Neste caso, com o objetivo de eliminar ou pelo menos minimizar o consumo de potência reativa do lado BT do banco de transformadores com núcleo de ar para que o sistema ca local não trabalhe com baixo fator de potência foi elaborado um módulo de controle baseado na Teoria p-q, para determinar a parcela da corrente de controle que deve corresponder ao consumo de potência reativa pelo banco de transformadores. Deve-se medir, além das três tensões no ponto de conexão do Tap HVDC ao sistema ca, as três correntes que circulam nos enrolamentos dos transformadores neste mesmo lado.

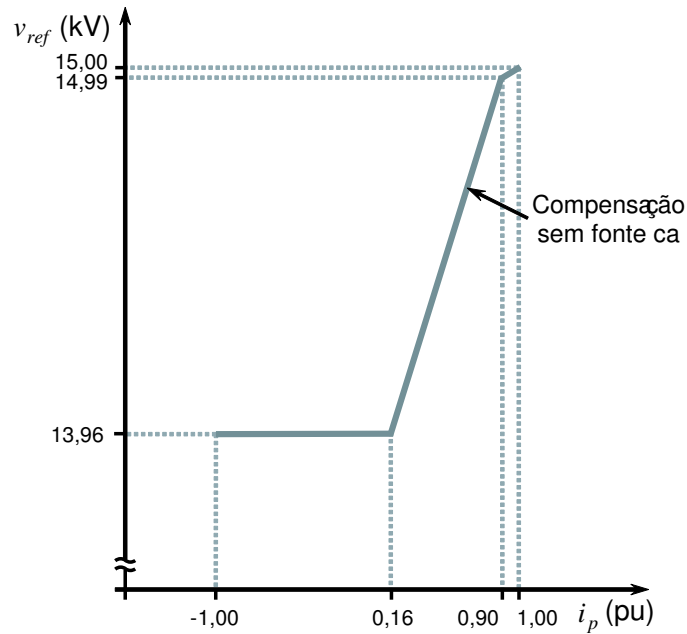


Figura 3.7: Tensão de referência como função da corrente de controle para o Tap HVDC Bidirecional com banco de transformadores com núcleo de ferro.

Através da Transformação de Clarke apresentada no início deste capítulo, esta interface trifásica entre o Tap HVDC e o sistema ca local pode ser transformada e representada por um sistema bifásico de referência também estacionária mas de coordenadas ortogonais entre si. A transformação foi apresentada nas Equações 3.9 e 3.10. As transformadas inversas de Clarke para os casos de tensão e corrente são apresentadas nas Equações 3.53 e 3.54, respectivamente, para transformar do sistema $\alpha\beta$ para o sistema convencional abc .

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.53)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.54)$$

A potência reativa é calculada pela Equação 3.11 e é dada por:

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta. \quad (3.55)$$

A potência reativa pode ainda ser uma referência fixa, dado que as tensões sobre

os terminais dos transformadores são praticamente constantes e a impedância destes é fixa.

Com o valor da potência reativa que se quer eliminar do ponto de conexão do banco de transformadores com o sistema ca, pode-se calcular as correntes de controle nas referências α e β :

$$\begin{bmatrix} i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}. \quad (3.56)$$

Utilizando a transformada inversa (Equação 3.54), as correntes de controle para minimizar a potência reativa indutiva são:

$$\begin{bmatrix} i_{q_a} \\ i_{q_b} \\ i_{q_c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix}. \quad (3.57)$$

Estes sinais deverão ser somados aos sinais i_{p_a} , i_{p_b} e i_{p_c} para obter os sinais de controle de corrente a serem sintetizados pelo conversor cc-ca. Quando este módulo de controle estiver desativado por ausência de fonte ca local, as correntes sintetizadas serão somente as correntes de controle i_{p_a} , i_{p_b} e i_{p_c} (Equação 3.58).

$$i_{ctrl_x}(t) = i_{p_x} + i_{q_x} \quad (3.58)$$

$$\text{onde } \left\{ \begin{array}{l} x = a, b, c \end{array} \right. .$$

3.4.3 Sincronização com o sistema ca

O circuito PLL (*Phase Locked Loop*) é o módulo do controle responsável pela sincronização do conversor cc-ca com o sistema ca local quando houver fonte ca presente neste quando da partida do Tap HVDC Bidirecional.

O modelo de PLL utilizado, o EPLL - *Enhanced PLL* (PLL aumentado ou aprimorado), é um circuito capaz de detectar ângulo, fase, amplitude e frequência do sinal aplicado em sua entrada, com saída sincronizada em tempo real na componente fundamental do sinal de entrada em amplitude e frequência. O EPLL, proposto em

[34] e adaptado para não estar defasado em 90° , é apresentado na Figura 3.8. Da tensão $v_{BT_a}(t)$ aplicada na entrada é subtraído o seu sinal suavizado extraído $y(t)$ para obter o erro $e(t)$, que é aplicado ao PI para obter a frequência angular ω . Quando $y(t) = v_{BT_a}(t)$, $e(t) = 0$ e a saída ωt está sincronizada com a componente fundamental de $v_{BT_a}(t)$. O parâmetro K controla a convergência da amplitude. K_P e K_I controlam a convergência da fase e ângulo detectados.

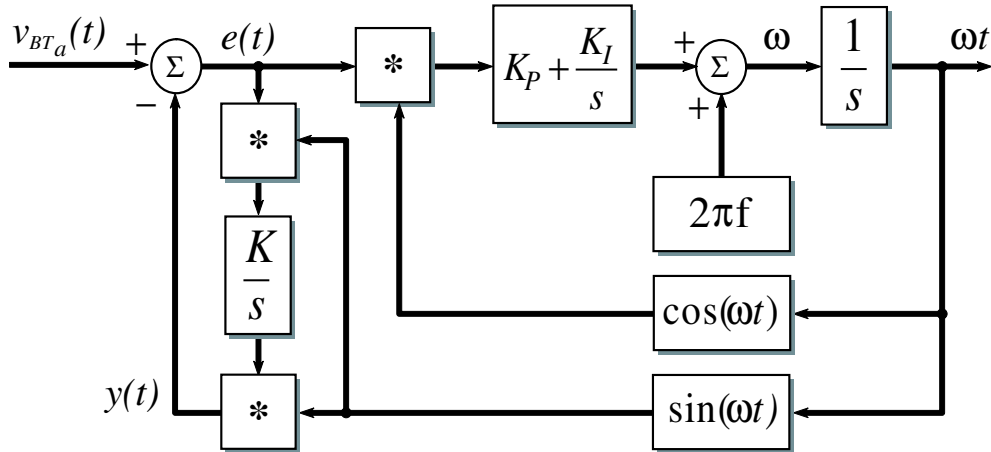


Figura 3.8: Diagrama em blocos do EPLL.

Se no momento em que o Tap HVDC iniciar a operação houver ausência de tensão no sistema ca, ele deverá utilizar uma referência interna para obter ωt (rad/s). Isto é obtido aplicando-se a constante 2π na entrada de um integrador com constante de tempo igual a $1/60s$ e reiniciado este sempre que a saída atingir o valor 2π .

Para determinar qual valor de ωt utilizar, o Tap HVDC Bidirecional receberá o sinal do estado do disjuntor da fonte ca e selecionará o sinal de sincronismo adequado.

3.4.4 Geradores de onda triangular

Para obter uma menor variação de tensão nos terminais do Tap HVDC, cada Ponte-H possui um gerador independente de onda triangular i_{tri} , onde i_{tri_B} e i_{tri_C} são defasados 240° e 120° respectivamente em relação à i_{tri_A} (Figura 3.9). Assim garante-se que os degraus de tensão gerados por cada chaveamento não estarão sincronizados, gerando menor amplitude de v_{tap} e conseqüentemente menor *ripple* na tensão v_{tap} imposta ao elo cc. O efeito em v_{tap} causado pela diferença entre ondas

triangulares sincronizadas ou defasadas será apresentado no capítulo seguinte.

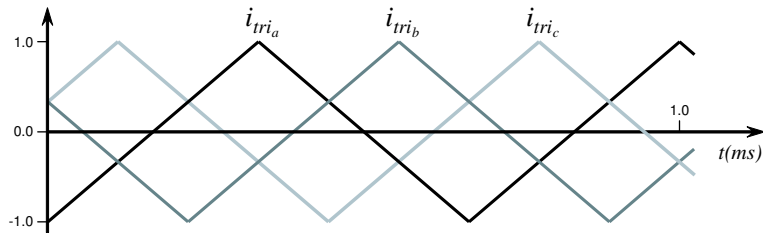


Figura 3.9: Ondas triangulares defasadas.

As ondas triangulares podem ainda ser sincronizadas com o sinal de controle para que a frequência de chaveamento f_{PWM} seja menor que vinte e uma vezes a frequência do sistema f_{ca} . Este múltiplo define um limite de aceitabilidade de sub-harmônicos gerados pelo chaveamento PWM. Para $f_{PWM} < 21 \cdot f_{ca}$, f_{PWM} tem que ser um múltiplo inteiro e ímpar de f_{ca} para chaveamento bipolar, ou qualquer inteiro para chaveamento unipolar. Durante a modelagem e simulação no PSCAD, o valor encontrado que proporcionou bons resultados foi $f_{PWM} = 1500 \text{ Hz}$.

$$f_{PWM} = 1500 \text{ Hz} = 25 \cdot f_{ca} = 25 \cdot 60 \text{ Hz}. \quad (3.59)$$

3.4.5 Geração de tempo morto

Para evitar picos de tensão decorrentes de chaveamento da corrente do elo cc, um tempo morto de $3 \mu\text{s}$ foi adicionado durante o bloqueio dos GTO, ou seja, na mudança dos estados conduzindo (ON) para desligado (OFF). Assim assegura-se que um GTO seja bloqueado somente após o outro passar a conduzir. Este procedimento então garante caminho para a corrente do elo cc durante a comutação e é o dual do tempo morto que retarda o disparo das chaves em um conversor fonte de tensão para não provocar curto-circuito no barramento cc.

3.4.6 Chaveamento unipolar

O Chaveamento unipolar [19] tem como objetivo impor corrente no ramo central de cada Ponte-H em três valores: $+I_d$, $-I_d$ e zero. Assim a corrente sobre o ramo

central de cada Ponte-H terá sempre o mesmo sinal de i_{ctrl} , variando entre zero e $+I_d$ ou entre $-I_d$ e zero. Com esta menor variação da corrente imposta no ramo central da Ponte-H, a tensão sobre os mesmos elementos passivos terá menor *ripple*, e este efeito deve ser observado em v_{tap} . Outra grande vantagem do chaveamento unipolar é dobrar a frequência de chaveamento da corrente do elo cc sem dobrar a frequência de corte e disparo de cada GTO particularmente. Assim o conteúdo harmônico gerado pelo chaveamento unipolar se situa em frequências mais altas, que podem ser mais facilmente filtradas.

A Figura 3.10 apresenta o controle do Tap HVDC Bidirecional até a geração das tensões de controle das três fases. Como sinais de entrada, o controle recebe as tensões e correntes dos terminais BT do banco de transformadores. A partir deste ponto esses sinais são comparados às ondas triangulares das respectivas fases, passando para o bloco de interpolação e por fim para a aplicação do tempo morto. Os circuitos que fazem a comparação da corrente de controle de cada fase (i_{ctrl}) com a onda triangular da respectiva fase (i_{tri}) para gerar os quatro sinais de disparo para cada GTO da Ponte-H da fase em questão são apresentados na Figura 3.11. Os circuitos das demais fases são semelhantes.

Na Figura 3.12 apresentamos os sinais de controle de uma fase: a referência normal e invertida i_{ctrl} e $-i_{ctrl}$, a onda triangular i_{tri} e os sinais de disparo de cada GTO de uma das Pontes-H G_1 , G_2 , G_3 e G_4 .

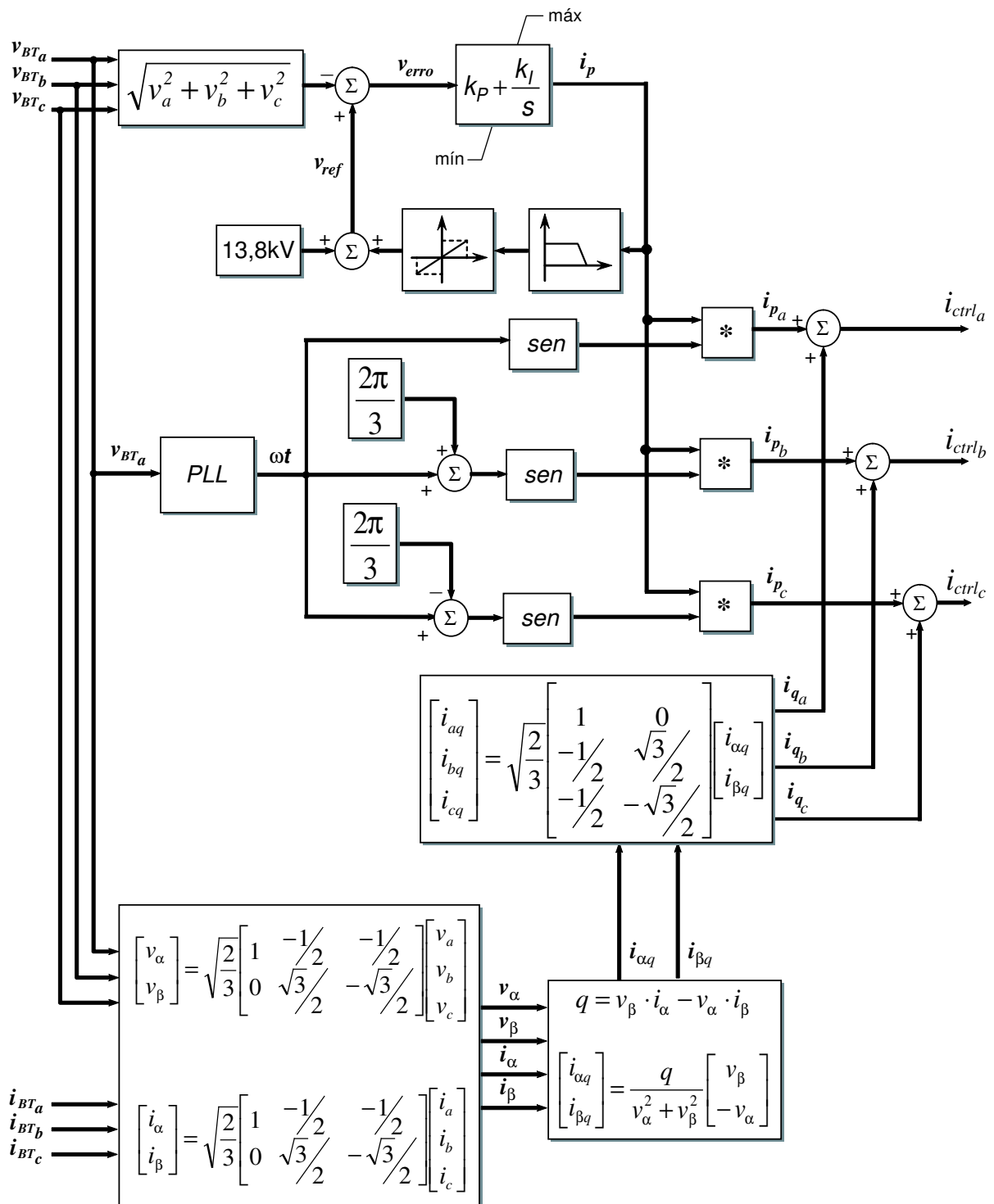


Figura 3.10: Circuito de controle do Tap HVDC Bidirecional.

Capítulo 4

Análise do desempenho do conversor cc-ca

Neste capítulo é modelado um sistema ca simples, com cargas passivas e fonte ca com impedância série. Com este sistema é feita a análise do comportamento do Tap HVDC Bidirecional operando ora com banco de transformadores com núcleo de ar, ora com banco de transformadores convencionais. Em alguns casos a fonte ca estará desconectada do sistema ca local.

”A mente que se abre a uma idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

A análise do Tap HVDC Bidirecional será feita através de simulações em duas situações distintas. Na primeira o Tap HVDC Bidirecional estará sincronizado com o sistema ca local e trocará energia entre o sistema ca local e o elo cc do Sistema HVDC sem exigir potência reativa do sistema ca local para magnetizar seu banco de transformadores, para o caso de estar operando com banco de transformadores com núcleo de ar. Na segunda situação, o Tap HVDC Bidirecional alimentará sozinho a carga variável do sistema ca local. Ele deverá, para tanto, regular a tensão em $1 \text{ p.u.} \pm 5\%$ fornecendo até 50 MW e trabalhando com fator de potência igual a 0,8 indutivo.

Algumas alterações no controle serão feitas entre uma situação e outra por um sinal lógico, a informação da presença ou não de fonte ca pelo estado do seu disjuntor. Se a fonte estiver ligada, este sinal ativará o sinal do PLL para o Tap HVDC sincronizar com a tensão do sistema ca local e ativará também o controle de potência reativa pela Teoria p-q. Se a fonte estiver desligada, este sinal ativará o gerador de ωt interno e desativará o controle de potência reativa.

Nos três primeiros casos apresentados a seguir, o elo cc será representado apenas por uma fonte de corrente contínua e os casos de simulação apresentados. No quarto caso, o Tap HVDC Bidirecional será simulado inserido em um Sistema HVDC completo, o *CIGRÉ HVDC Benchmark*. Todos estes casos serão simulados com o programa PSCAD/EMTDC.

4.1 O Simulador PSCAD

O PSCAD/EMTDC é uma ferramenta de simulação profissional para análise de sistemas, tendo sua aplicação principal em sistemas elétricos de potência. O PSCAD é a interface gráfica do usuário enquanto que o EMTDC é o software de simulação. A interface gráfica facilita a utilização do EMTDC pois permite ao usuário construir esquematicamente o circuito, processar a simulação, analisar os resultados e administrar os dados num ambiente completamente integrado.

Ele faz parte do grupo de simuladores que trabalham com passo de simulação fixo, ou *time step* fixo. A maior parte dos possíveis problemas de resolução de pontos

de indeterminação, como chaveamento ocorrendo em pontos diferentes dos extremos do intervalo definido como *time step*, são solucionados pelo uso da opção *Interpolate switching events*, que obriga o simulador a recalculer todas as variáveis no momento do chaveamento.

A simulação pode ser iniciada com todos os elementos armazenadores de energia desenergizados, as fontes de tensão e ou corrente iniciando em zero e motores em repouso. A outra opção é começar a simulação a partir de um arquivo contendo todos os dados do final de uma simulação anterior do mesmo circuito, dando continuidade a um ponto de operação já conhecido.

4.2 Sistema ca local

O sistema ca local, com o qual o Tap HVDC Bidirecional se conecta pelo lado BT, é composto de uma indutância série representando uma linha de transmissão, ou o equivalente de um sistema de distribuição, e uma barra onde estão uma fonte de tensão trifásica com impedância série e um banco de cargas RL. Foi escolhida como tensão nominal do sistema ca local a tensão padronizada de 13,8 kV, típica de sistemas de distribuição de energia elétrica urbanos. O diagrama unifilar do sistema ca desde os terminais do conversor cc-ca até as cargas e a fonte pode ser visto na Figura 4.1.

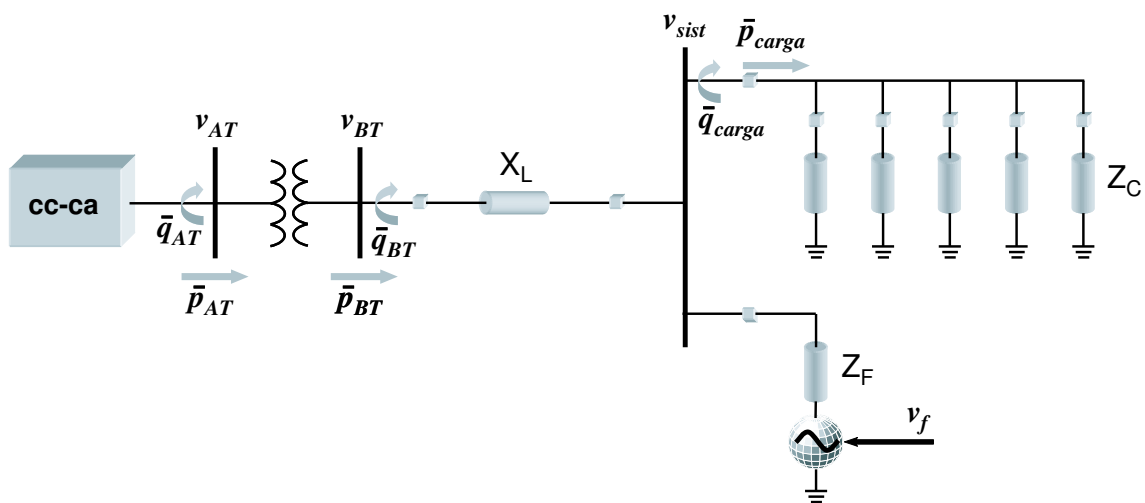


Figura 4.1: Diagrama unifilar do sistema ca local.

Considerando a potência base de 62,5 MVA (50 MW e fator de potência 0,8) e a tensão base de 13,8 kV, a impedância base é

$$Z_{b_{BT}} = \frac{V_b^2(kV)}{S_b(MVA)} = \frac{13,8^2}{62,5} = 3,047\Omega. \quad (4.1)$$

Para um valor de 0,10 p.u. de impedância do sistema de distribuição, tem-se o valor da reatância série, e dividindo-se esta por $\omega = 2 \cdot \pi \cdot 60$ chega-se ao valor da indutância:

$$L_{LT} = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,10 \cdot Z_{b_{BT}}}{\omega} = 0,8mH. \quad (4.2)$$

A subestação é representada por uma barra à qual se conectam a linha, as cargas RL e uma fonte de tensão trifásica balanceada com impedância RL série. Nos terminais da fonte, a potência de curto-circuito é de 1782 MVA. Nos terminais do banco de transformadores a potência de curto circuito é de 538 MVA no lado BT e 251 MVA no lado AT.

Em uma barra típica, a carga é composta de motores de indução (50 a 70%), aquecimento e iluminação (20 a 30%) e motores síncronos (5 a 10%). Motores de indução são geralmente modelados como cargas de potência constante, enquanto que aquecimento e iluminação são geralmente modelados como impedância constante. A modelagem de cargas como impedância constante é a mais apropriada para estudos de estabilidade, mas para fins de simplificação será utilizada aqui também, mesmo que este estudo envolva não só a estabilidade, mas também a dinâmica do sistema como um todo.

A dinâmica do sistema será testada com vários destes ramos RL em paralelo chaveados para se ter degraus de potência no Tap HVDC Bidirecional. Estes ramos RL são conectados em Y para formar uma carga trifásica balanceada. A potência ativa para cada carga trifásica é $P = 10$ MW. Sendo o fator de potência f.p. de cada carga, e conseqüentemente do banco de cargas, igual a 0,8 indutivo para frequência nominal de 60 Hz, tem-se que a potência aparente de cada carga trifásica é $S = 12,5$ MVA e a potência reativa indutiva é $Q = 7,5$ Mvar, de acordo com:

$$S = \frac{P}{f.p.} = \frac{10 \cdot 10^6}{0,8} = 12,5MVA. \quad (4.3)$$

$$Q = S \cdot \sin(\arccos(f.p.)) = 12,5 \cdot 10^6 \cdot \sin(\arccos(0,8)) = 7,5Mvar. \quad (4.4)$$

O valor de cada resistência será:

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{P}{\frac{S^2}{V^2}} = \frac{P \cdot V^2}{S^2} = \frac{V^2 \cdot fp^2}{P} = \frac{13800^2 \cdot 0,8^2}{10 \cdot 10^6} = 12,1882\Omega. \quad (4.5)$$

O valor de cada reatância indutiva será:

$$X_L = \frac{Q}{I^2} = \frac{Q}{\frac{S^2}{V^2}} = \frac{Q \cdot V^2}{S^2} = \frac{V^2 \cdot fp^2}{Q} = \frac{13800^2 \cdot 0,6^2}{7,5 \cdot 10^6} = 9,1411\Omega. \quad (4.6)$$

Com os valores da reatância e da frequência nominal temos o valor de cada indutância:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{9,1411}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 0,0242H. \quad (4.7)$$

4.3 Distúrbios

4.3.1 Variação da corrente do elo cc

Em alguns instantes dos casos estudados serão aplicadas variações na corrente do elo cc entre 76,6 % e 100,0 %, correspondendo a 2,00 kA e 2,61 kA respectivamente. Será verificado se esta variação provoca alterações visíveis nas tensões do sistema ca e na tensão sobre os terminais do conversor conectados ao elo cc. Será verificado se os sinais de controle se alteram para compensar estas variações.

4.3.2 Variações de carga

O banco de cargas RL será chaveado para gerar variações de potência consumida ao longo das simulações. Para tensão nominal, tem-se que tal variação resultará no consumo de potência conforme a Tabela 4.1.

4.3.3 Variações da fonte ca

A tensão da fonte ca do sistema ca local variará em módulo. Com o Tap regulando a tensão, ele tenderá a absorver ou fornecer energia para equilibrar a tensão em torno

Tabela 4.1: Referências para variações de carga com o tempo.

$t(s)$	Carga aplicada (%)	P(MW)	Q(Mvar)	S(MVA)
0,2	20,0 %	10,0	7,5	12,5
0,3	40,0 %	20,0	15,0	25,0
0,4	60,0 %	30,0	22,5	37,5
0,5	80,0 %	40,0	30,0	50,0
0,6	100,0 %	50,0	37,5	62,5
0,8	80,0 %	40,0	30,0	50,0
0,9	60,0 %	30,0	22,5	37,5
1,0	40,0 %	20,0	15,0	25,0
1,1	20,0 %	10,0	7,5	12,5
1,2	0,0 %	0,0	0,0	0,0

de 1,0 p.u. na barra equivalente do sistema ca (ver Figura 4.1). Com isto, ele drenará ou injetará energia no elo cc. A variação da tensão nominal da fonte e a variação esperada da potência na barra ca são as definidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Referências para variações de tensão da fonte ca e a potência resultante na barra.

$t(s)$	Tensão (kV)	P(MW)	$t(s)$	Tensão (kV)	P(MW)
0,0	13,800	0,0	2,5	13,711	-20,0
1,3	13,845	10,0	2,6	13,666	-30,0
1,4	13,889	20,0	2,7	13,621	-40,0
1,5	13,934	30,0	2,8	13,576	-50,0
1,6	13,978	40,0	3,0	13,621	-40,0
1,7	14,023	50,0	3,1	13,666	-30,0
1,9	13,978	40,0	3,2	13,711	-20,0
2,0	13,934	30,0	3,3	13,755	-10,0
2,1	13,889	20,0	3,4	13,800	0,0
2,2	13,845	10,0	3,5	14,023	50,0
2,3	13,800	0,0	3,65	13,576	-50,0
2,4	13,755	-10,0	3,8	13,800	0,0

4.4 Resultados de simulação

Em todos os casos simulados a seguir é esperado manter a tensão na barra do sistema ca regulada em 1,0 p.u. e atender a carga passiva e a fonte ca com os valores apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 respectivamente.

4.4.1 Caso 1: sistema ca com geração local e operando com banco de transformadores com núcleo de ar

Este caso abrangerá maior quantidade de eventos tanto no elo cc, com variações na fonte de corrente contínua, quanto no sistema ca local, com variações de carga e da fonte ca. Sendo assim, algumas análises feitas com base nos resultados obtidos neste caso não serão repetidas nos outros casos estudados a seguir.

Primeiramente são apresentados os resultados da simulação com todos os chaveamentos do banco de cargas e as variações de tensão da fonte ca. Em seguida alguns resultados são mostrados em detalhe durante o chaveamento da carga de 40 MW (50 MVA) para 50 MW (62,5 MVA) e em torno dos instantes em que ocorrem variações instantâneas da corrente do elo cc. Em $t = 1,8$ s, i_D cai de 2,61 kA para 2,00 kA. Em $t = 2,9$ s, i_D retorna ao valor nominal de 2,61 kA. Por último são apresentadas variáveis do circuito de controle que compõem a corrente de controle de uma das fases e os sinais internos do circuito de sincronismo - PLL.

Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 4,0$ s

Os resultados apresentados aqui mostram a dinâmica do sistema durante todo o intervalo de tempo previsto nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Na Figura 4.2 observa-se a variação da amplitude da corrente de controle i_p proporcional às variações da potência ativa demandada pelas cargas RL, à variação da potência ativa da fonte ca e inversamente proporcional à variação da corrente no elo cc, de acordo com o sentido da potência ativa. Na partida do Tap HVDC Bidirecional, a alta corrente de magnetização dos transformadores causa perturbação no circuito de controle por até 300 ms. Como função de i_p , a tensão de referência v_{ref}

(Figura 4.3) varia para compensar as quedas de tensão até a barra do sistema ca.

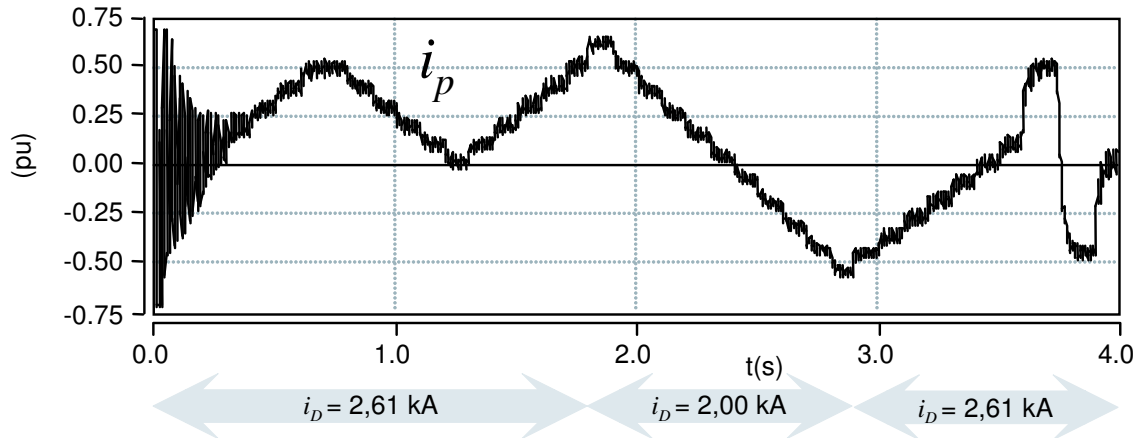


Figura 4.2: Corrente de controle fornecida pelo controlador PI do Tap HVDC Bidirecional.

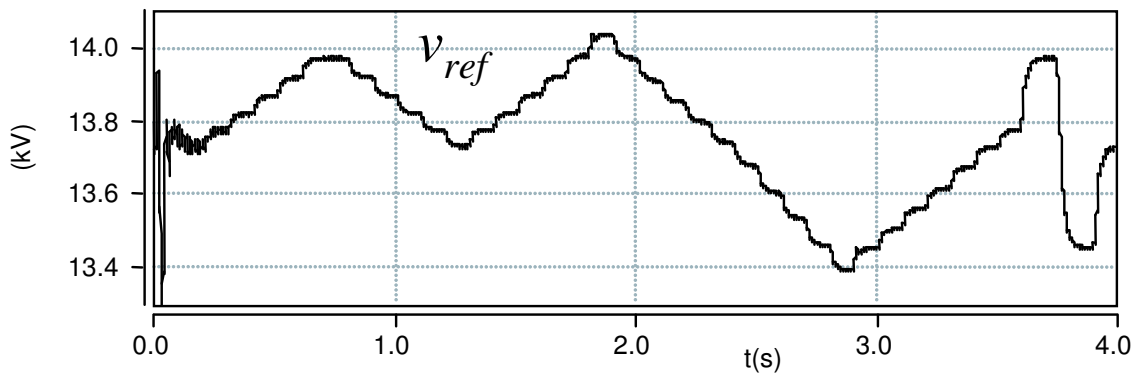


Figura 4.3: Tensão de referência para os terminais do lado BT do banco de transformadores.

A potência ativa no lado AT do banco de transformadores pode ser observada na Figura 4.4. No lado BT os valores são os mesmos, e por isto o gráfico foi omitido. As potências reativas nos lados BT e AT podem ser vistas nas Figuras 4.5 e 4.6 respectivamente. Fica evidente o consumo de potência reativa do lado AT decorrente da alta corrente de magnetização dos transformadores com núcleo de ar, neste caso 404%. No lado BT, o controle de reativo minimiza o consumo de potência reativa consumida pelo banco de transformadores e fornecida pelo sistema ca local.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os valores médios instantâneos das potências reativas nos dois lados do banco de transformadores para o Tap HVDC Bidirecional operando sem o módulo do controlador que minimiza o consumo de potência reativa

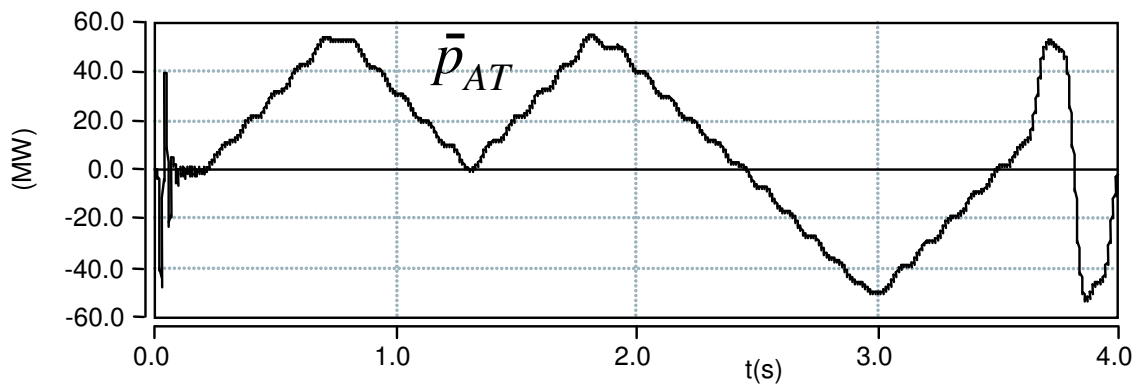


Figura 4.4: Potência ativa no lado AT do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor cc-ca para o sistema ca).

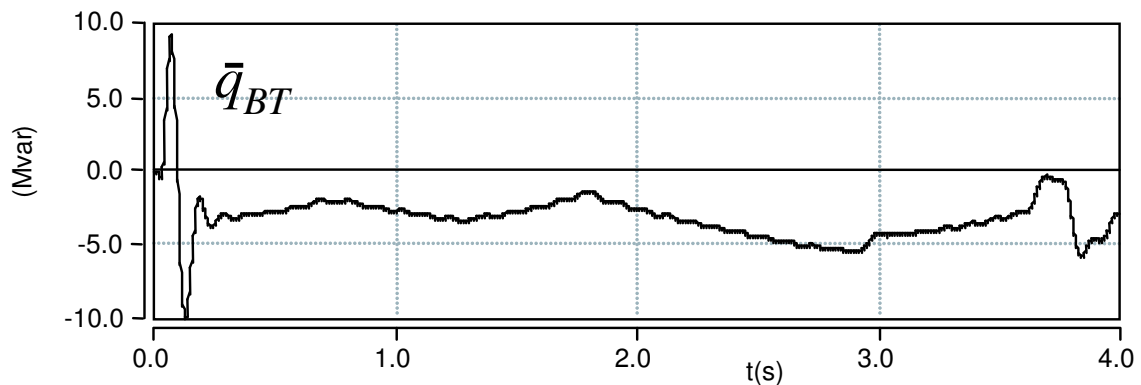


Figura 4.5: Potência reativa no lado BT do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).

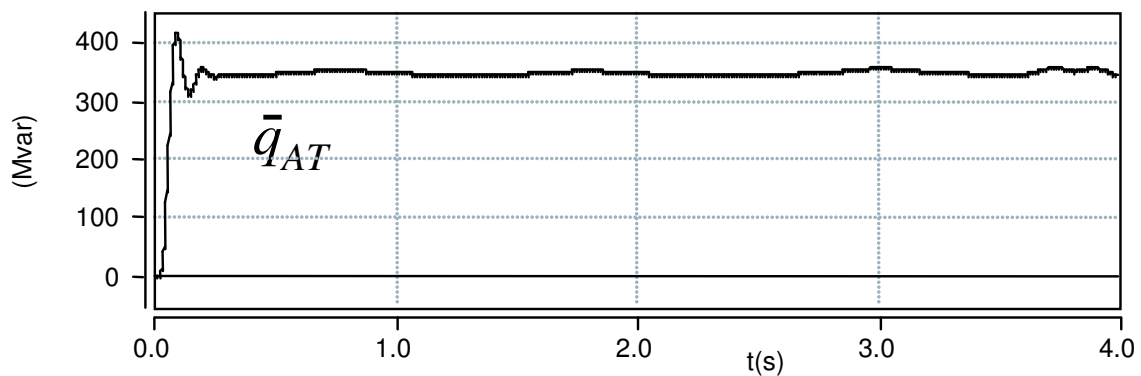


Figura 4.6: Potência reativa no lado AT do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).

pelos enrolamentos do lado BT do banco de transformadores (módulo **Teoria p-q** da Figura 3.5). Neste mesmo lado, o consumo de potência reativa é em média cinco vezes maior com este módulo do controlador desativado do que com o módulo ativado

(comparar com a Figura 4.5). No lado AT o consumo de potência reativa permaneceu praticamente o mesmo, com o mesmo valor de pico porém com valor médio menor (comparar com a Figura 4.6). Como explicado no capítulo anterior, o objetivo da introdução deste módulo do controlador foi reduzir o consumo de reativo do lado BT para que o sistema ca local não forneça potência com baixo fator de potência. O consumo total de potência reativa permaneceu o mesmo ($\bar{q}_{AT} + \bar{q}_{BT} \cong 355$ Mvar).

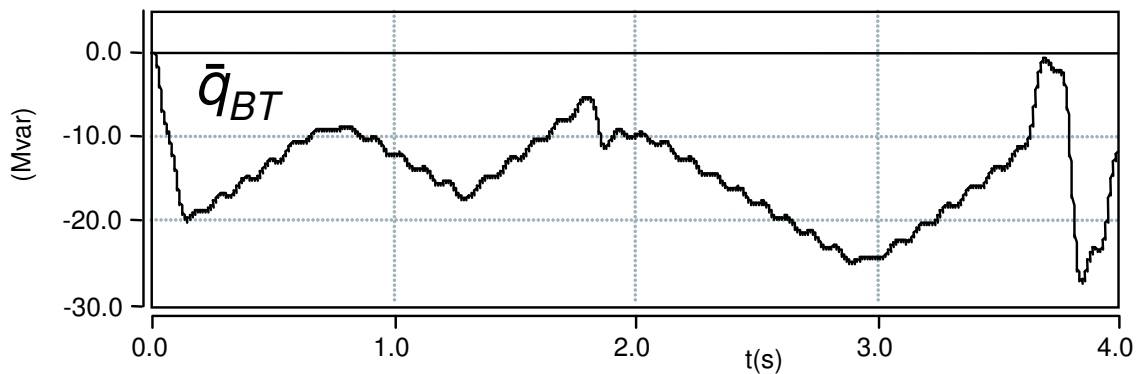


Figura 4.7: Potência reativa no lado BT do banco de transformadores sem minimizar o consumo de potência reativa (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).

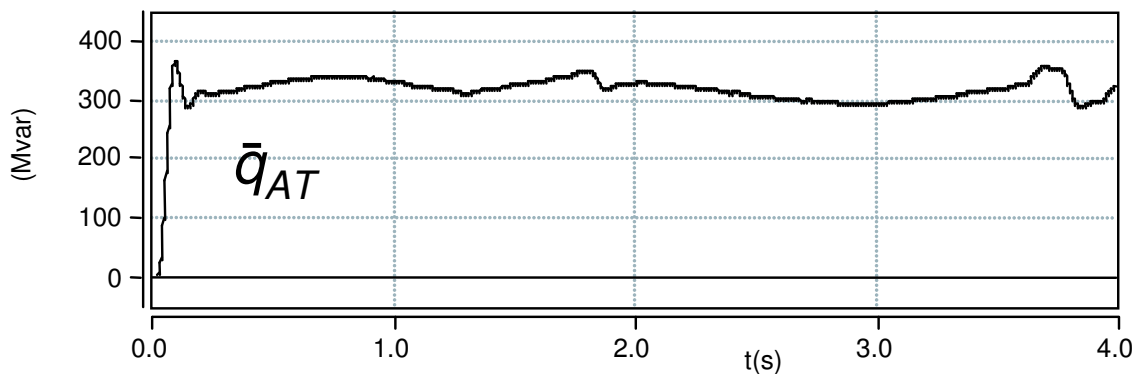


Figura 4.8: Potência reativa no lado AT do banco de transformadores sem minimizar o consumo de potência reativa (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).

Na Figura 4.9 pode-se observar a queda de tensão entre os terminais dos transformadores e a barra do sistema ca. Com alguma sobretensão em v_{BT} é possível manter a tensão na barra do sistema ca em $v_{sist} = 1,00 \pm 0,05$ p.u.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam a variação da tensão v_{tap} sobre os terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc com os sinais de disparo gerados

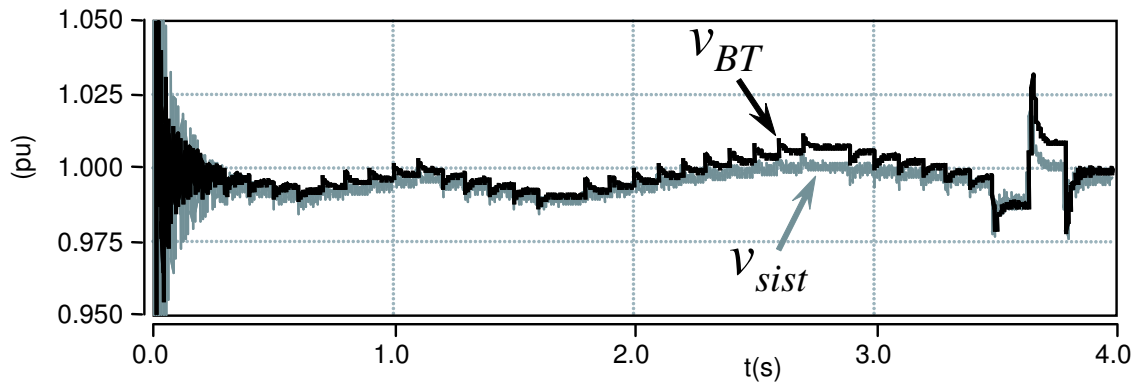


Figura 4.9: Tensões de linha na barra do sistema ca local.

por comparação com ondas triangulares defasadas entre si. A tensão \bar{v}_{tap} é o valor médio instantâneo de v_{tap} obtida pela aplicação de um filtro passa-baixas (Butterworth de quinta ordem em 10 Hz) na tensão medida conforme indicado na Figura 4.10. Na realidade, esta tensão possui conteúdo harmônico de alta frequência devido ao chaveamento da Ponte-H. A Figura 4.12 apresenta a mesma tensão para o controlador operando com um único sinal de onda triangular para comparação e geração dos pulsos de disparo.

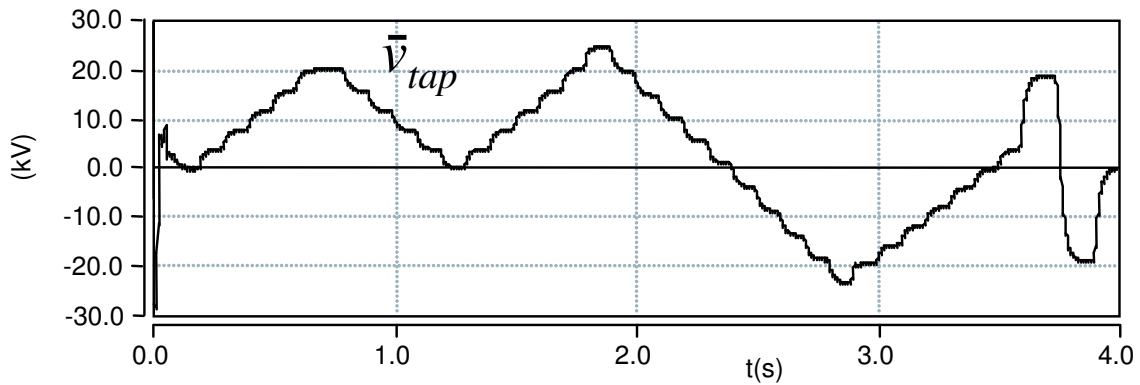


Figura 4.10: Tensão média instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.

Como houve queda na corrente do elo cc em $t = 1,8$ s e o Tap HVDC Bidirecional continuou drenando a mesma potência (50MW entre $t = 1,7$ s e $t = 1,9$ s), pela Equação 3.4 tem-se que a tensão v_{tap} tem que aumentar pela razão inversa da diminuição da corrente i_D para manter constante a potência. Colocando v_{tap} em evidência na Equação 3.4 tem-se

$$\bar{v}_{tap_{t \rightarrow 1,8s}}(t) = \frac{50 \cdot 10^6}{2610} = 19157V. \quad (4.8)$$

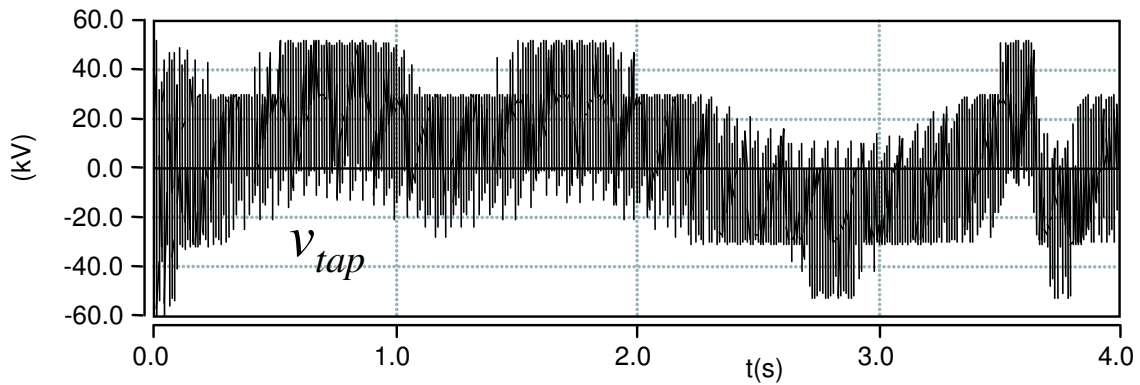


Figura 4.11: Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc com i_{tri_A} , i_{tri_B} e i_{tri_C} defasadas entre si.

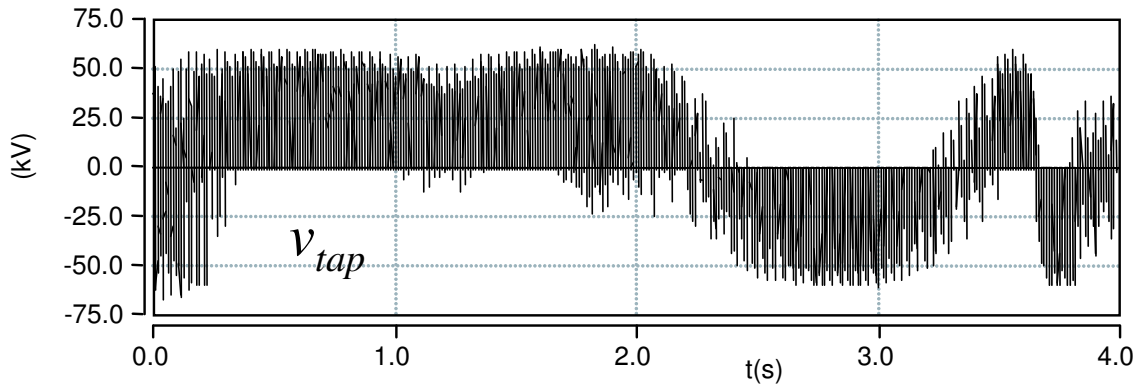


Figura 4.12: Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc com gerador de onda triangular único ($i_{tri_A} = i_{tri_B} = i_{tri_C}$).

Com $i_D = 2,00kA$ a tensão muda para

$$\bar{v}_{tap_{t \rightarrow 1,9s}}(t) = \frac{50 \cdot 10^6}{2000} = 25kV. \quad (4.9)$$

Na Figura 4.10 fica evidente a alteração na tensão \bar{v}_{tap} conforme calculado acima.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os sinais referentes ao módulo de sincronismo do circuito de controle para ilustração do funcionamento do PLL utilizado. A Figura 4.13 apresenta a tensão de entrada $v_{BT_a}(t)$ em pu e a tensão suavizada extraída de $v_{BT_a}(t)$ para comparação $y(t)$. A diferença entre $v_{BT_a}(t)$ e $y(t)$ é o erro $e(t)$ que é modulado por $\cos(\omega t)$ e aplicado ao controlador PI que rastreia a fase (Figura 4.14). Também na Figura 4.14, A é a amplitude que é modulada por $\sin(\omega t)$ para gerar $y(t)$.

A medida que $y(t)$ se aproxima de $v_{BT_a}(t)$, o erro $e(t)$ diminui e ω se aproxima

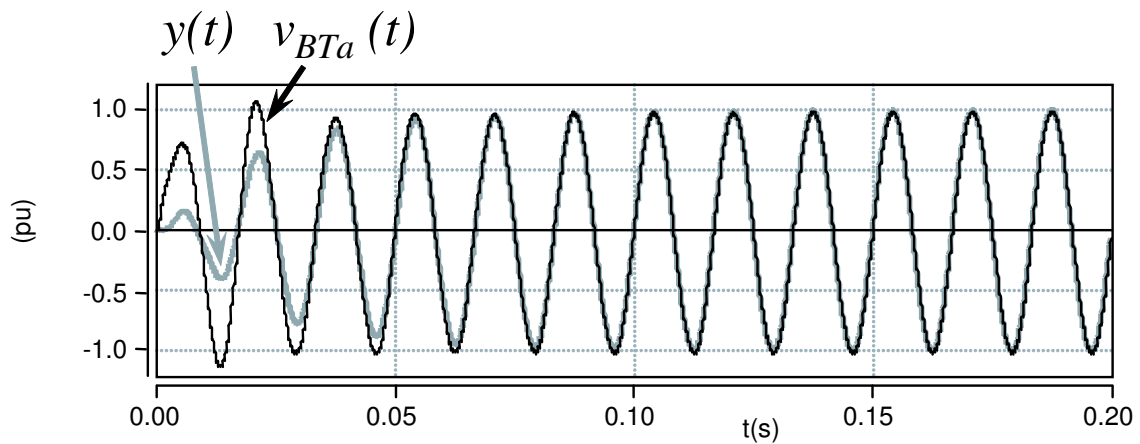


Figura 4.13: Tensão aplicada na entrada do PLL $v_{BTa}(t)$ e tensão suavizada extraída $y(t)$.

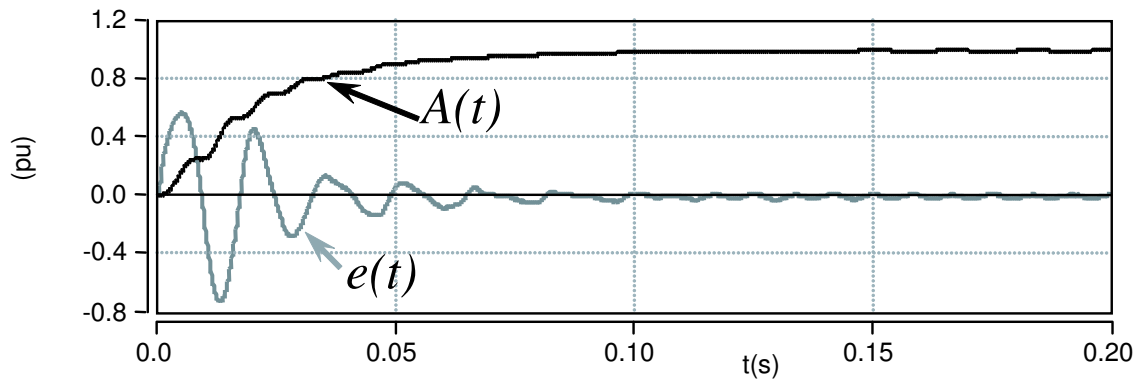


Figura 4.14: Amplitude da tensão suavizada e erro de tensão aplicado ao controlador PI.

do seu valor nominal $2\pi f = 377 \text{ rad/s}$ (Figura 4.15). Aplicando ω em um integrador com constante de tempo de 1 s e com reset a cada 2π é obtido ωt (Figura 4.16), que é o sinal entregue pelo PLL ao restante do circuito de controle do Tap HVDC Bidirecional. Por último, a Figura 4.16 apresenta a dinâmica do sinal de ângulo ωt para este primeiro caso estudado.

Resultados - $2,75 < t < 2,95 \text{ s}$

Parte da dinâmica da operação do conversor e do sistema ca local serão evidenciados apresentando algumas variáveis da seção anterior em um intervalo de tempo menor, compreendendo o instante em que a carga RL passa de 40 MW para 50 MW ($t = 2,8 \text{ s}$) e o instante em que a corrente do elo cc i_D passa de 2,61 kA

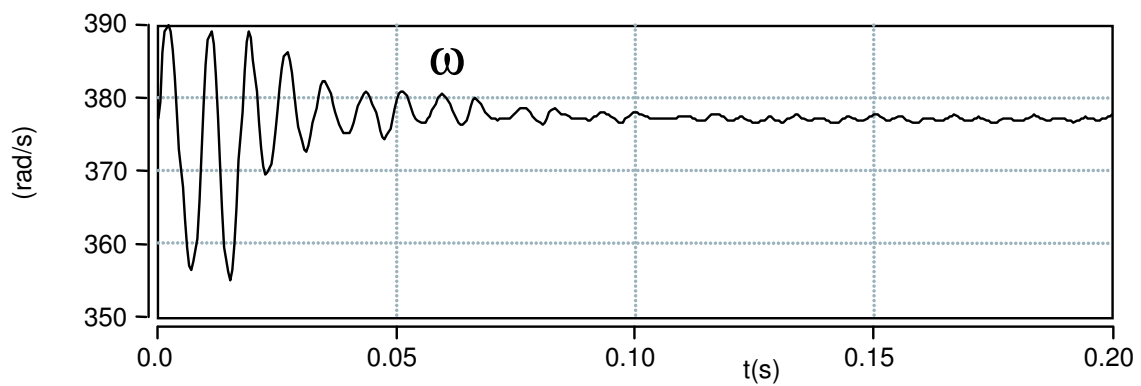


Figura 4.15: Frequência angular detectada pelo PLL.

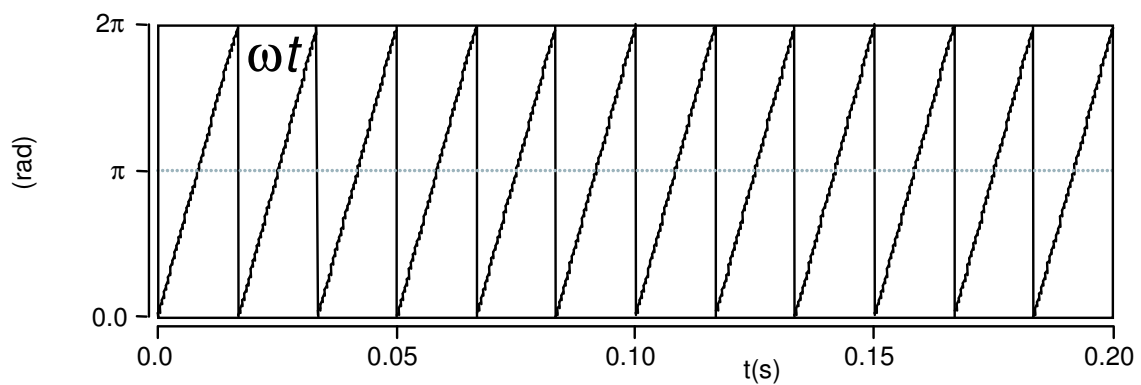


Figura 4.16: Sinal de sincronismo para o controlador.

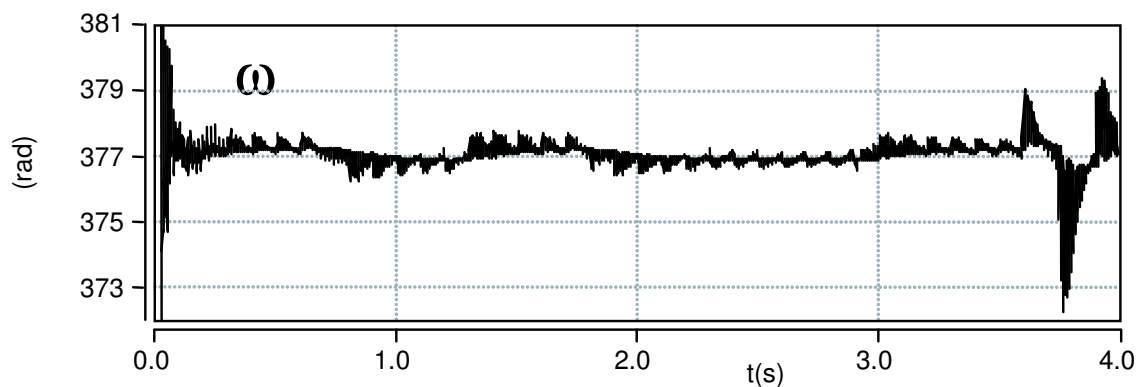


Figura 4.17: Frequência angular detectada pelo PLL para o Caso 1.

para 2,00 kA ($t = 2,9$ s).

As três correntes de controle são moduladas com maior amplitude quando a potência aumenta e quando a corrente no elo cc diminui, acompanhando a dinâmica de todo o sistema para manter regulada a tensão no sistema ca (Figura 4.18).

Em seguida, nas Figuras 4.19 e 4.20 estão respectivamente as correntes e tensões

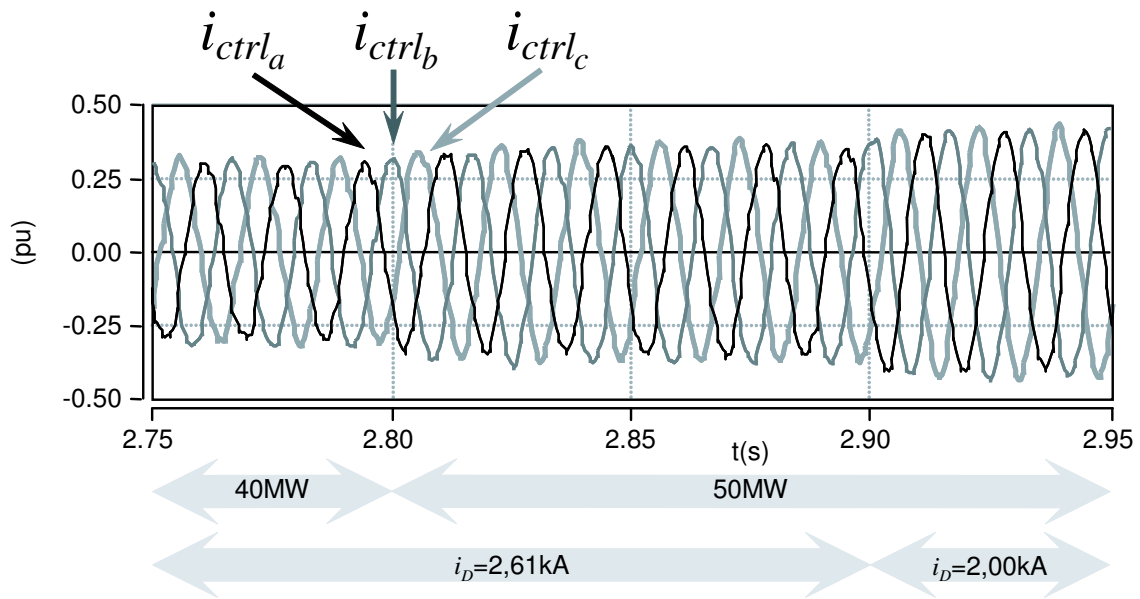


Figura 4.18: Correntes de controle fornecidas pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.

nos dois lados do transformador da fase a. Na Figura 4.21 estão as tensões de linha nos terminais BT do banco de transformadores.

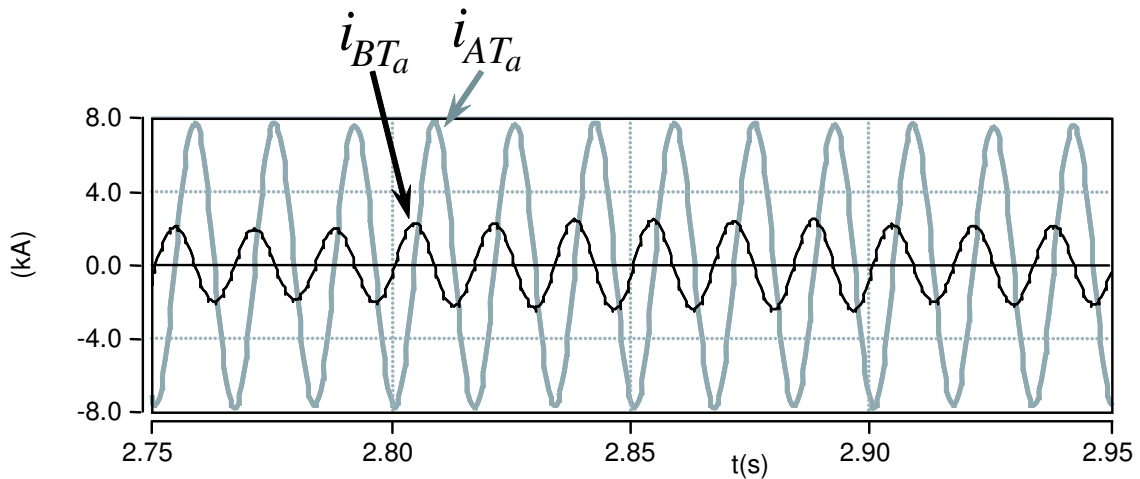


Figura 4.19: Correntes nos enrolamentos do transformador com núcleo de ar da fase a.

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 compreendem um intervalo de tempo ainda menor: $2,936 < t < 2,950$ s. O objetivo foi apresentar em detalhe as tensões nas três Pontes-H (v_{Ch_a} , v_{Ch_b} e v_{Ch_c} , Figura 4.22) e o somatório delas, a tensão v_{tap} (Equação 3.1, Figuras 4.23 e 4.24). A tensão v_{tap} se aproxima do valor médio na medida em que

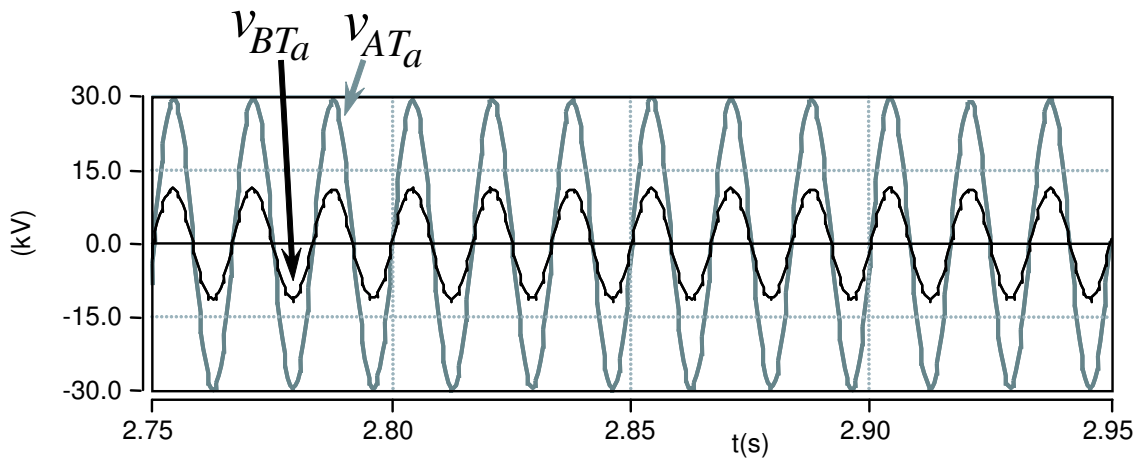


Figura 4.20: Tensões nos terminais do transformador com núcleo de ar da fase a.

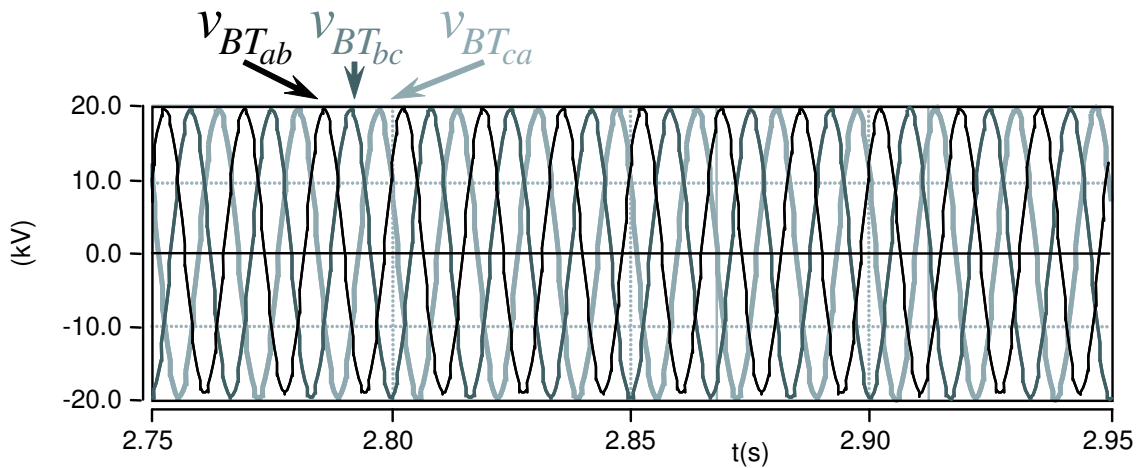


Figura 4.21: Tensões de linha na barra do sistema ca local.

o *ripple* diminui. O chaveamento unipolar pode ser verificado nestas figuras, onde observa-se um comportamento típico de controle de conversor por ângulo de disparo causando alguns picos de tensão de sinal contrário ao valor médio (valor médio variando com $\cos(\phi)$, Equação 3.17). Para fins de comparação do efeito causado pelo uso de três ondas triangulares defasadas foi colocada a Figura 4.24. Nesta observa-se que quando $i_{tri_A} = i_{tri_B} = i_{tri_C}$, a amplitude da tensão dobra para o mesmo valor médio instantâneo \bar{v}_{tap} . Enquanto no primeiro caso são observadas 27 oscilações (sinal com 1929 Hz), no segundo caso são observadas 42 oscilações (sinal com 3000 Hz). Então estas defasagens entre i_{tri_A} , i_{tri_B} e i_{tri_C} proporcionaram redução na amplitude de v_{tap} para até a metade em alguns momentos e redução da frequência para quase a metade do que quando operando com apenas uma onda

triangular.

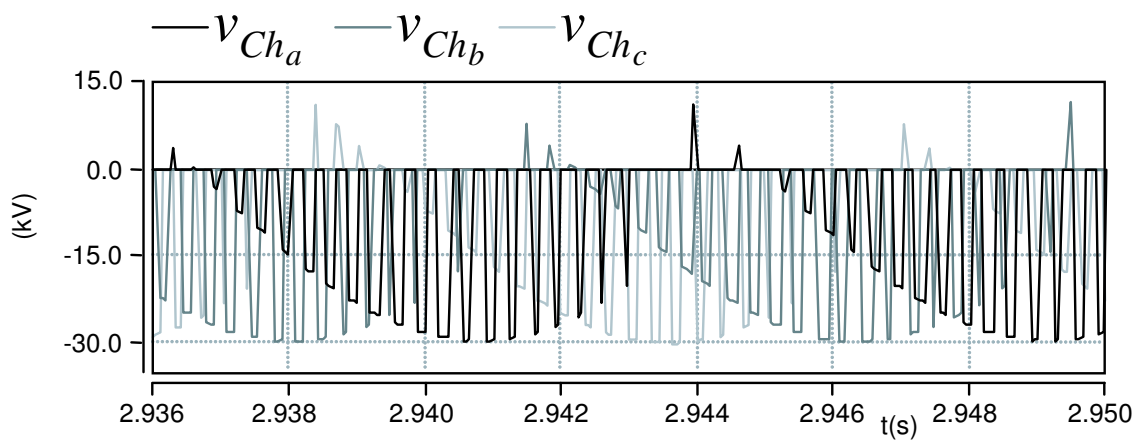


Figura 4.22: Tensões sobre as Pontes-H.

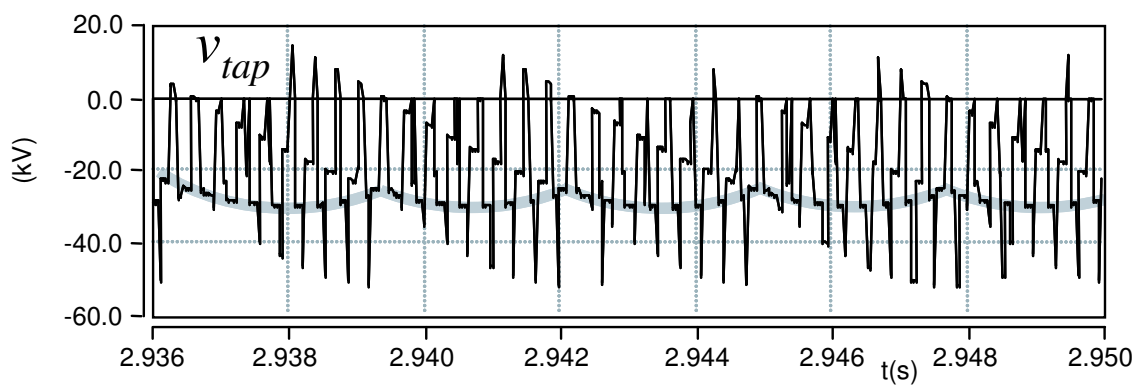


Figura 4.23: Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.

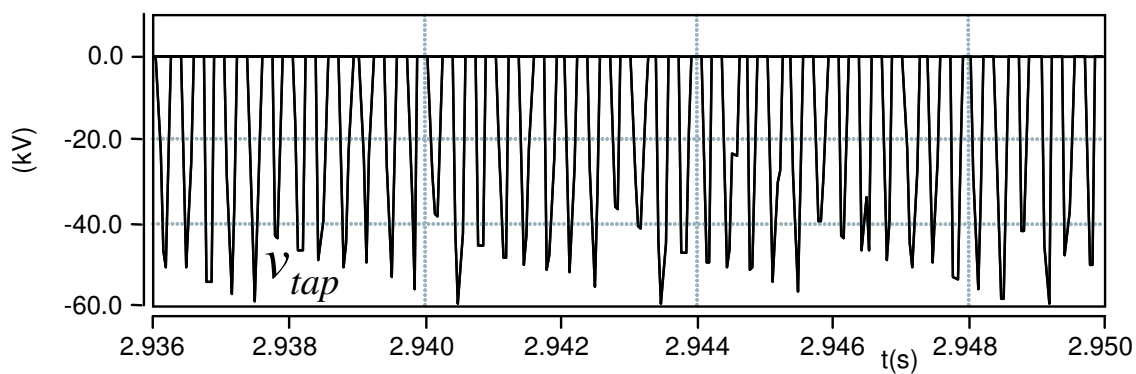


Figura 4.24: Tensão instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc com gerador de onda triangular único ($i_{tri_A} = i_{tri_B} = i_{tri_C}$).

São apresentadas, nas Figuras 4.25 e 4.26, as tensões e correntes nos GTO 1 e 2 da Ponte-H da fase a (ver posições na Figura 3.11).

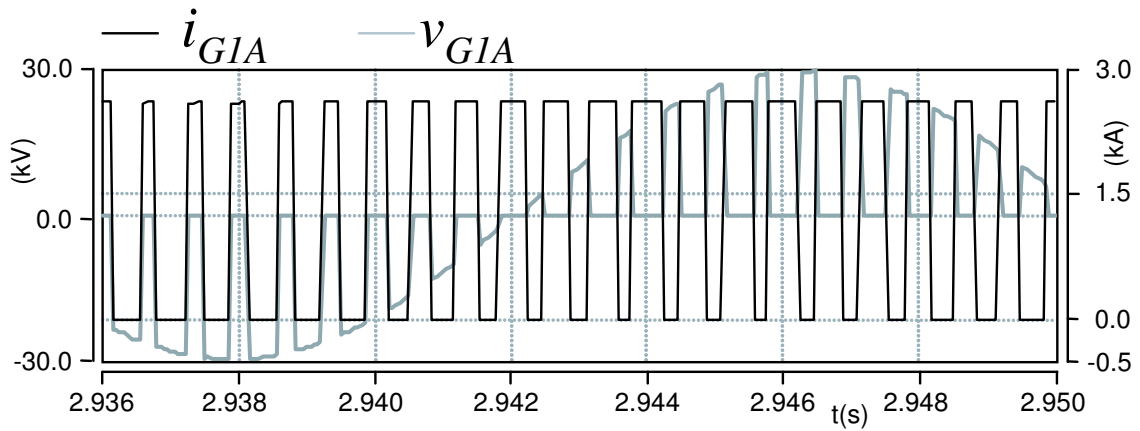


Figura 4.25: Tensão e corrente no GTO 1 da Ponte-H da fase a.

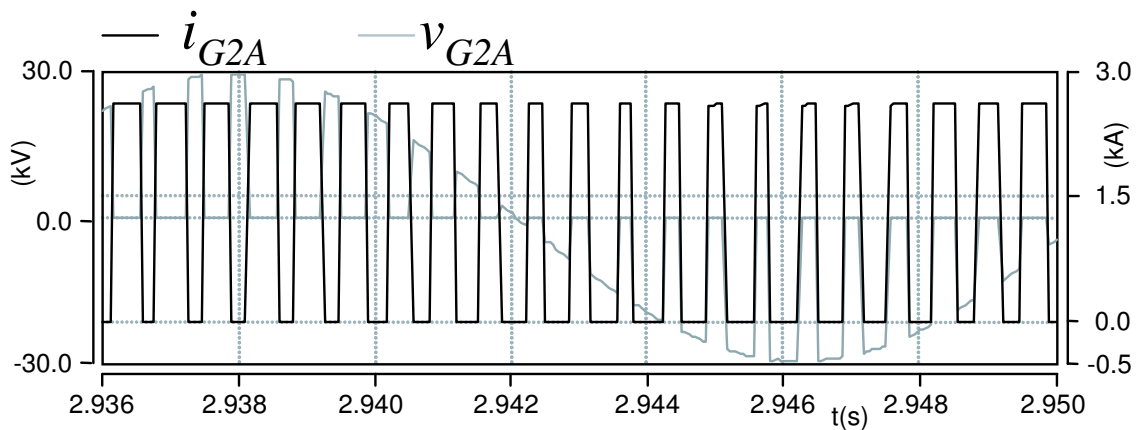


Figura 4.26: Tensão e corrente no GTO 2 da Ponte-H da fase a.

A Figura 4.27 apresenta a corrente e a tensão na fase a no lado BT, a corrente na mesma fase no lado AT e as variáveis de controle associadas ωt , i_p , i_{ctrl_a} , i_{p_a} e i_{q_a} , bem como as componentes $i_{\alpha p AT}$ e $i_{\beta p AT}$ das correntes nos enrolamentos dos transformadores no lado AT para auxiliar a análise que segue. A corrente de controle de potência ativa da fase a i_{p_a} está em contrafase com a tensão da respectiva fase v_{BT_a} (Figura 4.27a), pois é o produto da amplitude i_p (negativa pois o conversor está injetando potência no elo cc) pela senóide de sincronismo $\sin(\omega t)$ (ver Equação 3.52). O módulo de controle **Teoria p-q** fornece a corrente i_{q_a} para minimizar o consumo de reativo pelo lado BT do transformador. A corrente de controle resultante $i_{ctrl_a} = i_{p_a} + i_{q_a}$ (Figura 4.27b) é a corrente que, aplicada pelo conversor cc-ca ao

enrolamento AT do transformador, resulta na corrente i_{ATa} no enrolamento AT (Figura 4.27c) que aparece no enrolamento BT como i_{BTa} (Figura 4.27b). Utilizando a Teoria p-q para analisar i_{ATa} encontra-se as parcelas desta corrente responsáveis pela potência ativa $i_{\alpha pAT}$ e $i_{\beta pAT}$, sendo que a parcela de i_{BTa} responsável pela potência ativa é proporcional a $i_{\alpha pAT}$, de acordo com a Equação 3.54, que está em fase com i_{pa} . Como resultado obtém-se i_{BTa} praticamente em contrafase com v_{BTa} , o que garante que no ponto da conexão do Tap HVDC Bidirecional com o sistema ca local tenha-se pouca potência reativa envolvida.

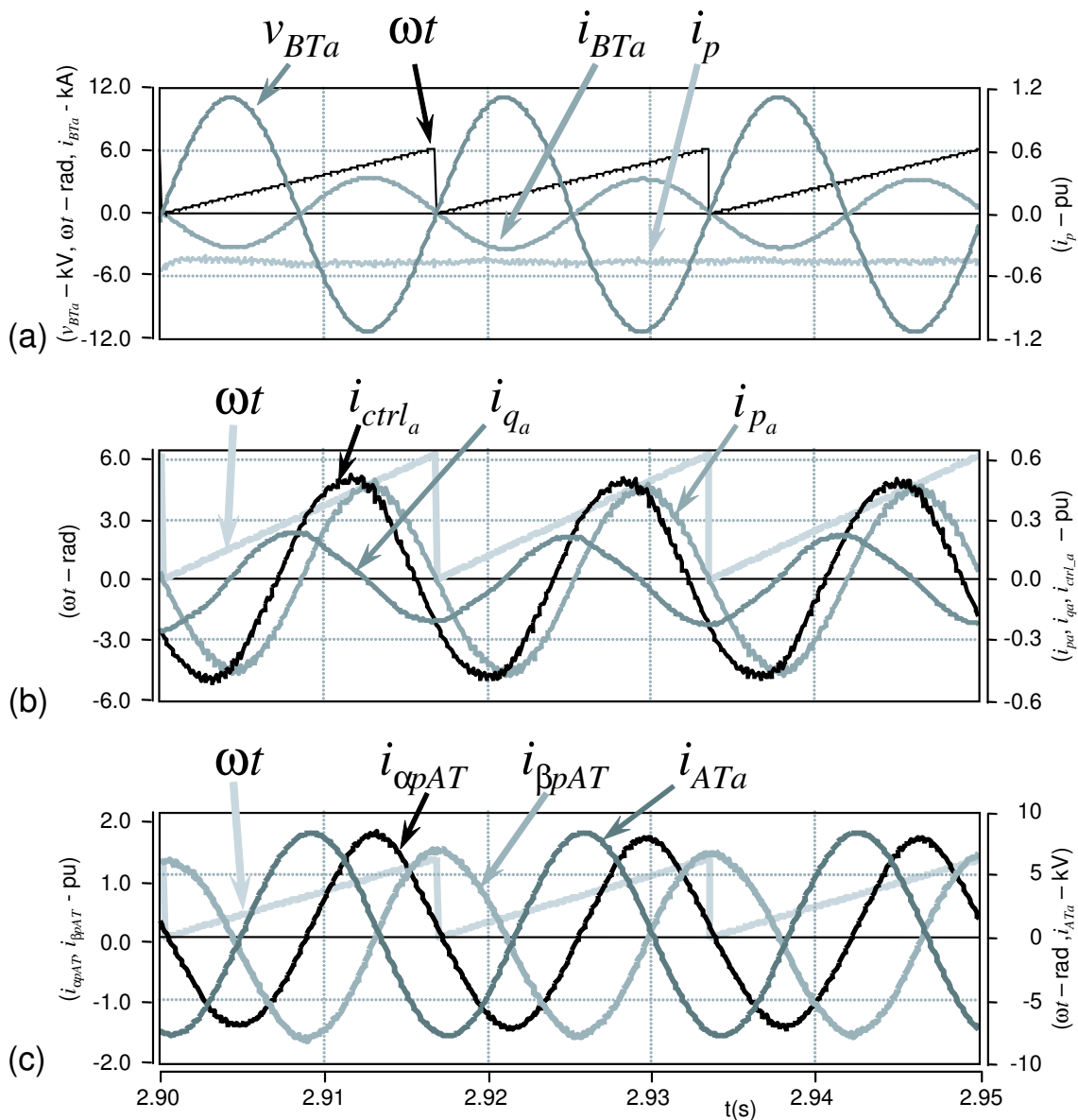


Figura 4.27: Tensão e corrente da fase a no lado BT e sinais de controle associados.

4.4.2 Caso 2: sistema ca sem geração local e operando com banco de transformadores com núcleo de ar

Para incluir queda da corrente nominal do elo cc no instante em que o Tap HVDC Bidirecional opera drenando deste potência nominal, a Tabela 4.1 foi defasada em 0,1 s a partir de $t = 0,6$ s. A corrente no elo cc cai de 2,61 kA para 2,00 kA em $t = 0,7$ s, e retorna para o seu valor nominal em $t = 1,3$ s.

Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 1,4$ s

O circuito de controle consegue compensar a queda na corrente do elo cc aumentando a corrente de controle (Figura 4.28) e a tensão de referência para o sistema ca (Figura 4.29).

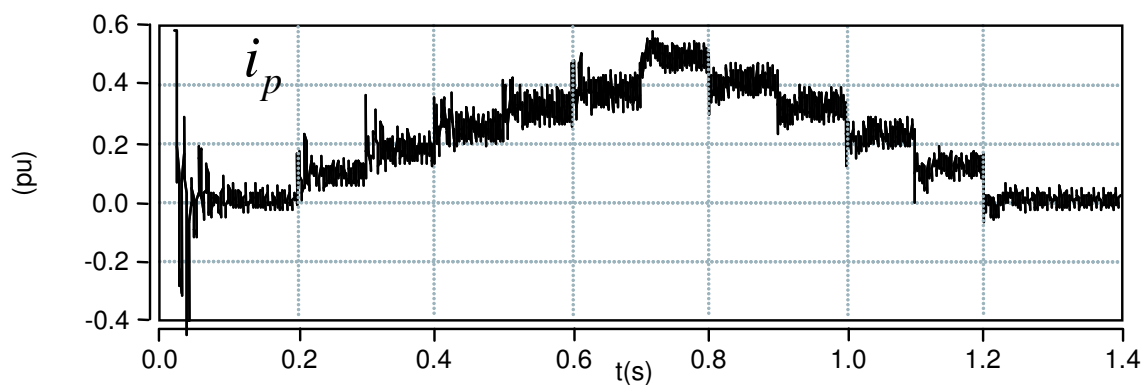


Figura 4.28: Corrente de controle fornecida pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.

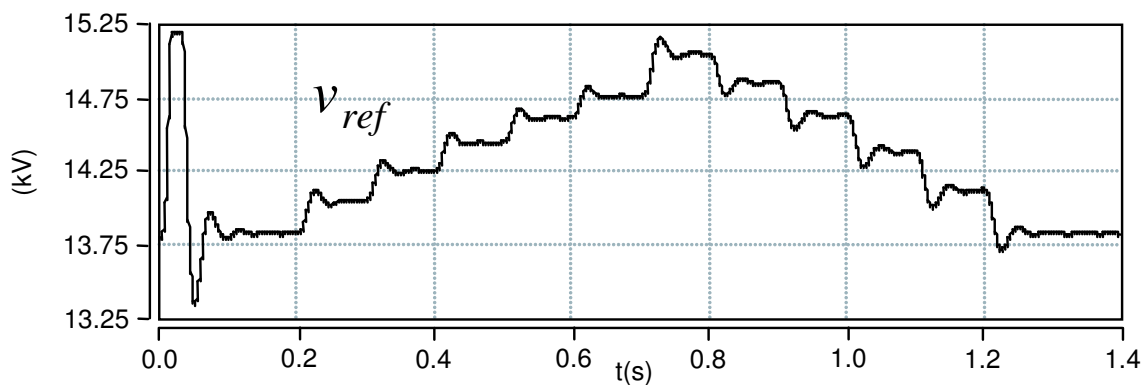


Figura 4.29: Tensão de referência para o sistema ca.

Como houve queda na corrente do elo cc em $t = 0,7s$ e o Tap HVDC Bidirecional continuou drenando a mesma potência ($50MW$ entre $t = 0,6s$ e $t = 0,8s$), pela Equação 3.4 tem-se que a tensão v_{tap} tem que aumentar pela razão inversa da redução da corrente i_D para manter constante a potência. Colocando v_{tap} em evidência na Equação 3.4 tem-se

$$v_{tap_{t \rightarrow 0,7s}}(t) = \frac{50 \cdot 10^6}{2610} = 19157V. \quad (4.10)$$

Com $i_D = 2,00kA$ a tensão muda para

$$v_{tap_{t \rightarrow 0,8s}}(t) = \frac{50 \cdot 10^6}{2000} = 25kV. \quad (4.11)$$

Na Figura 4.30 fica evidente a alteração na tensão \bar{v}_{tap} conforme calculado acima. A partir de $t = 0,7s$, ocorre também aumento do *ripple*, com picos de $60kV$ na tensão instantânea (Figura 4.31).

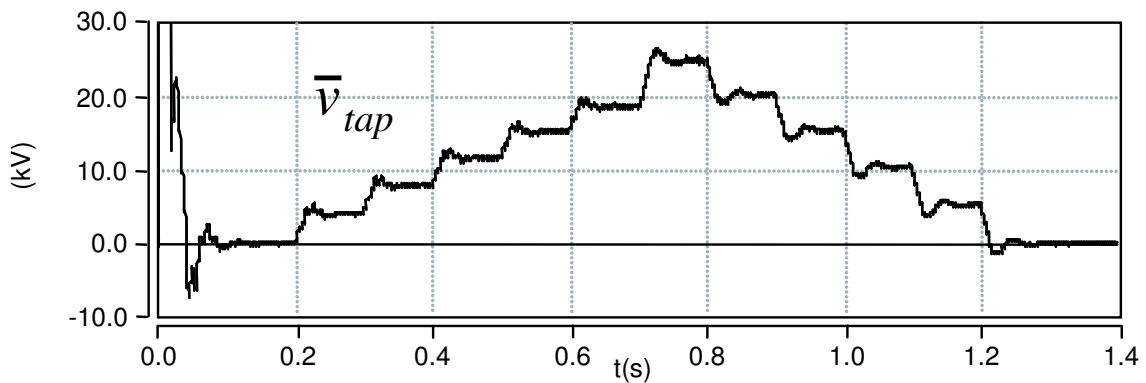


Figura 4.30: Tensão média instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.

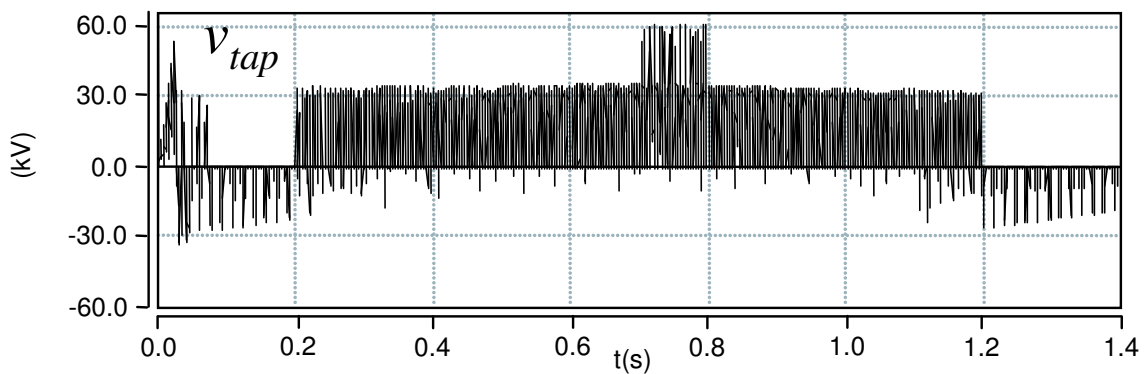


Figura 4.31: Tensão nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.

As Figuras 4.32 (a) e (b) mostram v_{tap} em um intervalo de aproximadamente um ciclo, cujo valor médio instantâneo foi mostrado na Figura 4.30, com o conversor drenando 50 MW e com corrente no elo cc de 2,61 kA e 2,00 kA respectivamente.

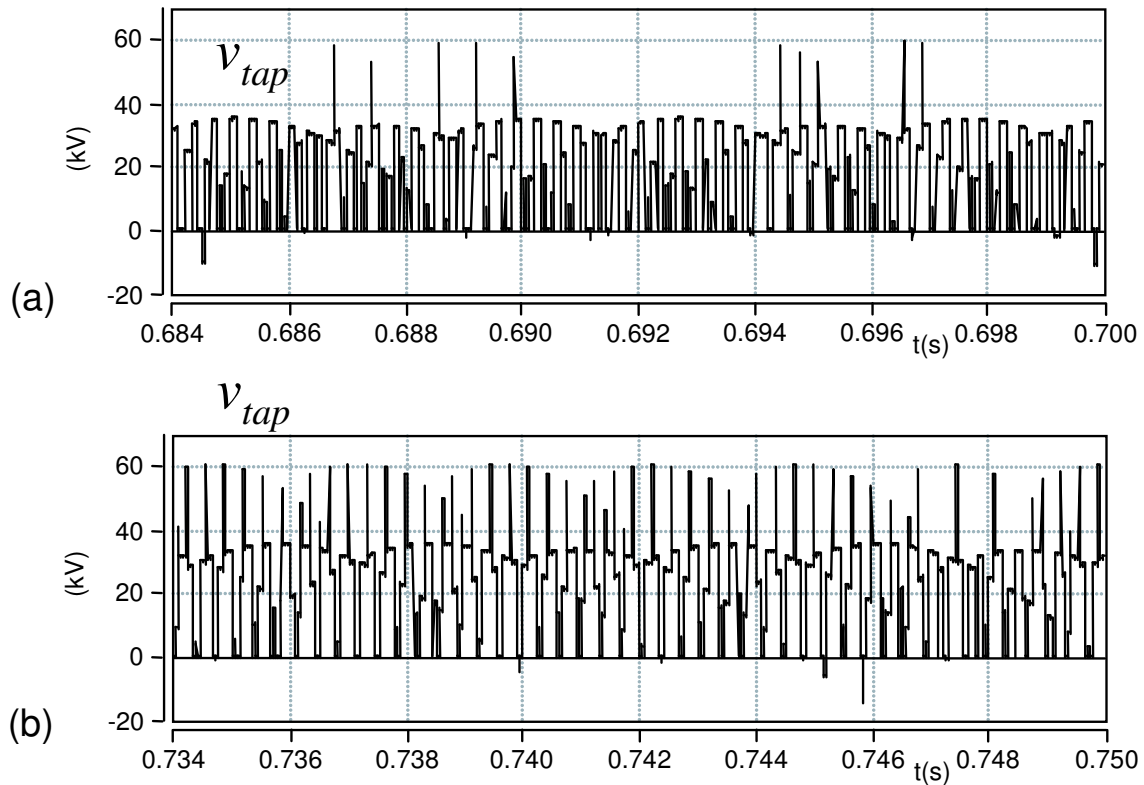


Figura 4.32: (a) v_{tap} com o conversor operando com 50 MW e $i_D = 2,61$ kA e (b) v_{tap} com o conversor operando com 50 MW e $i_D = 2,00$ kA.

Na Figura 4.33 estão as potências aparente \bar{s}_{BT} , ativa \bar{p}_{BT} e reativa \bar{q}_{BT} calculadas com as tensões e correntes medidas nos terminais do banco de transformadores no lado BT. Na parcela da potência reativa \bar{q}_{BT} está incluída a potência reativa relativa à reatância indutiva da linha X_L .

Na Figura 4.34 é possível observar a queda de tensão entre os terminais dos transformadores e a barra do sistema ca. Com alguma sobretensão em v_{BT} (picos de 7 %) é possível manter a tensão na barra do sistema ca em $v_{sist} = 1,00 \pm 0,05$ p.u. (ver Figura 4.1).

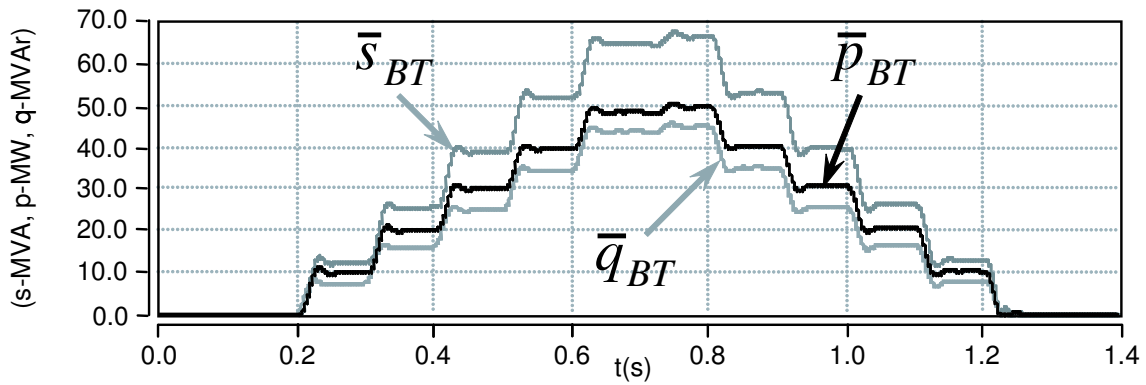


Figura 4.33: Potências aparente, ativa e reativa consumidas pelo sistema ca.

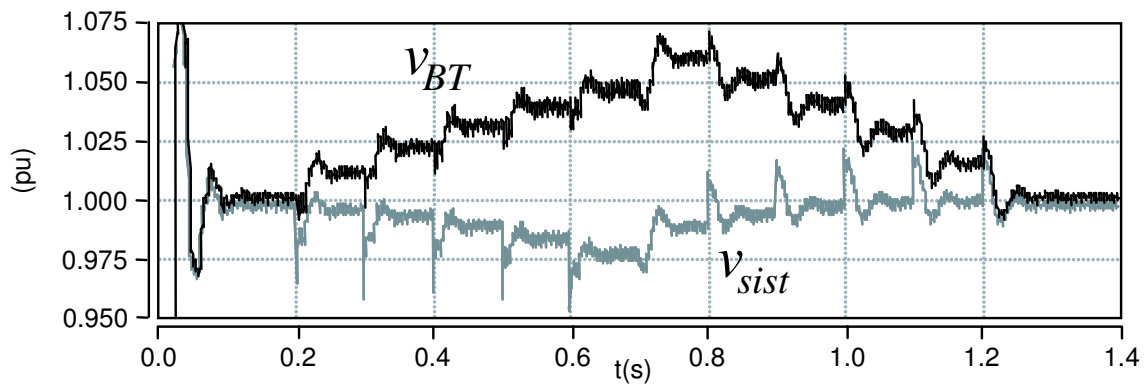


Figura 4.34: Tensões coletivas no lado BT do banco de transformadores e na barra do sistema ca.

Resultados - $0,55 < t < 0,75$ s

Nesta seção alguns resultados desta simulação são evidenciados para que se tenha melhor visão da dinâmica do Tap HVDC Bidirecional nos instantes em que a carga passa de 0,8 p.u. para 1,0 p.u. em $t = 0,6$ s e no instante em que a corrente do elo cc passa de 2,61 kA (1,00 p.u.) para 2,00 kA (0,77 p.u.) em $t = 0,7$ s.

Na Figura 4.35 estão as correntes de controle das três fases, alterando de amplitude na medida para que as tensões no sistema ca (Figura 4.36) se mantenham estáveis em torno de 1,0 p.u.

As alterações das correntes de controle são observadas nas correntes dos dois enrolamentos do transformador da fase a (Figura 4.37). Em seguida, na Figura 4.38 estão as tensões nos terminais deste mesmo transformador.

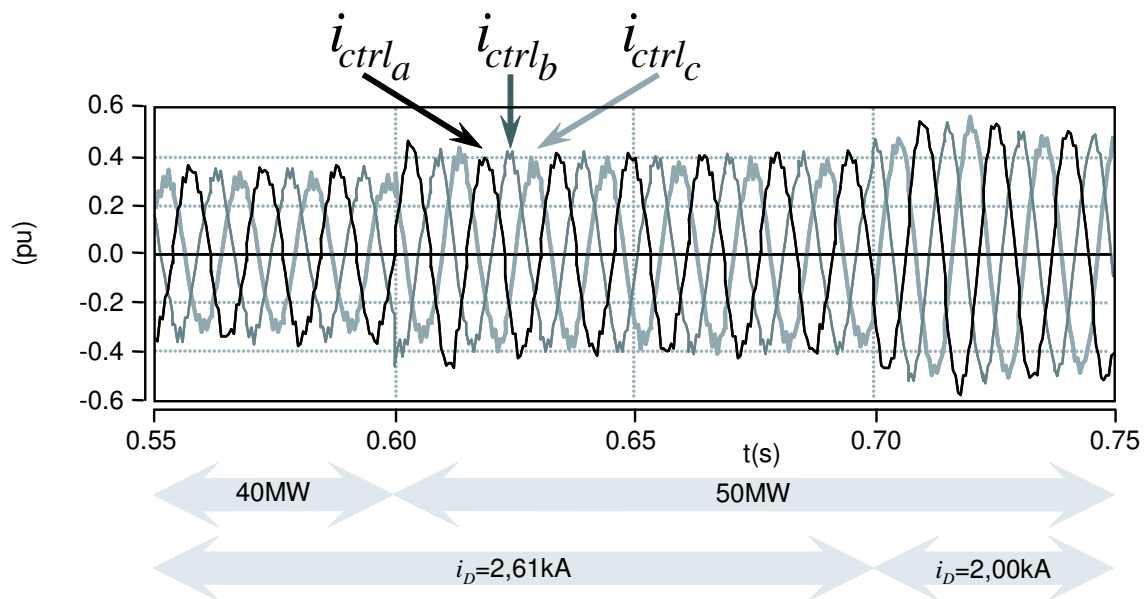


Figura 4.35: Correntes de controle fornecidas pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.

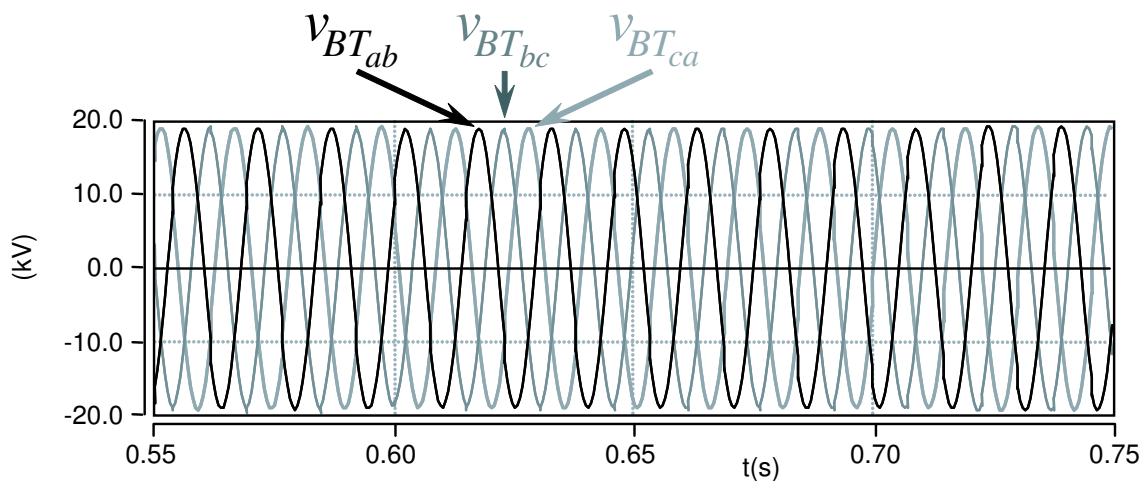


Figura 4.36: Tensões de linha na barra do sistema ca local.

4.4.3 Caso 3: sistema ca sem geração local e operando com banco de transformadores com núcleo de ferro

Neste caso de simulação, a principal diferença está no banco de transformadores utilizado - transformadores convencionais com núcleo de ferro. Primeiramente são apresentados os resultados da simulação com todos os chaveamentos do banco de cargas. Em seguida é mostrado em detalhe o chaveamento da carga de 40 MW (50 MVA) para 50 MW (62,5 MVA). Nesta simulação é esperado manter a tensão

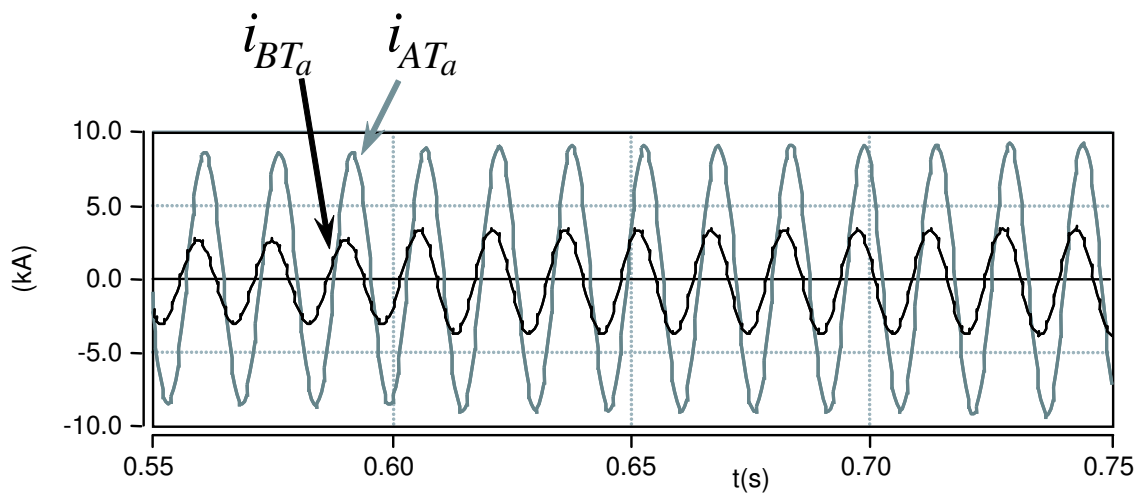


Figura 4.37: Correntes nos enrolamentos do transformador com núcleo de ar da fase a.

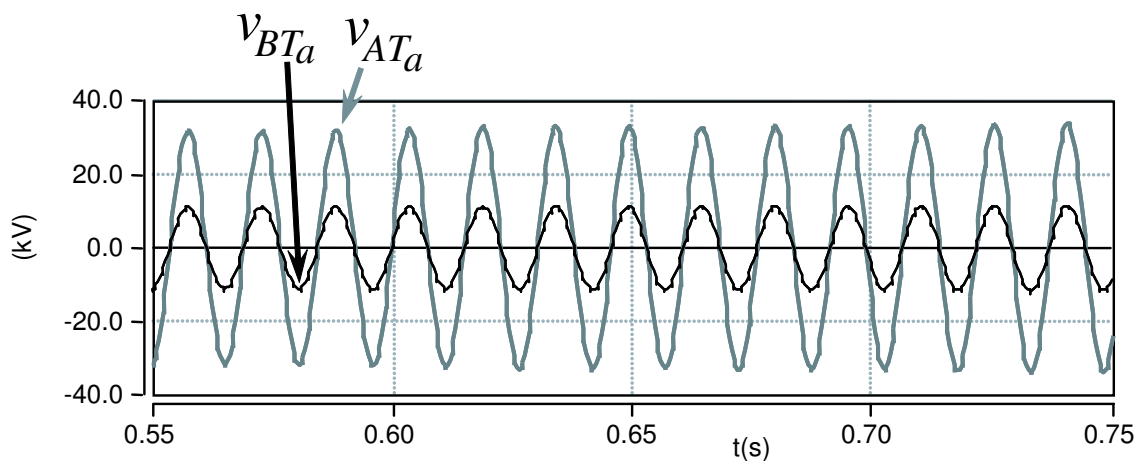


Figura 4.38: Tensões nos terminais do transformador com núcleo de ar da fase a.

na barra do sistema ca em 1,0 p.u. e atender a carga com os valores apresentados na Tabela 4.1.

Como este banco de transformadores foi otimizado para as condições nominais do sistema ca e do elo cc, qualquer valor de corrente do elo cc abaixo da nominal significa redução da potência disponível para o sistema ca local.

Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 1,2$ s

Os resultados apresentados aqui mostram a dinâmica do sistema durante todo o intervalo de tempo previsto na Tabela 4.1.

Na Figura 4.39 observa-se a variação da amplitude da corrente de controle i_p proporcional à variação da carga RL. O valor mínimo diferente de zero nos intervalos onde não há carga conectada é responsável por manter tensão nos terminais dos transformadores mesmo na ausência de carga. Como função de i_p , a tensão de referência v_{ref} (Figura 4.40) varia para compensar as quedas de tensão até a barra do sistema ca.

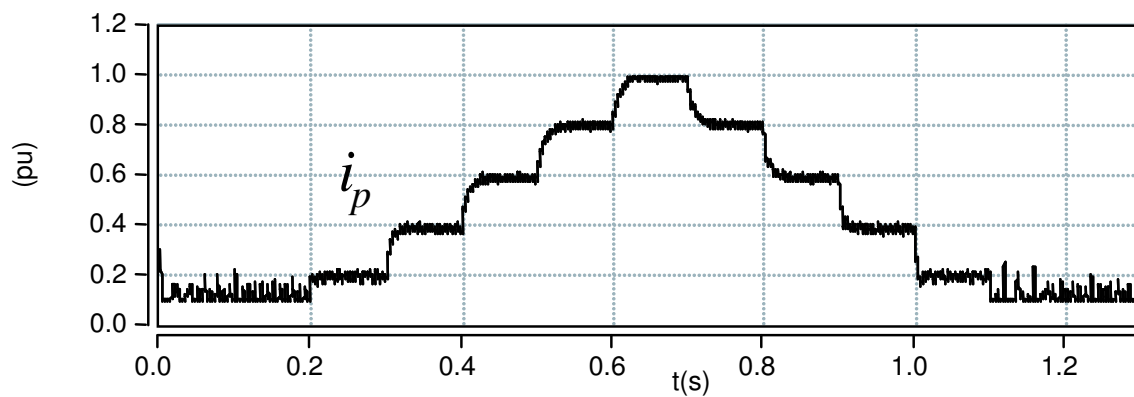


Figura 4.39: Corrente de controle fornecida pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.

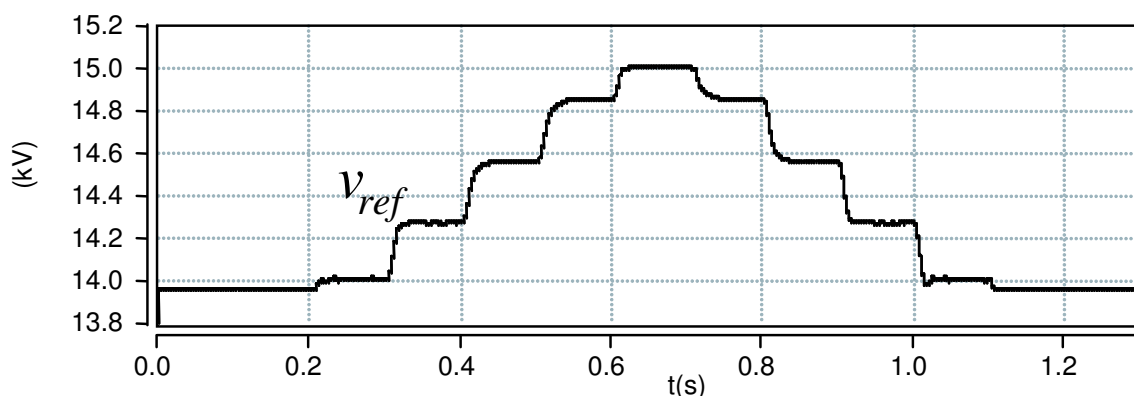


Figura 4.40: Tensão de referência para o sistema ca.

A Figura 4.41 apresenta as tensões de linha nos terminais do lado BT do banco de transformadores. Percebe-se, nos intervalos onde o Tap HVDC Bidirecional opera a

vazio, grande desbalanço entre as fases. Não foi possível, até o momento, estabilizar o controle no intuito de obter tensões balanceadas e com variações de amplitude dentro de uma margem de 5 % de oscilação aceitável. Na mesma figura, pode-se observar pequenas subtensões nos momentos em que mais cargas são conectadas ao sistema ca, e também pequenas sobretensões nos momentos em que cargas são desconectadas do sistema ca.

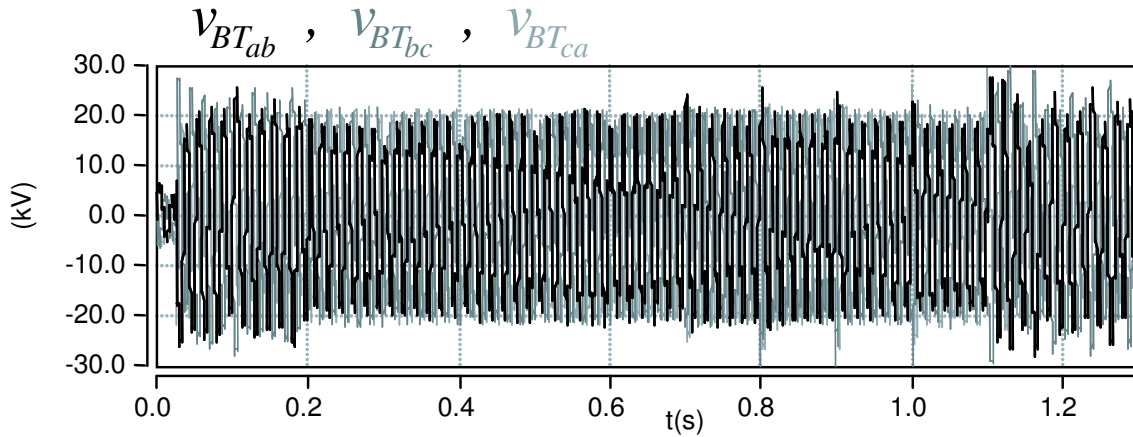


Figura 4.41: Tensões de linha na barra do sistema ca local.

Na Figura 4.42 estão as variações da potência aparente s_{carga} , potência ativa p_{carga} e potência reativa q_{carga} medidas na entrada do banco de cargas RL. Como as tensões do sistema ca se estabilizam sempre em 1,0 p.u., as curvas das potências se estabilizaram nos valores esperados na Tabela 4.1. Em seguida, na Figura 4.43, observa-se os mesmos valores de potência ativa calculada com base nas tensões e correntes medidas nos terminais dos dois lados dos transformadores. As potências reativas calculadas no mesmo ponto do circuito estão na Figura 4.44.

Nesta última figura, a diferença entre \bar{q}_{AT} e \bar{q}_{BT} é a potência reativa do banco de transformadores, com uma parcela decorrente da magnetização e outra como efeito da dispersão. A parcela da magnetização pode ser observada sozinha entre o início da simulação e o instante $t = 0,2$ s, quando então entra a carga. Daí em diante, com a circulação de corrente nos dois enrolamentos, também aparece a parcela da potência reativa causada pela dispersão dos transformadores.

As parcelas oscilantes das potências ativa \tilde{p} e reativa \tilde{q} ficaram em torno de 4% das respectivas parcelas médias \bar{p} e \bar{q} .

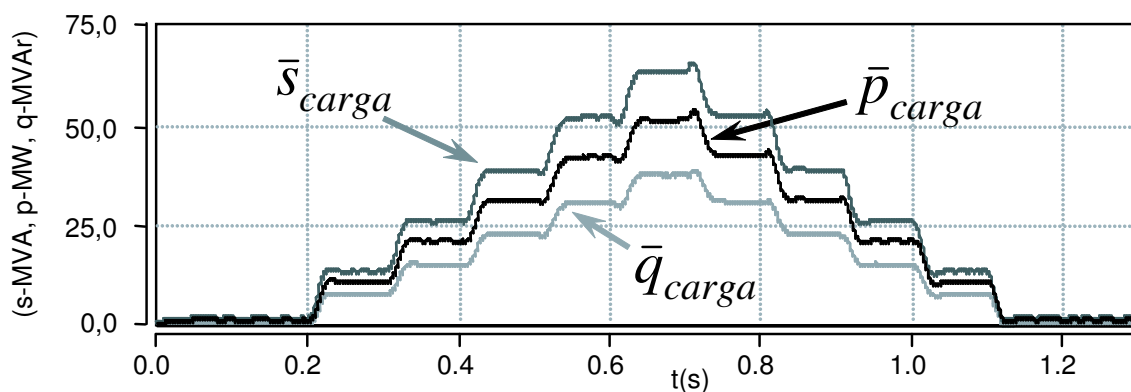


Figura 4.42: Potências aparente, ativa e reativa consumidas pela carga passiva.

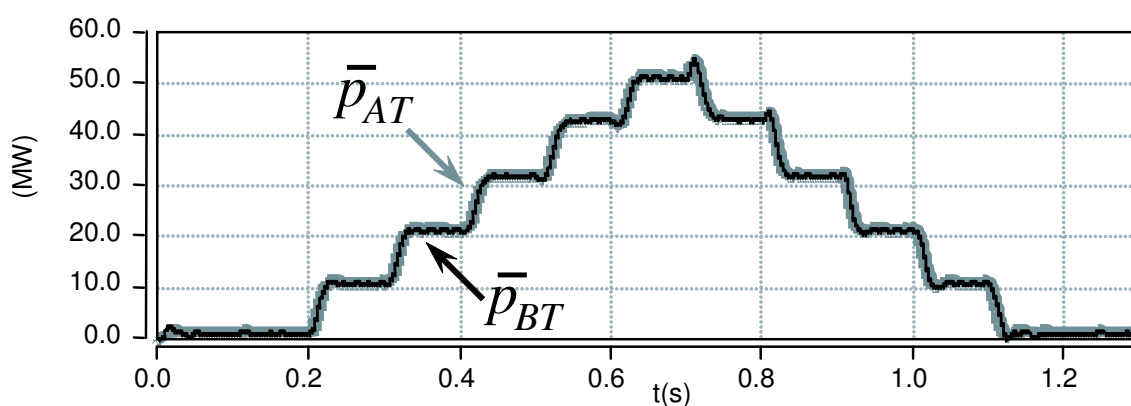


Figura 4.43: Potência ativa nos dois lados do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).

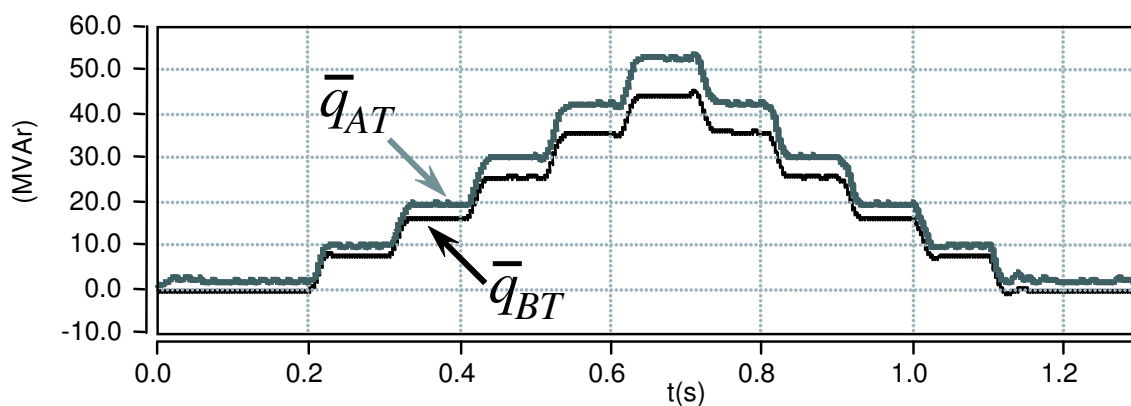


Figura 4.44: Potência reativa nos dois lados do banco de transformadores (positiva no sentido do conversor para o sistema ca).

Nas Figuras 4.45 e 4.46 estão as correntes respectivamente nos enrolamentos AT e BT do transformador da fase a. As correntes das demais fases apresentam mesma dinâmica e por isso foram omitidas. Quando o conversor cc-ca opera a vazio, aparece

corrente no enrolamento AT com valor médio diferente de zero.

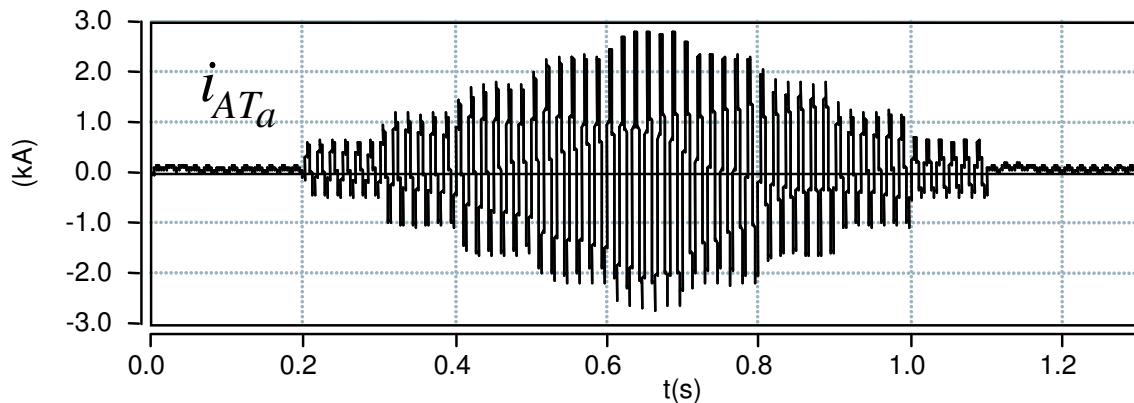


Figura 4.45: Corrente no lado AT do transformador com núcleo de ferro da fase a.

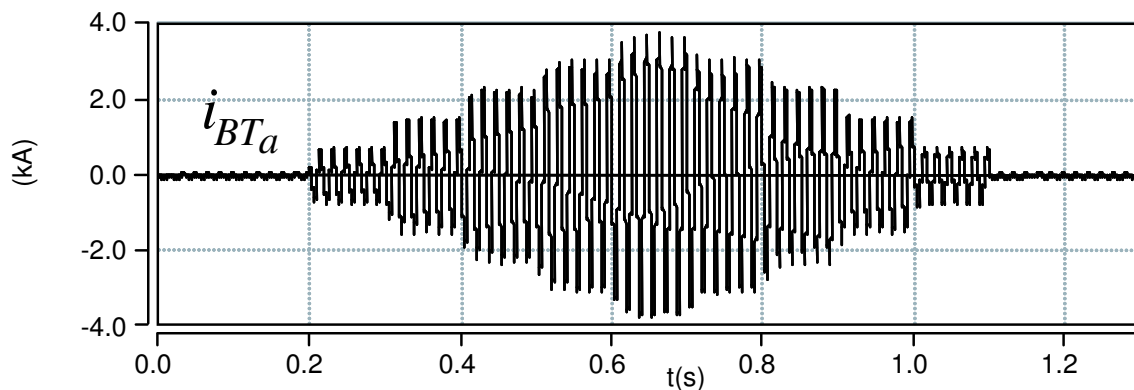


Figura 4.46: Corrente no lado BT do transformador com núcleo de ferro da fase a.

O efeito da variação de carga do sistema ca aparece no elo cc como variação da tensão nos terminais do Tap HVDC Bidirecional \bar{v}_{tap} , já que o elo cc está representado como uma fonte de corrente. O valor médio instantâneo desta tensão é apresentado na Figura 4.47.

Resultados - $0,55 < t < 0,65$

Nesta seção alguns gráficos foram repetidos mostrando a dinâmica dos sinais no instante em que a carga passa de 0,8 p.u. para 1,0 p.u. As três correntes de controle, resultado do produto das senóides com a corrente de controle i_p (ver Figura 4.39), são mostradas na Figura 4.48. Observa-se o aumento da amplitude destas correntes em um ciclo proporcionalmente ao aumento da carga. Em seguida,

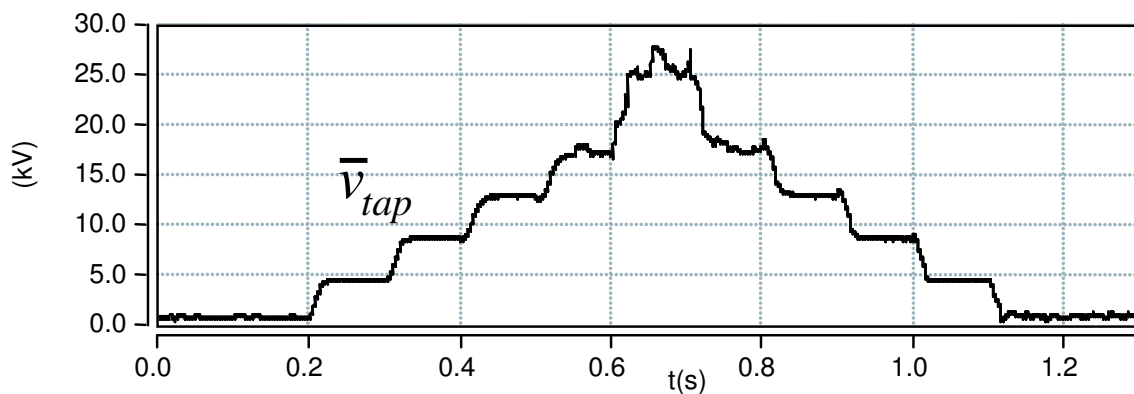


Figura 4.47: Tensão nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.

o mesmo aumento é observado nas correntes dos dois enrolamentos do transformador da fase a (Figura 4.49).

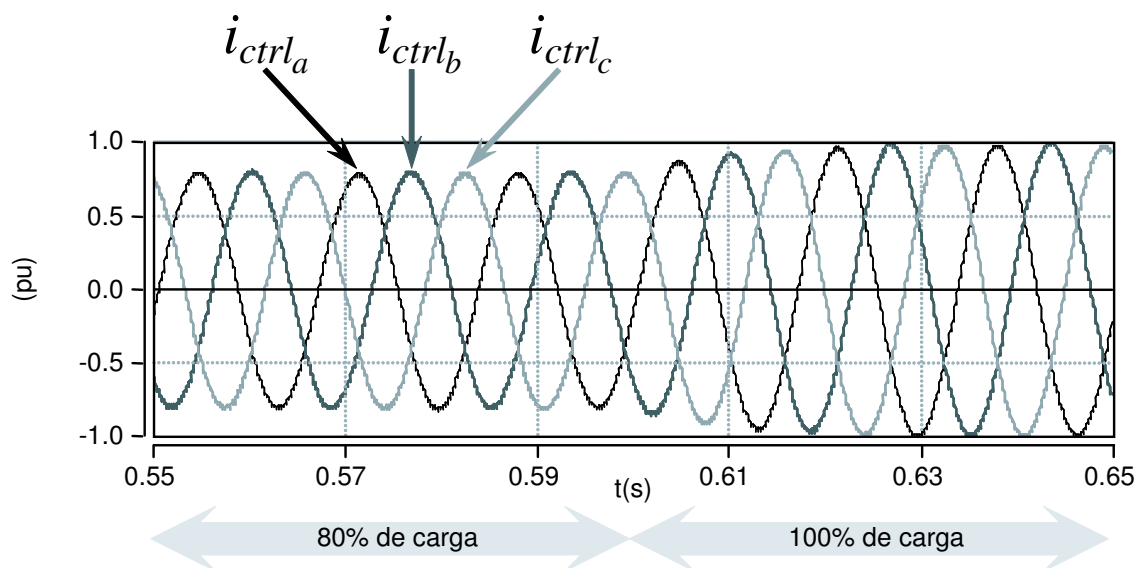


Figura 4.48: Correntes de controle fornecidas pelo controlador do Tap HVDC Bidirecional.

As tensões nos terminais deste mesmo transformador caem instantaneamente, mas retornam ao valor nominal em um ciclo (Figura 4.50). Na Figura 4.51 observa-se o mesmo efeito nas três tensões de linha, com o reestabelecimento da tensão nominal em um ciclo.

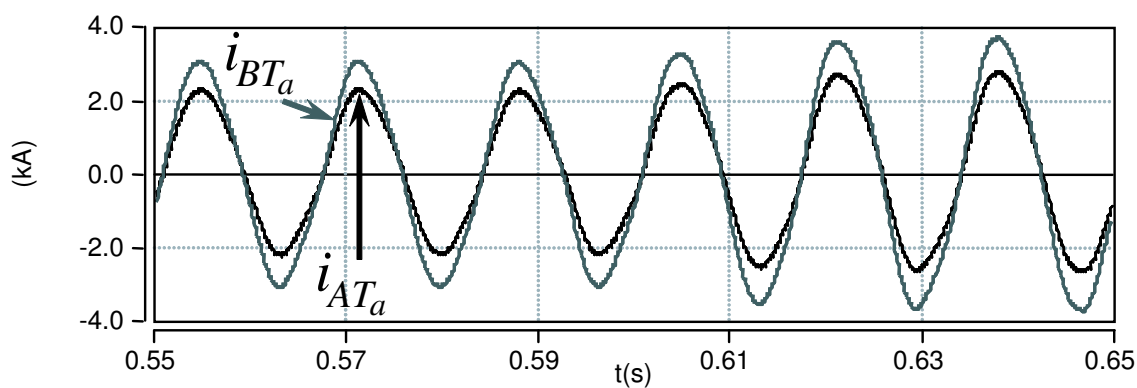


Figura 4.49: Correntes nos enrolamentos do transformador com núcleo de ferro da fase a.

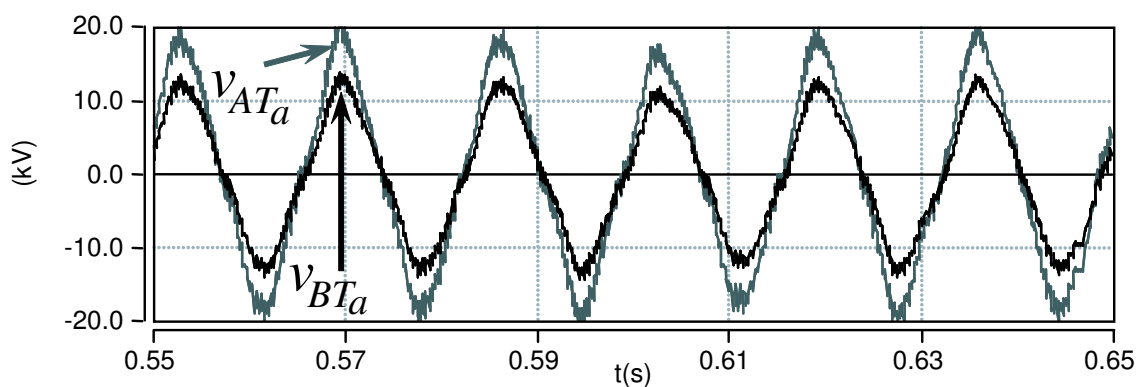


Figura 4.50: Tensões nos terminais do transformador com núcleo de ferro da fase a.

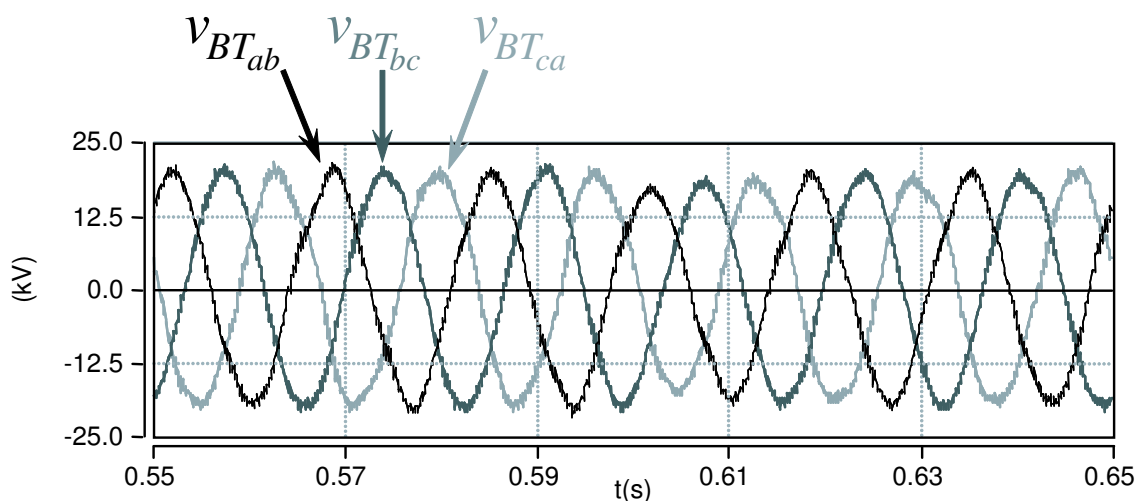


Figura 4.51: Tensões de linha na barra do sistema ca local.

4.4.4 Caso 4: o Tap HVDC Bidirecional inserido em um Sistema HVDC completo

Este quarto caso contempla a operação de todo o sistema proposto e estudado até então com a diferença de que o terminais do conversor que estavam conectados a uma fonte de corrente e ao potencial de terra (Figura 2.9) agora estão conectados a um elo cc de um Sistema HVDC Completo. Esta segunda configuração apresentada na Figura 2.8 foi remodelada para um Sistema HVDC monopolar, o *CIGRÉ HVDC Benchmark*, resultando no circuito mostrado na Figura 4.52. O Tap HVDC Bidirecional está conectado no meio da linha de transmissão deste Sistema HVDC. São esperados os mesmo resultados apresentados nos casos anteriores e que nenhuma influência da operação do Tap HVDC Bidirecional seja observada na operação do elo cc.

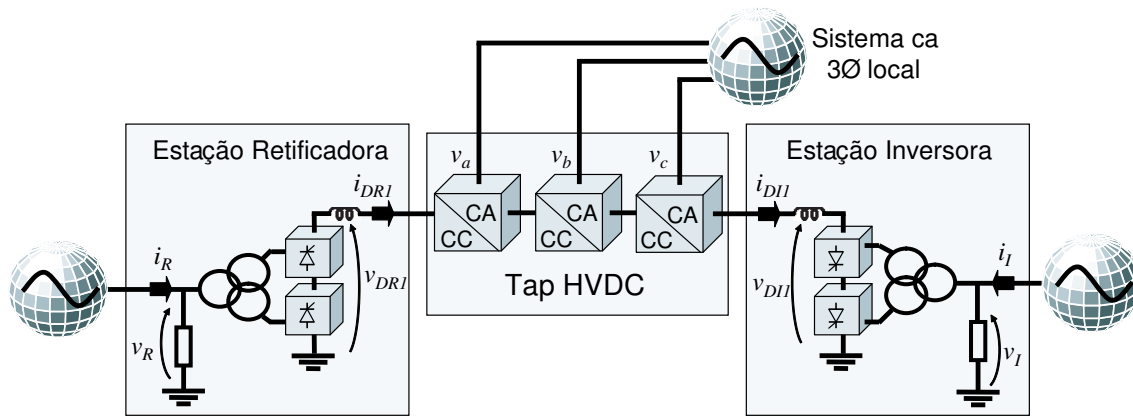


Figura 4.52: Tap HVDC Bidirecional inserido no *CIGRÉ HVDC Benchmark*.

O *CIGRÉ HVDC Benchmark*

O *CIGRÉ HVDC Benchmark* é um Sistema HVDC Monopolar de 12 pulsos, com tensão e corrente nominais do elo cc de 500 kV e 2,0 kA respectivamente, resultando na potência de 1000 MW. Os sistemas ca ao qual estão conectadas suas duas estações têm potência de curto circuito de 2500 MW cada. Do lado da estação retificadora, a tensão nominal do sistema ca é 345 kV, e do lado da estação inversora 230 kV. Os dois sistemas ca trabalham a 50 Hz.

Este modelo foi desenvolvido para avaliar os circuitos de controle do Sistema HVDC mediante operação normal de todo o sistema ou sofrendo perturbações tanto nos sistemas ca quanto na linha de transmissão cc.

Resultados do período completo da simulação - $0,0 < t < 2,0$ s

O Tap HVDC Bidirecional impõe queda ou elevação de tensão com componentes alternada e média no ponto em que está conectado (tensão v_{tap}). Com a sequência de eventos abaixo será verificado se ele causa interferência significativa no funcionamento do Sistema HVDC. A sequência de eventos aplicada ao sistema completo é a seguinte:

- $t = 0,04$ s: início da operação das estações retificadora e inversora;
- $t = 0,50$ s: abertura da chave de *bypass* do Tap HVDC Bidirecional;
- $t = 1,00$ s: sistema ca local passa a absorver 50 MW do elo cc;
- $t = 1,25$ s: curto circuito trifásico franco à terra na barra do sistema ca local com duração de 0,05 s;
- $t = 1,50$ s: sistema ca local passa a fornecer 50 MW ao elo cc;
- $t = 1,75$ s: sistema ca local para de trocar energia com o elo cc;
- $t = 2,00$ s: final da simulação.

A operação do Tap HVDC Bidirecional impõe no elo cc a tensão \bar{v}_{tap} apresentada na Figura 4.53. \bar{v}_{tap} cai cerca de 40 kV quando ocorre o curto circuito na barra do sistema ca local, mas esta oscilação é menor do que a que ocorre quando o fluxo de energia é totalmente revertido a partir de $t = 1,5$ s.

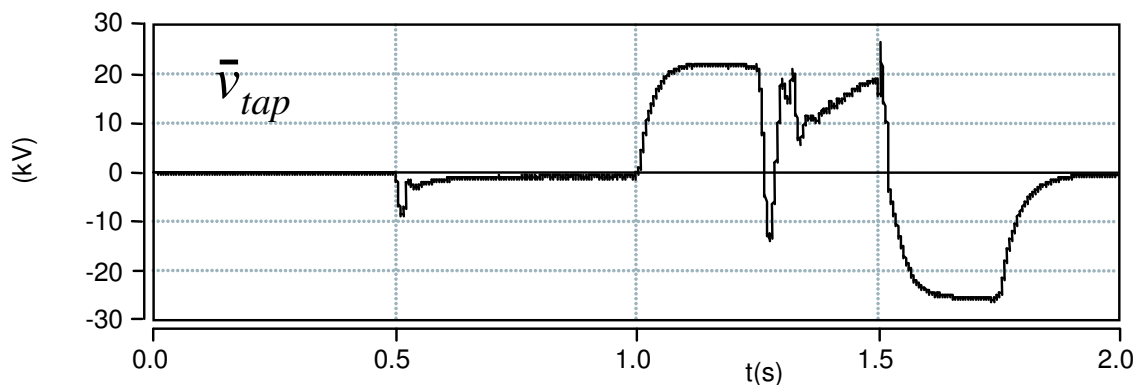


Figura 4.53: Tensão média instantânea nos terminais do Tap HVDC Bidirecional.

As alterações do fluxo de energia entre o sistema ca local e o elo cc resultam em pequenas oscilações nas tensões do sistema ca. Estas oscilações no valor coletivo da

tensão e a falta trifásica aplicada em $t = 1,25$ s podem ser vistas na Figura 4.54. Durante a operação normal e após o fechamento do disjuntor entre o sistema ca e o banco de transformadores, todas as oscilações de tensão ficaram dentro da margem de 5 % da tensão base.

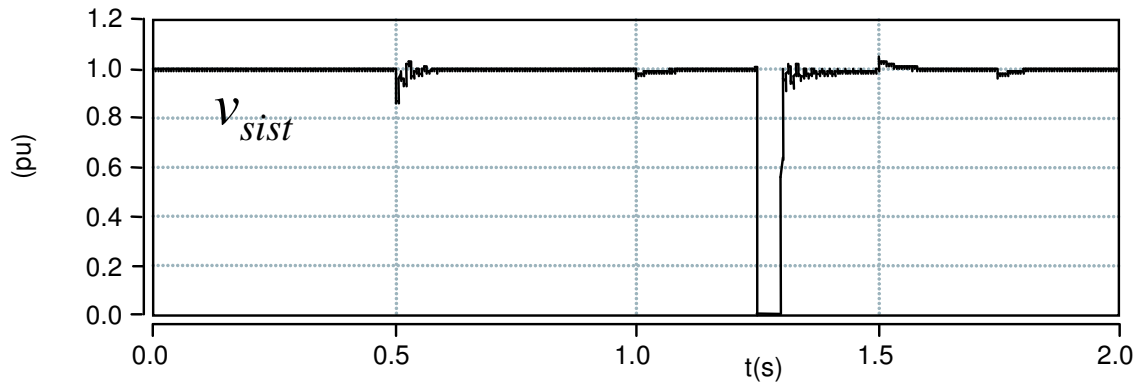


Figura 4.54: Tensão em p.u. na barra do sistema ca local.

A potência trocada com o elo cc é apresentada na Figura 4.55. Durante a falta, a potência fica negativa pois os elementos passivos do ramo central da Ponte-H se descarregam injetando potência no elo cc. Quando a falta é eliminada, estes elementos têm que ter seus campos elétricos e magnéticos novamente estabelecidos, limitando a potência que é entregue ao sistema ca.

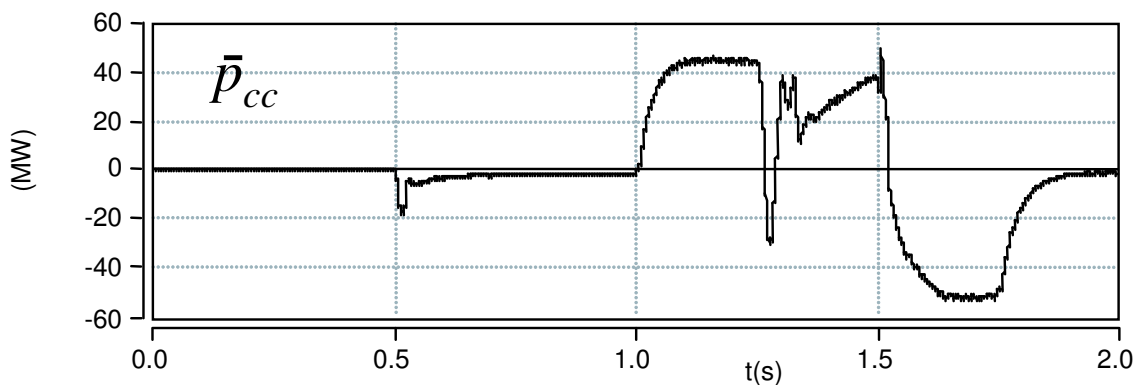


Figura 4.55: Potência calculada nos terminais do Tap HVDC Bidirecional conectados ao elo cc.

A corrente no elo cc sofre influência da operação do Tap HVDC Bidirecional quando da partida deste, durante a falta no sistema ca e durante a reversão do fluxo de energia (Figura 4.56), mas em operação normal nenhuma grande alteração

é observada. O mesmo pode ser dito das tensões medidas nos terminais das estações inversora (Figura 4.57) e retificadora Figura 4.58. A tensão na estação inversora v_I permanece inalterada durante a operação normal do Tap, enquanto a tensão na estação retificadora v_R absorve as alterações de \bar{v}_{tap} .

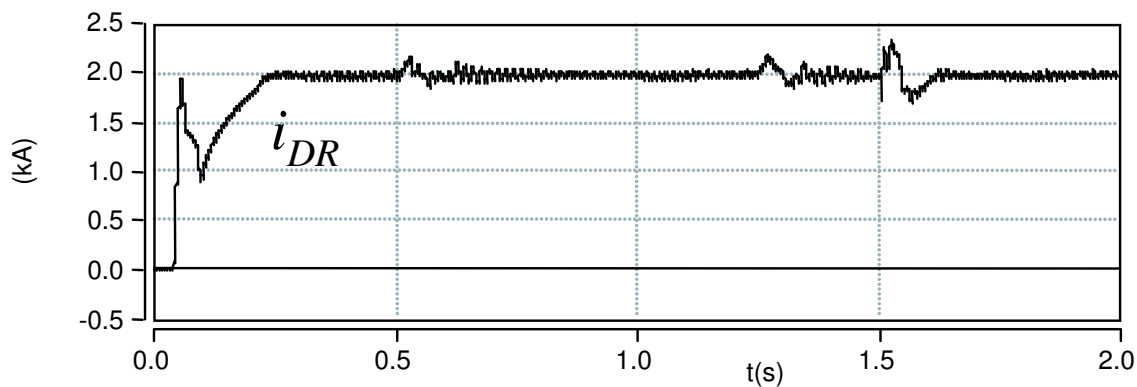


Figura 4.56: Corrente na saída da Estação Retificadora.

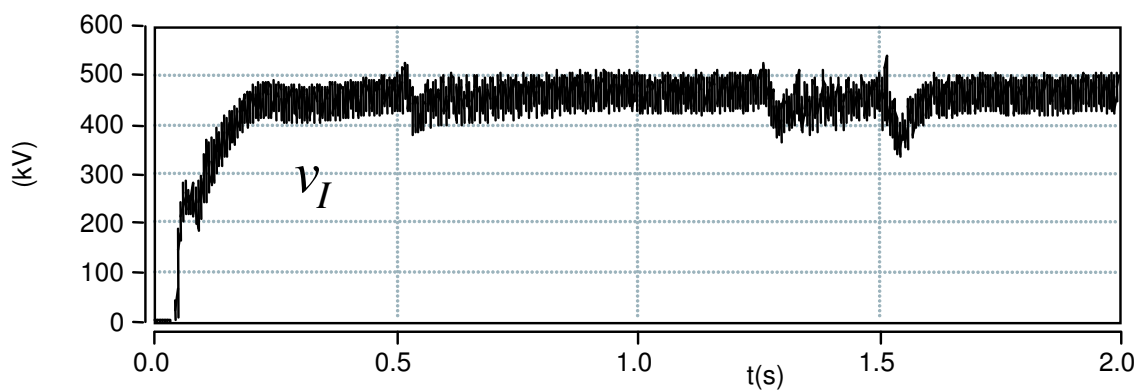


Figura 4.57: Tensão na entrada da Estação Inversora.

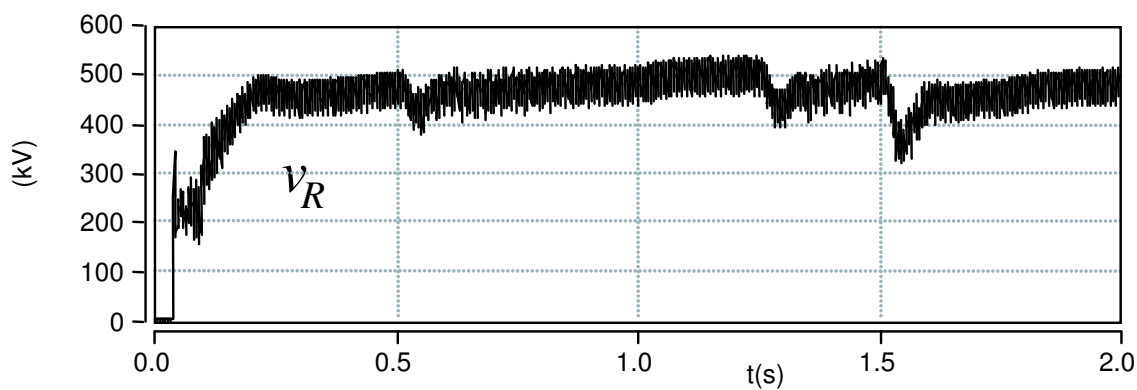


Figura 4.58: Tensão na saída da Estação retificadora.

A tensão no meio do elo cc no terminal do Tap HVDC Bidirecional por onde entra a corrente i_D é apresentada em duas situações: com e sem o Tap operando (Figura 4.59 e Figura 4.60 respectivamente). Entre $t = 1,00$ s e $t = 1,50$ s v_{tap+} é maior que v_{tap-} , pois o Tap está drenando energia do elo cc. Entre $t = 1,50$ s e $t = 1,75$ s v_{tap+} é menor que v_{tap-} , pois neste intervalo o Tap está fornecendo energia ao elo cc.

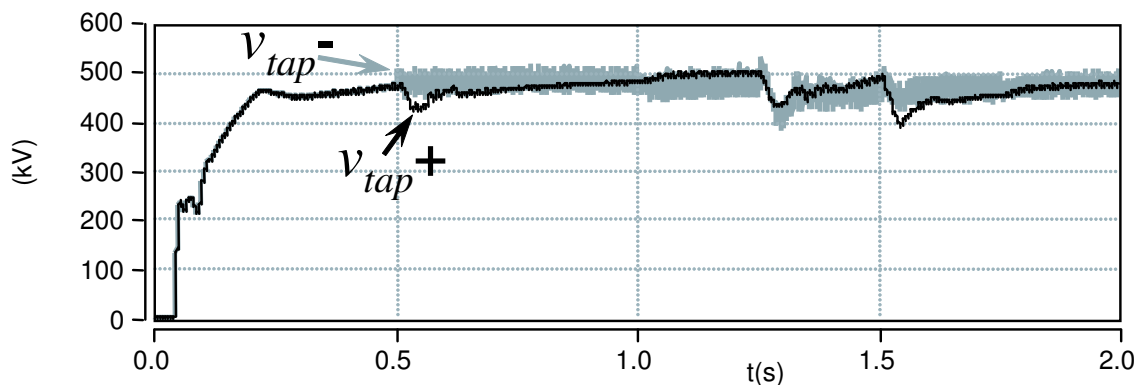


Figura 4.59: Tensão no meio do elo cc com o Tap HVDC Bidirecional operando.

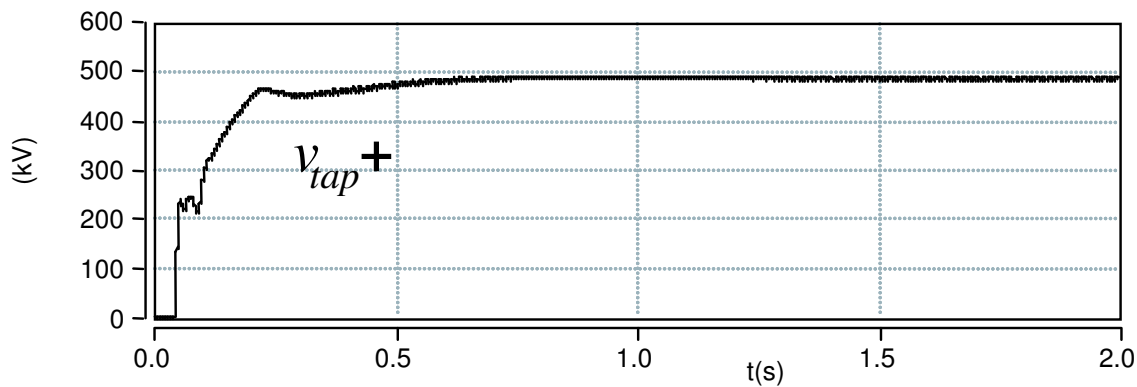


Figura 4.60: Tensão no meio do elo cc sem o Tap HVDC Bidirecional operando.

Capítulo 5

Conclusões

Nesse capítulo serão apresentadas e comentadas as contribuições deste estudo. Algumas propostas para trabalhos futuros são também apresentadas.

”Não se aprende, Senhor, na fantasia,
Sonhando, imaginando ou estudando,
Senão vendo, tratando e pelejando.”

Luís de Camões
Os Lusíadas, Canto X, 153

5.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou a modelagem e os resultados obtidos por simulação digital de uma proposta para uma derivação de um elo cc que seja bidirecional em fluxo de energia: o Tap HVDC Bidirecional.

Com base em trabalhos já desenvolvidos pelo Grupo de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ, foi concebido um novo circuito de potência com um conversor cc-ca operando em série com a linha de transmissão de um Sistema HVDC. O lado ca deste conversor composto de três Pontes-H foi conectado a um sistema ca, controlando tensão nesta conexão com modulação PWM.

Este sistema ca foi modelado ora como sendo sem geração local, ora como possuindo geração local, com a qual o Tap HVDC Bidirecional deve sincronizar. Estas duas configurações em conjunto com as duas propostas para o banco de transformadores renderam os casos simulados no PSCAD e apresentados no Capítulo 4.

O circuito de controle baseado em injeção de corrente para controlar tensão funcionou dentro das expectativas para alimentar um sistema ca composto apenas por cargas passivas, mas mostrou limitação quando o Tap HVDC Bidirecional está conectado a um sistema ca com fonte ca (geração local). Neste segundo caso, foi implementado controle de potência reativa para minimizar o efeito da magnetização do banco de transformadores com núcleo de ar, resultando em redução para cerca de 20% na potência reativa consumida pelo lado BT.

Um controle mais adequado na fonte ca local permitiria regular a tensão nos terminais dos transformadores e eliminar o consumo de reativo, já que o controle de divisão de carga do Tap HVDC Bidirecional e da fonte ca são baseados em amplitude de tensão. Este controle melhorado da fonte ca seria como o controle de um gerador, trabalhando na defasagem para dividir carga e na amplitude da tensão para controlar a potência reativa.

Foram apresentadas duas propostas para a composição do banco de transformadores, com as vantagens e desvantagens de cada proposta. Numa análise de viabilidade técnica e econômica, as diferentes capacidades dos bancos de

capacitores empregados em cada uma das propostas terá também grande influência.

Para o Tap HVDC Bidirecional operando inserido em um Sistema HVDC completo, não foram encontrados problemas durante a operação normal. Durante a aplicação de falta a terra e reversão total de potência ocorreram oscilações na tensão e corrente do elo cc que não comprometeram a operação do mesmo.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

Uma proposta é a construção de um protótipo em laboratório para uma análise detalhada de todo o Tap HVDC Bidirecional, seja deste modelo atual ou de um dos modelos propostos, quando este já estiver em desenvolvimento avançado. Neste caso será interessante dar ênfase à observação do funcionamento da Ponte-H, uma estrutura ainda pouco analisada e utilizada em conversores.

Outro ponto ainda não analisado é a conexão de vários Tap HVDC Unidirecionais e Bidirecionais em um mesmo Sistema HVDC. Ainda não se sabe qual o efeito da conexão de um número maior de Tap HVDC, a fração de potência máxima que estes podem drenar sem comprometer o funcionamento do Sistema HVDC e a influência entre eles decorrente da proximidade e do chaveamento assíncrono.

Chaveamento com ZVS e ZCS

Não foi possível obter chaveamento não dissipativo no desenvolvimento deste modelo de Tap HVDC Bidirecional. Há possibilidade do circuito formado pelo capacitor e o enrolamento AT poder ser ajustado de forma a se tornar ressonante.

Novas Topologias

Além da proposta do Tap HVDC Bidirecional apresentado na Figura 2.5 e detalhado na Figura 2.7, outros circuitos foram propostos e levados em consideração na escolha do circuito estudado neste trabalho. Eles serão brevemente apresentados a seguir e ficam como propostas para serem desenvolvidas e comparadas ao modelo

estudado neste trabalho.

Abaixo, na Figura 5.1, é apresentado um Tap HVDC Bidirecional semelhante ao estudado neste trabalho, com diferença no número de GTO (quatro a menos). Neste caso, toda vez que uma seção desta Ponte mudar de estado ela interfere no sentido da corrente das seções vizinhas, tornando complexa a lógica de controle. Como a Ponte-H é uma simplificação de um composto de Chaves e vários GTO deverão ser conectados em série para bloquear a tensão total, pode não ser interessante diminuir o número de GTO penalizando a controlabilidade e independência de cada Ponte-H e a respectiva fase do sistema ca.

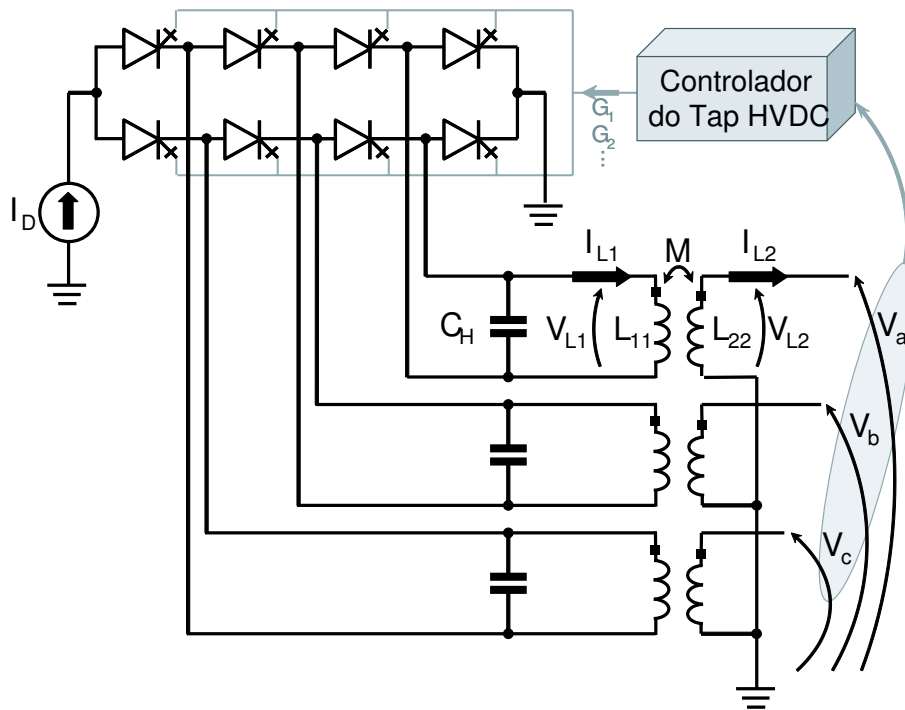


Figura 5.1: Outra configuração para o Tap HVDC Bidirecional.

A Figura 5.2 apresenta um conversor cc-ca com chaveamento não dissipativo projetado para acionamento de motores de indução [35] e adaptado para operar como um Tap HVDC Bidirecional. Ele é composto de seis Chaves-H e um banco de transformadores que pode ser considerado como um transformador trifásico, já que os enrolamentos conectados às Chaves-H podem ser ligados em Y ou Δ . O mesmo vale para os enrolamentos do lado do Sistema ca local. Aqui também é possível fazer com que o bloqueio dos GTO ocorra com ZVS ou ZCS, diminuindo assim as perdas durante sua operação.

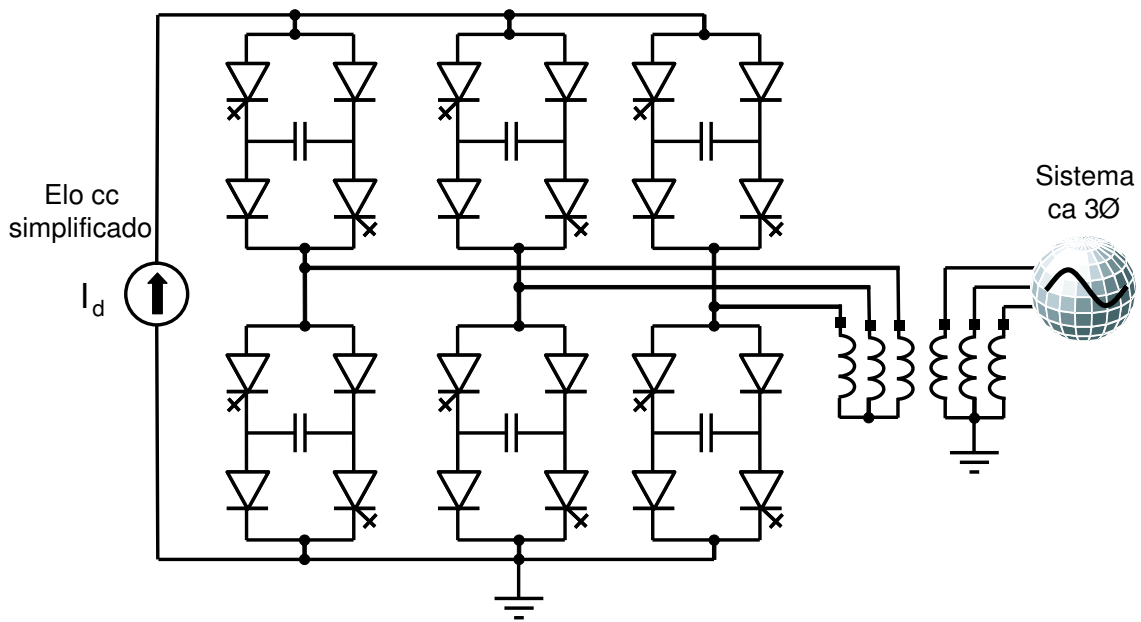


Figura 5.2: Uma proposta de configuração para o Tap HVDC Bidirecional baseada em acionadores de motores com chaveamento não dissipativo.

Novo Controlador com ajustes independentes de módulo e ângulo

Como já comentado, uma das limitações deste modelo de Tap ficou por conta do controlador que atua basicamente na amplitude da tensão no lado do sistema ca (lado BT). Um controlador mais complexo, com controle de amplitude e de ângulo baseado em controladores de geradores poderia resolver a questão da potência reativa consumida pelo banco de transformadores com controle dinâmico do fator de potência no lado ca do Tap HVDC Bidirecional. O controle de ângulo controla a potência ativa e o controle de amplitude controla a potência reativa, baseados nas Equações 5.1 e 5.2 de transferência de cargas. Nestas equações, os cálculos são feitos entre dois subsistemas 1 e 2 entre os quais há uma linha representada por uma reatância X_L e defasagem de tensão δ .

$$P_{12} = \frac{V_1 \cdot V_2}{X_L} \sin \delta_{12} \quad (5.1)$$

$$Q_{12} = \frac{V_2(V_1 \cos \delta_{12} - V_2)}{X_L} \quad (5.2)$$

Transformadores e Capacitores

O valor dos capacitores das Pontes-H do Tap HVDC Bidirecional operando com banco de transformadores com núcleo de ar foi obtido observando-se os resultados das simulações e a capacidade de potência reativa do banco ficou proporcional à do banco de capacitores utilizado no Tap HVDC Bidirecional. Utilizando três capacitores equivalentes de $650 \mu\text{F}$ cada com tensão eficaz de $24,042 \text{ kV}$ (dado de simulação), chega-se ao valor da capacidade do banco:

$$Q = 3 \frac{V_{AT}^2}{X_C} = 3 \frac{V_{AT}^2}{\frac{1}{\omega C}} = 3 \cdot V_{AT}^2 \cdot \omega \cdot C = 425 \text{ Mvar}. \quad (5.3)$$

É um valor muito alto, pois representa $8,5 \text{ p.u.}$ da potência ativa nominal do Tap HVDC Bidirecional. Esta relação entre a capacidade do banco de capacitores e a potência ativa nominal do conversor vem sendo utilizada no desenvolvimento do Tap HVDC Unidirecional até então para obter, com sucesso, chaveamento não-dissipativo [10]. Como este objetivo não foi alcançado neste trabalho, optou-se por apresentar uma alternativa ao banco de transformadores com núcleo de ar e a grande capacidade do banco de capacitores através de um banco de transformadores convencionais e bancos de capacitores de menores capacidades.

Com $C = 51 \mu\text{F}$, utilizado quando o Tap HVDC Bidirecional opera com banco de transformadores convencionais, a capacidade total dos bancos de capacitores foi reduzida para

$$Q = 3 \frac{V_{AT}^2}{X_C} = 3 \frac{V_{AT}^2}{\frac{1}{\omega C}} = 3 \cdot V_{AT}^2 \cdot \omega \cdot C = 11,536 \text{ Mvar}. \quad (5.4)$$

Este novo valor é $36,84$ vezes menor que o anterior e deve ser levado em conta junto com a análise do custo dos dois tipos de transformadores considerados.

Referências Bibliográficas

- [1] KIMBARK, E.W., *Direct Current Transmission*, 1 ed., New York, Wiley-Interscience, 1971.
- [2] *O que é o SIN - Sistema Interligado Nacional*, Operador Nacional do Sistema Elétrico, página da internet: <http://www.ons.org.br>.
- [3] GRAHAM, J., KUMAR, A., BILEDT, G., "HVDC Power Transmission for Remote Hydroelectric Plants", *CIGRE SC B4 Colloquium on Role of HVDC FACTS and Emerging Technologies in Evolving Power Systems*, India, Sep. 2005.
- [4] *Setor Energético: Destaques em 1999 e Oportunidades de Negócios*, Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Energia - Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético - Coordenação Geral de Informações Energéticas, Maio de 2000.
- [5] *Brasil em números*, IBGE, Rio de Janeiro, v. 12, p. 1-371, 2004.
- [6] *Mapas do SIN: Integração Energética*, Operador Nacional do Sistema Elétrico, página da internet: <http://www.ons.org.br>.
- [7] CARLSSON, L., *HVDC: A "firewall" against disturbances in high-voltage grids*, ABB Review n.3, 2005.
- [8] *Revista Itaipu Transmission System*, Furnas Centrais Elétricas SA.
- [9] GRAHAM, J., BILEDT, G., JOHANSSON, J., "Interligações de Sistemas Elétricos Através de Elos HVDC", *IX SEPOPE*, SP151, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Mai. 2004.
- [10] AREDES, M., PORTELA, C., MACHADO, F.C., "A 25 MW Soft-Switching HVDC Tap for ± 500 kV Transmission Lines", *IEEE Transactions On Power Delivery*, v.19, n.4, pp. 1835-1842, Oct. 2004.
- [11] SZECHTMAN, M., WESS, T., THIO, C.V., "First Benchmark Model for HVDC Control Studies", *Electra*, n. 135, pp. 54-73, Apr. 1991.

- [12] KOMATSU, W., *Conversores Auto-Comutados Aplicados em Derivações de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua e Alta Tensão*, Tese de Doutorado, São Paulo, 1998.
- [13] BOWLES, J.P., NAKRA, H.L., TURNER, A.B., "A Small Series Tap on an HVDC Line", *IEEE Transaction on Power Applications and Systems*, v. PAS-100, n. 2, pp. 857-862, Feb. 1981.
- [14] PONTE, J.R.R., ELLERY, E.H., AZEVEDO, D.C.B., GAMA, C.A., "Small series converter station specification and cost evaluation", *International Conference on ac and dc Power Transmission*, Conference Record. London, IEE, pp. 132-137, 1991.
- [15] MUNIZ, M.P., 1991 *Algumas Aplicações de Conversores com Comutação Forçada em Sistemas de Potência*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [16] BAHRMAN, M.P., BAKER, M.H., et al., "Integration of Small Taps into (Existing) HVDC Links", *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 10, n. 3, pp. 1699-1706, July 1995.
- [17] AGHAEBRAHIMI, M.R., MENZIES, R.W., "Small Power Tapping from HVDC Transmission Systems: A Novel Approach", *IEEE Transactions On Power Delivery*, v. 12, n. 4, pp. 1698-1703, Oct. 1997.
- [18] SATOH, K., YAMAMOTO, M., "The Present State of the Art in High-Power Semiconductor Devices", *Proceedings of the IEEE*, v. 89, n. 6, Jun. 2001.
- [19] MOHAN, N., UNDELAND, T.M., ROBBINS, W.P., *Power Electronics: converters, applications and design*, 2 ed., New York, John Wiley & Sons, 1995.
- [20] AGHAEBRAHIMI, M.R., MENZIES, R.W., "A customized Air-core Transformer for a Small Power Tapping Station", *IEEE Transactions On Power Delivery*, v. 13, n. 4, pp. 1265-1270, Oct. 1998.
- [21] AQUINO, A.F.C., 2000, *Alimentação de Pequenas Cargas a partir de um Sistema de Transmissão em Corrente Contínua*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [22] AQUINO, A.F.C., AREDES, M., "Análise de um Novo Tap HVDC de Chaveamento Suave", *XIII Congresso Brasileiro de Automática*, Florianópolis, SC, Brasil, Set. 2000.
- [23] AREDES, M., PORTELA, C., WATANABE, E.H., "HVDC Tapping Using Soft Switching Techniques", *Electrical Engineering, Archiv für Elektrotechnik*, v. 83, 2000.

- [24] AQUINO, A.F.C., AREDES, M., PORTELA, C., WATANABE, E.H., "Um Tap HVDC de Chaveamento Suave", *IX ERLAC - IX Encontro Regional Latino-Americano da Cigré*, n. IX/FI-14.5, pp. 1-6, Foz do Iguaçu, Brasil, Maio de 2001.
- [25] AREDES, M., PORTELA, C., AQUINO, A.F.C., PEIXOTO, "A 500 kV Soft-switching HVDC Tap", *39th Session of the CIGRÉ*, n. #14-115, Paris, França, Aug. 2002.
- [26] BITTENCOURT, S., ERIKSSON, K., BILEDT, G., "HVDC Light para transmissão de energia elétrica num mercado desregulamentado", *XV EXPO-SNPTEE Conference*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, Out. 1999.
- [27] MACHADO, F.C., 2003, *Otimização de um Tap HVDC*, Projeto de Fim de Curso, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [28] WATANABE, E.H., AREDES, M., "Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS", Tutorial no CBA'98 (XII Congresso Brasileiro de Automática), 1998.
- [29] AREDES, M., *Active Power Lines Conditioners*, Dr.-Ing Thesis, Technische Univesität Berlin, Berlin, Alemanha, 1996.
- [30] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*, *International Power Electronics Conference*, Tokyo, pp. 1375-1386, 1983.
- [31] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., *Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components*, *IEEE Transactions on Industrial and General Applications*, v. IA-20, n. 3, pp. 625-630, 1984.
- [32] WATANABE, E.H., STEPHAN, R.M., AREDES, M., "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", *IEEE Transactions On Power Delivery*, v. 8, n. 2, pp. 697-703, 1993.
- [33] CLARKE, E., *Circuit Analysis of A-C Power Systems*, *General Electric Co.*, 2 v., Schenectady, New York, 1950.
- [34] KARIMI-GHARTEMANI, M., IRAVANI, M.R., "A Method for Synchronization of Power Electronic Converters in Polluted and Variable-Frequency environments", *IEEE Transactions On Power Systems*, v.19, n.3, pp. 1263-1270, Aug. 2004.
- [35] ASSIS, T.M.L., IMBUZEIRO, R.S.S., AREDES, M., "Aplicação Eficiente de um Conversor Fonte de Corrente", *XIII Congresso Brasileiro de Automática*, CBA305, Florianópolis, SC, Brasil, Set. 2000.