



ESTUDO DE UM SISTEMA CCAT COM CAPACITOR DE COMUTAÇÃO

Luis Alberto Martinez Saavedra

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Mauricio Aredes.

Rio de Janeiro
Outubro de 2012

ESTUDO DE UM SISTEMA CCAT COM CAPACITOR DE COMUTAÇÃO

Luis Alberto Martinez Saavedra

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Mauricio Aredes, Dr.-Ing.

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

Prof. Sergio Gomes Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2012

Martinez Saavedra, Luis Alberto

Estudo de um Sistema CCAT com Capacitor de Comutação/Luis Alberto Martinez Saavedra.- Rio de Janeiro:UFRJ/COPPE, 2012.

XIII, 108 p. 29,7 cm.

Orientador: Mauricio Aredes

Dissertação– UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 88-90.

1. Introdução. 2. Conceitos Gerais de HVDC. 3. Análise de Estabilidade de Tensão. 4. Conversor com Capacitor de Comutação CCC. 5. Estudo de Casos de Aplicação de CCC-HVDC. I. Aredes, Mauricio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica.III. Título.

Agradecimentos

O presente trabalho representa uma etapa importante da minha vida, quero dedicar este trabalho em forma muito especial à memória da minha mãe Blanca Saavedra,

Agradeço ao **Prof. Aredes** pelo apoio brindado e por ter me recebido no Laboratório de Eletrônica de Potência e Media Tensão LEMT, ótimo lugar para a pesquisa e desenvolvimento

Para todos meus companheiros do LEMT, excelentes pessoas e grandes amigos. Em especial a Mauro pela amizade sincera e pelo apoio brindado na minha chegada ao Rio de Janeiro.

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 SISTEMA CCAT COM CAPACITOR DE COMUTAÇÃO

Luis Alberto Martinez Saavedra

Outubro/2012

Orientador: Mauricio Aredes.

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho desenvolve uma metodologia para o dimensionamento do capacitor de comutação de conversores CCAT(HVDC) na topologia CCC(*Capacitor Commutated Converter*). Por tanto, mostra-se a influência deste na estabilidade de tensão no sistema de transmissão CC. De forma semelhante, apresenta a análise da compensação reativa no lado CA do inversor assim como as consequências destes equipamentos na operação do sistema. Compara-se o sistema CCAT (*back to back*) convencional com o sistema CCAT com capacitor de comutação (CCC-HVDC). Verificou-se um melhor desempenho do CCC-HVDC frente à falha assimétrica, além de diminuir notavelmente a ocorrência de falha de comutação. Demonstrando que topologia CCC-HVDC é uma alternativa na hora de se conectar inversores CCAT com redes CA fracas.

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

STUDY OF A HVDC SYSTEM WITH CAPACITOR COMMUTATION

Luis Alberto Martinez Saavedra

October/2012

Advisor: Mauricio Aredes.

Department: Electrical Engineering

This work develops a methodology for calculating the sizing of the capacitor commutation of converters HVDC of topology CCC (Capacitor Commutated Converter). Shows the influence of the instability of the voltage of direct current transmission system. Similarly, presents the analysis of reactive compensation on the AC side of the inverter and the consequences of these devices in system operation. Compares the system CCAT (back to back) with conventional HVDC system with capacitor commutation (CCC-HVDC). There was a better performance of the HVDC-CCC front asymmetrical fault, and significantly reduce the occurrence of a failure of commutation. Demonstrating that CCC-HVDC topology is an alternative to connect inverters CCAT with weak AC networks.

Sumário

Capítulo I	1
Introdução	1
1.1 Introdução	2
1.2 Histórico	2
1.3 Motivação	3
1.4 Organização do Texto.....	4
Capítulo II.....	5
Conceitos Gerais da Transmissão CCAT	5
2.1 Características da Transmissão em Corrente Contínua	6
2.2 Operação do Conversor CC.....	7
2.3 Equações Básicas do Conversor	10
2.4 Relação de curto-circuito da rede CA (SCR)	14
2.5 Falha de Comutação	15
Capítulo III.....	16
Análise de Estabilidade de Tensão	16
3. 1. Introdução	17
3. 2. Instabilidade de Tensão	18
3. 3. Análise da Instabilidade de Tensão IT.....	23
3.3.1 IT da Geração interligada através de um Back to Back.....	28
3. 4. Simulações.....	32
3.4.1 Caso 1. Sistema CCAT convencional.....	33
3.4.2 Caso 2: Compensador Estático (SVC) no lado Inversor.	34
3.4.3. Caso 3: Statcom no lado Inversor.	36
3.4.4. Caso 4: Compensador Síncrono no lado Inversor.	37
Capítulo IV	39
Conversor com Capacitor de Comutação CCC	39
4. 1. Introdução	40
4. 2. Características Básicas.....	40
4. 2.1 Circuito de Comutação	42

4. 2.2 Metodologia para Seleção do Capacitor Série.....	48
4. 2.3 Contribuição dos capacitores na tensão CC.....	51
4. 3 Cálculo do ângulo de comutação μ considerando capacitor série.....	53
4. 4 Cálculo do margem de ângulo de extinção γ'	57
4. 5 Redução do Margem de Comutação γ'	59
Capítulo V.....	63
Estudo de Casos de Aplicação de CCC-HVDC	63
5. 1. Introdução.....	64
5. 2. Característica Básica de Operação.....	64
5.3. Dados do modelo do B2B-CCC	71
5.3.1 Dados da Rede CA das Estações Conversoras	71
5.3.2 Dados do Transformador Conversor	71
5.2.3 Capacitor de Comutação.....	72
5.2.4 Estação Conversora	72
5.3.5 Calculo dos Filtros da Rede CA	72
5.2.6 Fluxo de Potência	76
5. 3. Simulações.....	78
5.3.1 Falha Monofásica a terra no lado CA do Inversor.....	79
5.3.2 Falha Monofásica a terra no lado CA Inversor do B2B convencional.....	81
5.3.3 Simulação considerando carga local no lado CA do inversor CCC.....	85
Conclusões.....	87
Referencia Bibliográfica.....	89
Apêndice A	92
A.1 Cálculo das curvas de sensibilidade $\partial V/\partial Q_c$	92
A.2. Cálculo da curva de sensibilidade $\partial V/\partial B$	93
A.3 Cálculo da curva de sensibilidade $\partial V/\partial I_r$	96
A.4 Cálculo da curva de sensibilidade $\partial V/\partial P$ considerando B fixo.....	97
Apêndice B	99
B.1 Cálculo dos carregamentos não lineais do capacitor Δu_2 e Δu_1	99
B.2 Rotina para o calculo do angulo de comutação μ	100
B.3 Rotina para o calculo da margem de comutação γ'	102

B.4 Cálculo da Tensão CC no conversor comutado por capacitor CCC.....	104
Apêndice C	107
C.1 Topologia do Retificador com capacitor de Comutação.....	107
C.2 Topologia do Inversor com capacitor de Comutação	108

Lista de Figuras

Capitulo II

Figura 2. 1 Configuração da Ponte Graetz.....	7
Figura 2. 2 Topologia Básica de um Elo CC.....	8
Figura 2. 3 Tensão e Corrente CA do Conversor	9
Figura 2. 4 Circuito de Comutação das Válvulas 1 e 3.	11
Figura 2. 5 Queda de tensão devido á comutação[3].....	11

Capitulo III

Figura 3. 1 Topologia da Injeção de Geração.....	19
Figura 3. 2 Relação Potencia Ângulo.	21
Figura 3. 3 Limite de Estabilidade Angular LEA.....	23
Figura 3. 4 Limites de Estabilidade de Tensão.....	25
Figura 3. 5 Limite de Estabilidade considerando P variável e B fixo.	27
Figura 3. 6 Geração interligada através de um Back to Back de comutação natural ..	28
Figura 3. 7 Limites de Estabilidade de Tensão LET operando com $\gamma = 15^\circ$	29
Figura 3. 8 Limites de Estabilidade de Tensão LET operando Com $\gamma = 8^\circ$	30
Figura 3. 9 Potencia CC medido no inversor com rede CA de SCR=2.5.....	33
Figura 3. 10 Tensão e Corrente DC medido no inversor.....	33
Figura 3. 11 Tensão e Corrente CC considerando Compensação Estática (SVC) no lado Inversor de SCR=2.5	34
Figura 3. 12 HVDC com Compensação Estática (SVC) no lado Inversor e com SCR=1.8	35
Figura 3. 13 HVDC com Compensação Reativa (Statcom) no Inversor SCR=1.8	36
Figura 3. 14 Tensão não lado CA inversor com CS e relação SCR=1.8.	37
Figura 3. 15 Correntes nas fases do CS durante a falta simétrica.....	38
Figura 3. 16. Potência Reativa injetada pelo C.S.	38

Capitulo IV

Figura 4. 1 Configuração de capacitor série no lado CA.....	41
Figura 4. 2 Topologia Capacitor Série em Conversores CC	41

Figura 4. 3 Circuito básico durante o processo de comutação.	42
Figura 4. 4 Formas de onda de tensão e corrente	43
Figura 4. 5 Circuito de Comutação depois que a válvula 1 esta foi bloqueada.	48
Figura 4. 6 Tensão de pico reversa na válvula.....	49
Figura 4. 7 Tensão reversa na válvula com capacitor série de 100 μ F.	50
Figura 4. 8 Efeito da capacitância na tensão reversa da válvula.	50
Figura 4. 9 Relação da U_{db}/U_d (%).	52
Figura 4. 10 Margem de Comutação no CCC inversor.	57
Figura 4. 11 Redução do Margem de Comutação γ'	59
Figura 4. 12 Circuito Equivalente do transformador trifásico de 3 enrolamentos.....	60
Figura 4. 13 Tensão na válvula sem redução da margem de comutação γ'	62
 Capitulo V	
Figura 5. 1 Esquema Básico.	64
Figura 5. 2 Característica Estática de Operação U_d - I_d	65
Figura 5. 3 Característica Estática de Operação U_d - I_d para $\alpha_{mín}$	66
Figura 5. 4 Característica Estática U_d - I_d para uma redução na tensão CA do retificador.....	67
Figura 5. 5 Característica estática U_d - I_d do retificador e inversor com queda da tensão CA do retificador.	67
Figura 5. 6 Característica estática U_d - I_d com controle de corrente no retificador.....	68
Figura 5. 7. Característica Estática U_d - I_d com controle de corrente no inversor.....	69
Figura 5. 8 Curva estática do sistema de controle.	70
Figura 5. 9 Topologia dos filtros passa-baixa e passa alta.	73
Figura 5. 10 Impedância dos filtros passa-faixa VS. Frequência harmônica.	75
Figura 5. 11 Impedância do filtro passa alta vs. Frequência harmônica.....	76
Figura 5. 12 Máxima Transferência de Potência no CCC-HVDC e HVDC.	77
Figura 5. 13 Esquema Básico do CCC-HVDC em estudo.	78
Figura 5. 14 Queda de tensão de 20% no lado CA inversor.....	79
Figura 5. 15 Corrente e tensão CC medido no inversor.	79
Figura 5. 16 Ângulo de disparo α do retificador.....	80
Figura 5. 17 Ângulo de disparo α do inversor.	80
Figura 5. 18 Potência CC medido no inversor.....	81

Figura 5. 19 Queda de tensão de 13% no lado CA inversor.....	82
Figura 5. 20 Corrente e tensão CC medido no inversor do B2B convencional.....	82
Figura 5. 21 Ângulo de disparo α retificador do B2B convencional.....	83
Figura 5. 22 Ângulo de disparo α inversor do B2B convencional.	83
Figura 5. 23 Potencia CC no inversor.....	84
Figura 5. 24 Topologia com carga local no lado CA inversor.	85
Figura 5. 25 Recuperação da potencia CC medido no inversor.	86

Lista de Abreviaturas e Símbolos

CC	Corrente Contínua.
CA	Corrente Alternada.
$CCAT$	Corrente Contínua em Alta Tensão
I_d, V_d	Corrente e Tensão em corrente contínua.
E	Tensão pico fase-fase no lado da válvula do transformador.
α	Ângulo de disparo do conversor.
γ	Ângulo de extinção aparente do conversor.
μ	Ângulo de comutação do conversor.
$\Delta u_1, \Delta u_2$	Varição da tensão dos capacitores durante o intervalo de comutação fase que entra em condução e na que deixa de conduzir.
L	Indutância por fase da reatância do transformador.
C	Capacitor de comutação.
ω	Frequência angular da rede CA.
ω_0	Frequência angular de oscilação durante a comutação
i	Corrente instantânea da válvula que deixa de conduzir.
$I_d - i$	Corrente instantânea na válvula tiristor que entra em condução.

Capítulo I

Introdução

1.1 Introdução

Nos sistemas elétricos de potência, a utilização de eletrônica de potência teve seu início nos projetos dos sistemas de transmissão de corrente contínua em alta tensão *CCAT*, ou em inglês *High Voltage Direct Current (HVDC)*. Estes sistemas utilizam conversores de corrente alternada para corrente contínua e vice-versa controlados por válvulas eletrônicas, sendo a primeira aplicação dos conversores *CCAT*, a interconexão elétrica entre redes CA com diferentes frequências de operação. As primeiras válvulas foram feitas com tubos eletrônicos de vapor de mercúrio, sendo que atualmente são utilizados tiristores.

No Brasil a tecnologia HVDC-CCC, foi implementada na interligação back to back do sistema brasileiro (Garabi-60 Hz) com o sistema elétrico argentino (Rincón de Santa Maria-50 Hz), inicialmente projetada para uma potência 1000 MW depois expandida para 2200 MW pela duplicação da estação conversora. Do lado do Brasil a subestação Garabi apresenta um baixo nível de curto circuito e uma linha de transmissão longa (360 km), que requeria um adequado controle de potência reativa. Então o CCC resultou uma forma de solução para ambos problemas evitando assim compensação num ponto ponto intermediário da linha.[1]

1.2 Histórico

A transmissão de energia inicialmente foi em corrente contínua, o primeiro sistema de venda de electricidade para lâmpadas incandescentes $30kW$ criadas por Thomas Edison no ano 1882 em Nova York (EUA). Posteriormente, o aparecimento do transformador que permitia elevar as tensões, assim como o desenvolvimento e aperfeiçoamento de motor de indução no início do século XX, levaram os sistemas de transmissão de energia a serem em corrente alternada CA. Diversas pesquisas se realizaram, por exemplo, na Suécia, a empresa Allmana Svenska Electriska Aktiebolaget (ASEA), desenvolveu uma rede multi-eletrodo controlado por uma válvula de vapor de mercúrio para altas potências e tensões no ano 1929.

Atualmente, o sistema CC se tornou conveniente para transmitir altas potências a longas distâncias. O aumento da necessidade de eletricidade após a Segunda Guerra Mundial incentivou as pesquisas, principalmente na Suécia e na Rússia. Em 1950, foi realizada a primeira encomenda de projeto de uma linha de transmissão que interligasse Moscou para Kasira em 200 kV. A primeira linha de *HVDC* comercial foi construída em 1954, com 98 km de cabo submarino com retorno pelo solo, entre a ilha de Gotland e o continente sueco[2].

Os tiristores foram aplicados na transmissão CCAT no final do anos 60, com isto as válvulas de estado sólido viraram uma realidade. Hoje no Brasil, a maior tensão CC em operação para transmissão CCAT é $\pm 600kV$ para 785 km de linha do sistema CCAT Itaipu no Brasil.

1.3 Motivação

O conversor comutado por capacitor CCC, cuja topologia é uma variante do conversor convencional, na qual se inseriu um capacitor série entre o transformador conversor e as válvulas, isto representa um meio eficiente na comutação das válvulas tiristores com ângulos de disparo normalmente inatingíveis nos conversores convencionais.

O Conversor comutado por capacitor CCC-HVDC é uma tecnologia que oferece características estáticas e dinâmicas que permitem operar com sistemas CA de baixo nível de curto circuito. Portanto, a principal motivação refere-se à análise do conversor evitando a compensação reativa (síncrona) no lado CA fraco.

Assim mesmo, o projeto de interligação elétrica Rio Madeira, que vem se desenvolvendo atualmente no país, foi mais um incentivo para continuar com a pesquisa do conversor com capacitor de comutação, pois para isolar o sistema elétrico da região Norte esta sendo projetado um back to back CCC.

1.4 Organização do Texto

Neste trabalho é analisada a estrutura do circuito e operação de um conversor de comutação natural com capacitor em série do lado CA. A pesquisa desenvolvida abrange dois itens principais o primeiro referente ao problema de instabilidade de tensão na injeção de energia elétrica, e o segundo relativo às principais características estáticas do conversor. Portanto, a organização do texto resulta da seguinte maneira:

O capítulo I descreve os inícios da transmissão em corrente contínua, a razão de utilizar o conversor com capacitor de comutação.

O capítulo II mostra as características gerais da transmissão em corrente contínua, mediante o sistema HVDC convencional.

O capítulo III, analisa o conceito de estabilidade de tensão na caso de geração elétrica ou injeção de potência em um nó elétrico e a influência da compensação reativa neste fenômeno. Ressaltando a conveniência de operar o CCC imitando uma fonte de tensão regulável (FTR), ou seja, regulando tensão no lado CA inversor.

O capítulo IV, se analisa as principais características estáticas e vantagens do conversor CCC-HVDC, assim como a metodologia para escolher o valor de capacitância do capacitor de comutação.

O capítulo V, descreve a estratégia do sistema de controle do sistema CCAT e mostra o desempenho do CCC-HVDC frente a falhas assimétricas.

Capítulo II
Conceitos Gerais da Transmissão
CCAT

2.1 Características da Transmissão em Corrente Contínua

No início da transmissão em CC se tinha a ideia que esta apresentava menores perdas, mas não é assim. O nível de perdas é dado pela linha de transmissão, ou seja, pelo tamanho do condutor elétrico a ser projetado.

A linha aérea de transmissão CC incluindo suas torres apresenta um custo por unidade de comprimento (\$/Km) menor do que a linha de transmissão CA, isto para um mesmo nível de potência transmitida. No entanto, as estações conversoras CC (retificador e inversor) são mais caras do que as subestações de uma linha CA, mas para grandes distâncias existe um ponto de equilíbrio acima da qual o custo total de transmissão CC é menor que a alternativa de transmissão CA.

Se considerarmos que a transmissão é feita por cabo subterrâneo ou submarino, na qual a distância de equilíbrio torna-se menor do que a transmissão aérea. Não seria prático utilizar sistemas CA a cabo com distâncias maiores do que a 50 km, mas nos sistemas CC de transmissão a cabo seria possível. Existe em operação centenas de quilômetros deste tipo de transmissão, tem sido viável a partir de distâncias maiores do que quilômetros.

Existem sistemas elétricos que operam em diferentes frequências e cujas redes se encontram fisicamente bem próximas, obviamente não poderiam ser sincronizados mesmo sendo suas distâncias físicas muito pequenas. Como por exemplo, no Japão onde metade do país é uma rede de 60 Hz e a outra em 50 Hz, seria impossível interligar sistemas similares mediante conexão CA. No entanto, através de estações conversoras CC é possível realizar a interligação e transferir fluxo de energia entre eles.

2.2 Operação do Conversor CC.

A válvula conversora, ponte Graetz, comumente chamada de 6 pulsos mostrada na figura 2.1 é o elemento básico da transmissão CC(HVDC). Opera como retificador quando o fluxo de potência vem do lado CA para o lado CC e como inversor quando o fluxo de potência é do lado CC para o lado CA. As válvulas de tiristores operam como interruptores passam a conduzir corrente ao receber a ordem de disparar e se estiverem polarizados diretamente. O tiristor conduz corrente em uma direção e será desligado quando se polariza inversamente. Esse processo é conhecido como comutação natural ou de linha.

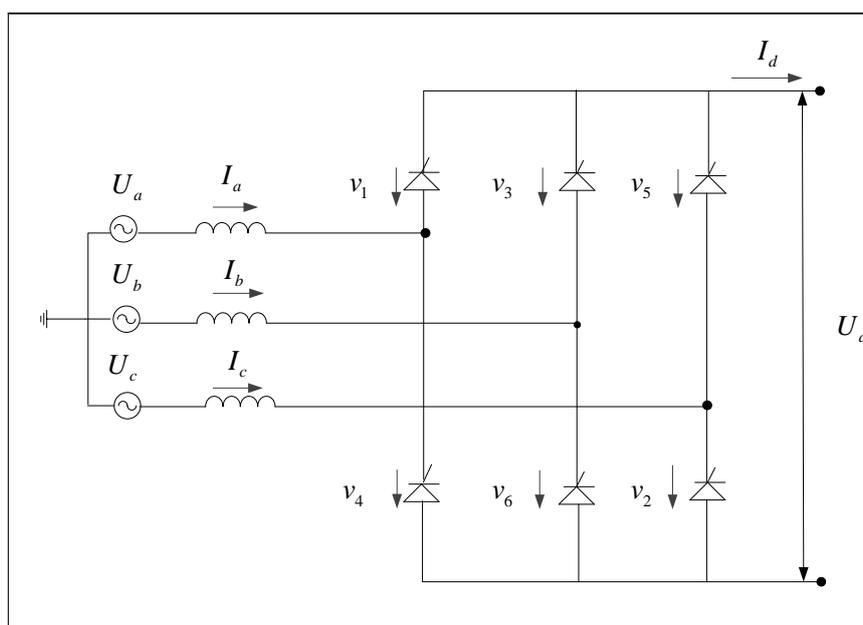


Figura 2. 1 Configuração da Ponte Graetz.

Os conversores em corrente contínua geralmente são montados em configurações de 12 pulsos, que resulta da associação série de pontes de 6 pulsos, tal como se observa na figura 2.2. As ligações dos enrolamentos secundários do transformador no lado dos conversores são em configuração estrela e delta, deste modo as tensões CA aplicada para cada conversor de seis pulsos mantêm uma diferença de fase de 30° uma da outra. Isto nos permite cancelar as correntes harmônicas de 5^a e 7^a ordem que vêm do lado CA e a tensão harmônica de 6^a

ordem proveniente do lado CC. Desta forma reduzimos significativamente os filtros harmônicos a serem instalados.

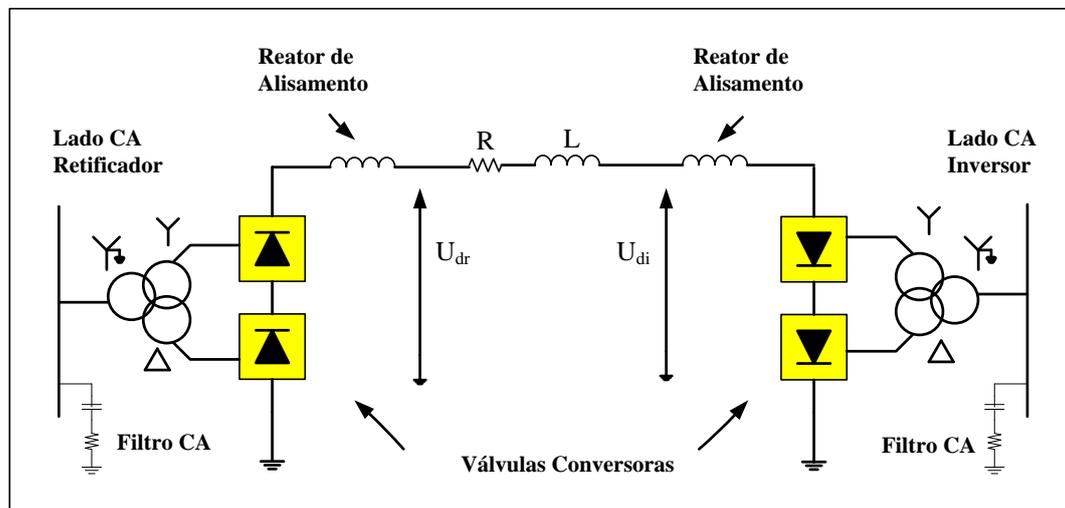


Figura 2. 2 Topologia Básica de um Elo CCAT.

O modo de operação do conversor como retificador ou inversor é realizado através de um processo conhecido como comutação natural ou de linha. Neste caso, a reatância de comutação é a reatância do transformador conversor, a rede CA de ambos lados fornecem as tensões CA para cada conversor sendo esta trifásica e relativamente livre de harmônicos.

As tensões CC dos conversores podem ser controladas através da variação de taps nos transformadores conjuntamente com a ação de ajuste do ângulo de disparo das válvulas.

O reator de alisamento tem como finalidade minimizar as variações bruscas de corrente da linha CC, conseqüentemente se reduz a variação na tensão CC. Por outro, lado a indutância do lado CA dos conversores evita que as comutações de corrente de uma válvula para outra válvula sejam de forma excessivamente rápida.

A figura 2.3 mostra as formas de onda de tensão e corrente do lado CA dos conversores com os respectivos ângulos elétricos que definem a operação das conversoras.

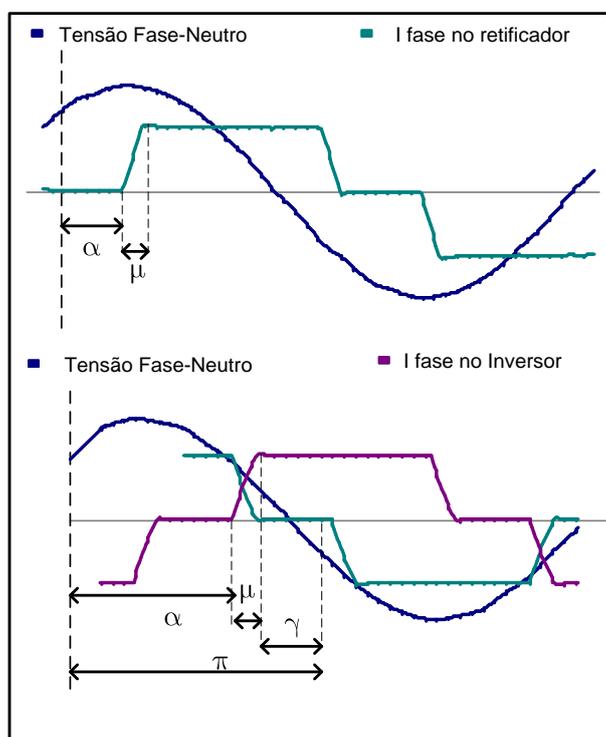


Figura 2. 3 Tensão e Corrente CA do Conversor

Ângulo de disparo α : Indica o tempo expressado em unidade de ângulo elétrico, que mede o instante entre o cruzamento por zero da tensão de comutação e o instante inicial de condução da válvula. Este ângulo é controlado pelo pulso de disparo do tiristor e se for menor que 90° , a ponte conversora opera como um retificador e se for maior que 90° , opera como inversor.

Ângulo de comutação μ : Indica o período de tempo, expressado em ângulo elétrico, da comutação de corrente entre as válvulas do conversor.

Ângulo de Avanço β : Indica o tempo expressado em ângulo elétrico que mede o instante do início de condução até a próxima passagem por zero da tensão de comutação. O ângulo de avanço β está relacionado com o ângulo de disparo α por:

$$\beta = 180^\circ - \alpha . \quad (2.1)$$

Ângulo de Extinção γ : Representa o tempo entre o final da comutação e a passagem por zero da tensão de comutação. O Ângulo γ depende do ângulo de avanço β e do ângulo de comutação μ sendo determinado pela seguinte relação:

$$\gamma = \beta - \mu . \quad (2.2)$$

2.3 Equações Básicas do Conversor

Neste item será mostrado de forma resumida as equações em estado estacionário para o conversor CA/CC.

Como a rede CA e especialmente o transformador apresentam uma característica indutiva, o processo de transferência de corrente de uma fase para outra, denominada comutação, requer um tempo determinado μ/ω . Onde μ é o ângulo de comutação que para condições normais e varia entre 20 e 25 graus.

Durante o processo de comutação da corrente, três válvulas estão conduzindo, conforme se observa na figura 2.4. Mas entre cada comutação só duas válvulas conduzem, por tanto, a sequência de condução das válvulas seria 12, 123, 23, 234, 34, 345, 45, 456, 56, 561, 61 e 612.[3]

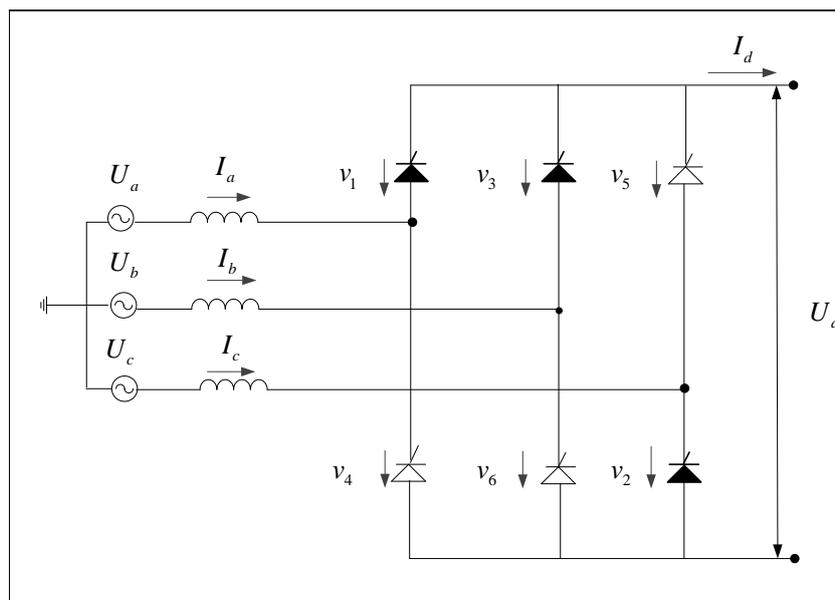


Figura 2. 4 Circuito de Comutação das Válvulas 1 e 3.

Nota-se que durante a comutação há a ocorrência de um curto-circuito entre as fases que estão comutando, de forma que a tensão resultante do lado CC medida no referencial do neutro do secundário do transformador do conversor é igual à média aritmética das tensões das fases envolvidas na comutação. O efeito da comutação é reduzir a tensão média da ponte conversora, mediante a área $A = \Delta U_d \cdot \frac{\pi}{3}$, tal como se observa na Figura 2.5.

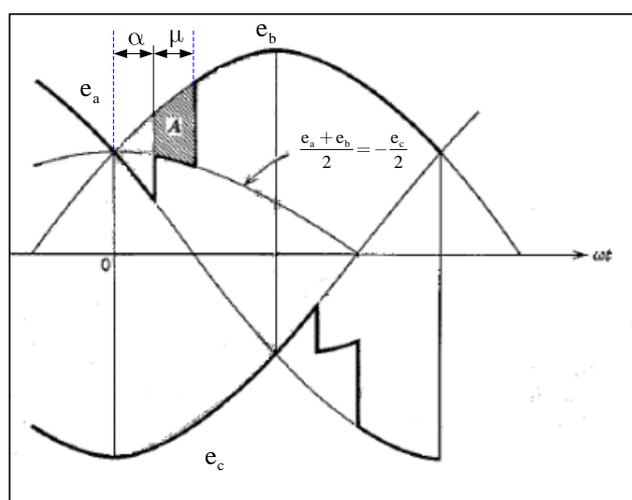


Figura 2. 5 Queda de tensão devido á comutação[3].

A tensão CC do conversor sem considerar a comutação se expressa pela seguinte equação [3]:

$$U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha \quad (2.3)$$

Se considerarmos o processo de comutação, temos que subtrair a queda de tensão pela comutação ΔU_d que se define como segue [3]:

$$\Delta U_d = \frac{3 \cdot A}{\pi} \quad (2.4)$$

Resultando a expressão da tensão média CC como segue:

$$U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha - \Delta U_d$$

$$U_d = U_{do} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos \alpha + \mu}{2} \quad (2.5)$$

Onde U_{do} é a tensão ideal CC, sem carga no conversor, expressada pela relação:

$$U_{do} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{CA(fase-fase)} \quad (2.6)$$

A equação (2.5) é válida na operação em estado estacionário com condução alternada de duas e três válvulas, ou seja, para ângulos de comutação inferiores a 60 graus $\mu < 60^\circ$ [3]. Por outro lado, pode-se escrever a dita equação em função da reatância de comutação e da corrente retificada, chamada também equação característica do conversor:

$$U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_c \cdot I_d \quad (2.7)$$

Igualando-se as equações (2.5) e (2.7) se obtém a expressão para o ângulo de comutação, conforme indicado abaixo:

$$\mu = \cos^{-1} \left(\cos \alpha - \frac{2.X_c.I_d}{\sqrt{2}.U_{ca}} \right) \quad (2.8)$$

Uma aproximação aceitável para determinar o fator de potência do conversor como retificador resulta de igualar as potências CC e CA. Note-se que o ângulo de disparo α é um valor determinado, que para condições normais varia entre $10^\circ < \alpha < 18^\circ$.

$$\cos \phi_r = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos (\alpha + \mu)] \quad (2.9)$$

Para o caso inversor o fator de potencia se define pela seguinte expressão.

$$\cos \phi_i = \frac{1}{2} [\cos \gamma + \cos (\gamma + \mu)] \quad (2.10)$$

Onde o ângulo de extinção γ é estabelecido pelo conversor, geralmente é 18° .

Considerando a rede em corrente alternada precisa-se calcular a potência ativa e reativa que será injetada ou absorvida pelo conversor. Para tal fim, deve-se calcular a corrente CC a qual se define pela seguinte expressão:

$$I_d = \frac{\sqrt{2}.U_{CA(fase-fase)}}{2.X_c} . \cos \alpha - \cos (\alpha + \mu) \quad (2.11)$$

Então a potência ativa P_d transmitida pela ponte conversora, sem considerar as perdas, resulta em:

$$P_d = I_d.U_d \quad (2.12)$$

Desta forma a potência reativa consumida pode ser obtida pela seguinte expressão

$$Q = P_d \cdot \text{tg } \phi \quad (2.13)$$

2.4 Relação de curto-circuito da rede CA (SCR)

A robustez da rede CA na barra da subestação da transmissão CC pode ser expressada pela relação de curto-circuito SCR (*Short Circuit Rated*), definida como a relação entre a potência de curto-circuito em MVA (S_{cc}) e a potência transmitida pelo elo CC em MW (P_d).

$$SCR = \frac{S_{cc}}{P_d} \quad (2.14)$$

Os capacitores e filtros CA ligado na rede CA reduzem o nível de curto-circuito. A expressão da relação de curto-circuito eficaz (ESCR) é usado para a relação entre o nível de curto-circuito reduzido pela potência reativa dos bancos de capacitores shunt.

Baixos níveis de ESCR ou SCR significam uma interação forte entre a ponte conversora e a rede CA. Portanto, a rede CA pode ser classificada pela sua robustez, como segue:

- Sistema CA Forte com alto nível ESCR: $ESCR > 3.0$
- Sistema CA com Baixo nível ESCR: $2.0 < ESCR < 3.0$.
- Sistema CA Fraco, nível muito baixo de ESCR $< 2,0$.

No caso de sistemas com ESCR baixo e muito baixo, as mudanças na rede CA ou no elo CC podem trazer oscilações de tensão e a necessidade de estabelecer novas estratégias de controle. O Controle dinâmico de potência reativa na rede CA ou próximo da transmissão CC, pode ser feito através de algum equipamento FACTS.

Antigamente, o controle dinâmico de potência reativa era realizada através de compensadores síncronos.

2.5 Falha de Comutação

A falha de comutação ocorre geralmente na ponte conversora operando como inversor, quando uma válvula comuta, a corrente direta vai para zero e a tensão reversa através da válvula permanece negativa. O período em que a válvula fica com polarização negativa é indicada pelo ângulo de extinção γ , após este intervalo a válvula volta a se polarizar diretamente.

As válvulas requerem remover as cargas internamente armazenadas produzidas durante o período de condução. Deste modo, a válvula pode reestabelecer a sua capacidade de bloquear a polarização direta. Assim, o conversor inversor precisa de um período mínimo de polarização negativa ou ângulo extinção mínimo γ_{\min} para que o bloqueio da condução direta seja bem sucedido, evitando que a condução da válvula ocorra sem um pulso de disparo. Se não fosse assim, aconteceria o que comumente chama-se de falha de comutação.

Capítulo III

Análise de Estabilidade de Tensão

3. 1. Introdução

Neste capítulo mostra-se novo conceito de estabilidade de tensão baseado na entrada de sistemas não convencionais de geração nas redes elétricas. Estes conceitos servirão também para analisar a operação de sistemas HVDC conectados com inversor a redes fracas.

A expansão planejada de geração por fontes não renováveis, especialmente de centrais de geração eólica (CGE), nos sistemas elétricos, pode causar diversos problemas: instabilidade de tensão, baixa qualidade de energia, pois este tipo de geração apresenta desvantagens em relação à geração convencional (síncrona). Portanto, são necessários requisitos específicos, para evitar que apareçam perturbações complexas, como por exemplo:

- Desligamento massivo de CGEs por instabilidade de tensão, subtensão, curto-circuitos, rajadas de vento.
- Variação da potência das CGEs por irregularidade do vento, produzindo variações de frequência e de tensões, exigindo reserva adicional de geração térmica e de compensação reativa.
- Perturbações relativas a qualidade de energia.

Ante esta realidade surge o problema da instabilidade de tensão por injeção de geração em condições degradadas de rede, considerando redes extensas, reatância externa maior onde as potências transmitidas percorrem distâncias maiores (menor SCR).

Embora seja conhecido o conceito de instabilidade de tensão (IT) para alimentação de cargas, não está muito difundida para injeção de geração não convencional, exceto para inversores HVDC.

Em geral, a instabilidade de tensão ocorre na transmissão de potência a pontos eletricamente distantes. Note-se que quando existe carga local no ponto de injeção de

potência ocorre um aumento da relação SCR da rede, fato não considerado nas definições do SCR e ESCR do CIGRÉ.

Neste capítulo, se demonstra, que quando temos injeção de potência numa rede CA com baixo nível de curto-circuito (SCR) se requer compensação reativa preferencialmente do tipo síncrona ou estática com VSC que imite compensação síncrona e/ou enlaces HVDC preferivelmente com capacitor série imitando uma fonte de tensão regulável, para superar problemas de instabilidade de tensão.

3. 2. Instabilidade de Tensão

A seguir é abordado o problema de instabilidade de tensão e angular na injeção de geração. Mostram-se as equações de estabilidade de tensão para injeção de potência ativa P controlando a tensão V mediante a variação dos seguintes parâmetros:

- a) Susceptancia, B
- b) Corrente reativa, I_r .
- c) Potencia Reativa, Q
- d) Fonte de tensão regulável, FTR.

A análise é feita considerando a potência ativa P constante, que é válido no caso de geração de energia, pois a turbina da máquina síncrona define o valor da potência gerada a ser injetada na rede CA, conforme mostrado na figura 3.1.

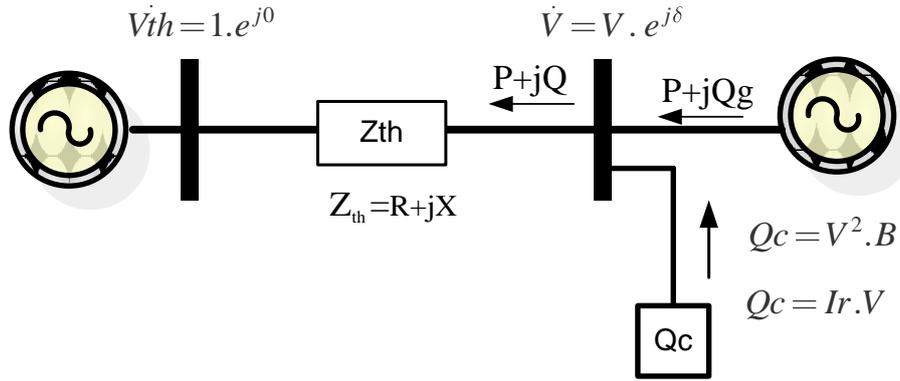


Figura 3. 1 Topologia da Injeção de Geração.

O fenômeno de IT se explica através da injeção de P em um ponto da rede elétrica, representada por seu equivalente thévenin, cuja tensão é definida como $\overline{V_{th}} = |V_{th}|.e^{j0}$ (barra infinita) e impedância $\overline{Z_{th}} = |Z_{th}|e^{j\theta}$. Utiliza-se a notação fasorial unicamente para simplificar os cálculos a serem realizados.

Considerando a tensão base como $V_{Base} = |V_{th}|$ e impedância base como $Z_{Base} = |Z_{th}|$, o equivalente da rede CA expressa em valor por unidade (p.u) resulta como segue:

$$\overline{V_{th}} = |V_{th}|.e^{j0} = 1.e^{j0} \text{ p.u} \quad (3.1)$$

$$\overline{Z_{th}} = |Z_{th}|.e^{j\theta} = 1.e^{j\theta} = (\cos \theta + j \sin \theta) \text{ p.u} \quad (3.2)$$

A tensão no ponto de injeção se define como $\overline{V} = V.e^{j\delta}$, onde o ângulo relativo à barra infinita é δ . A potência reativa do gerador está em função da potência ativa P gerada mediante a relação $Q_g = P.T$, onde a variável T é constante (negativa), e dizer, que o gerador opera no estado subexcitado. Por outro lado, considera-se compensação reativa capacitiva Q_c em função da variável susceptância B $Q_c = V^2 \cdot B$.

Portanto, a potência reativa total injetada na rede CA é como segue:

$$Q = Q_g + Q_c$$

$$Q = P.T + V^2 . B \quad (3.3)$$

A potência aparente total \dot{S} e corrente \dot{I} injetada se expressa como:

$$\dot{S}^* = \dot{V}^* . \dot{I} \quad (3.4)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V} - V_{th}}{Z_{th}} = \frac{V . e^{j\delta} - 1}{R_{th} + jX_{th}} = \frac{V . e^{j\delta} - 1}{\sin\theta + j \cos\theta} \quad (3.5)$$

Note-se que a impedância Z_{th} considera também as perdas na transmissão R_{th} , a potência de curto-circuito S_{cc} na barra de geração é definida pela equação:

$$S_{cc} = \frac{V_{th}^2}{|Z_{th}|} \quad (3.6)$$

Considerando a tensão $V_{th} = 1.0 \text{ p.u}$ e modulo da impedância $|Z_{th}| = 1$, a potência de curto-circuito em por unidade seria igual a 1, portanto a relação SCR expressa em p.u se define como segue:

$$SCR_{(p.u)} = \frac{1}{P_{(p.u)}} \quad (3.7)$$

Resolvendo as equações (3.4) e (3.5) indicadas anteriormente resulta:

$$P - jQ = V . e^{-j\delta} . \left(\frac{V . e^{-j\delta} - 1}{e^{j\theta}} \right) \quad (3.8)$$

Separando a parte real e imaginária obtemos:

$$V^2 \cdot \cos \theta - P = V \cdot \cos \theta + \delta \quad (3.9)$$

$$V^2 \cdot \sin \theta - Q = V \cdot \sin \theta + \delta \quad (3.10)$$

Destas equações nota-se que a equação (3.9), seria equivalente à tradicional relação Potência-Ângulo δ , tal como se mostra na figura 3.2.

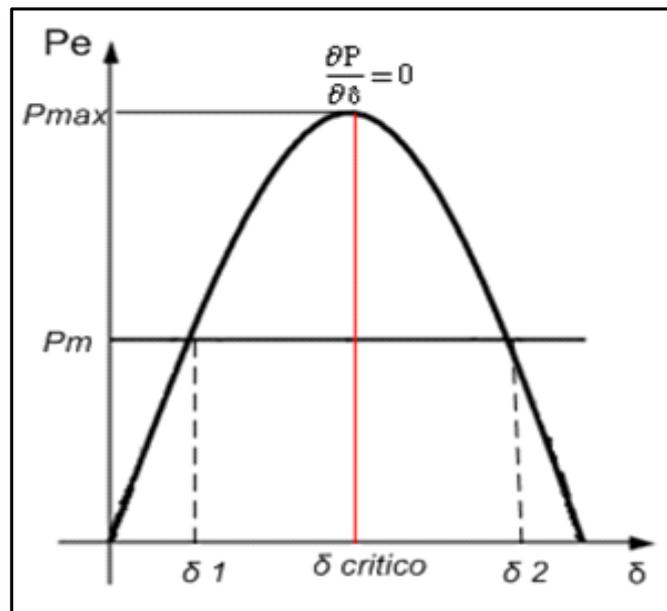


Figura 3. 2 Relação Potencia Ângulo.

A Figura 3.2 indica a curva característica $P-\delta$ no caso de um gerador conectado a uma barra infinita através de uma reatância externa. Igualmente, observa-se em dita relação que o ângulo de potência crítica ocorre num valor maior do que 90° [4]

Para a curva tradicional, sem regulação de tensão, temos que a separação angular δ_1 , encontra-se na área de operação estável e δ_2 na área de operação instável, pois a partir do ângulo $\delta = 90^\circ$, a potência transferida começa a diminuir acrescentando ainda mais a separação de ângulo entre a geração e a rede elétrica, produzindo instabilidade pois existe potência sincronizante negativa.

A potência máxima P_{\max} que se injeta na rede CA conseqüentemente define também o limite de estabilidade angular *LEA*, o qual ocorre para um ângulo de potencia crítico δ_{critico} , tal como se indica a continuação:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = V \cdot \sin \theta + \delta = 0, \quad (3.11)$$

$$\delta_{\text{critico}} = 180 - \theta \quad (3.12)$$

Considerando a rede thévenin com característica $X_{th}/R_{th} = 10$ com regulação da tensão V da barra de injeção de potência no valor de 1.0 p.u, o ângulo de potência critica se define como segue:

$$\delta_{\text{critico}} = 180^\circ - \tan^{-1}(10) \quad (3.13)$$

Substituindo (3.13) na equação (3.9) a potência máxima injetada resulta:

$$P_{\max} = 1.1 \text{ p.u} \quad (3.14)$$

Com estes valores se define o limite de estabilidade angular *LEA*, o qual ocorre a partir do instante que atinge potência ativa máxima $P_{\max} = 1.1 \text{ p.u}$ e com um ângulo de potência crítico $\delta_{\text{critico}} = 95.7^\circ$, conforme mostrado na figura 3.3.

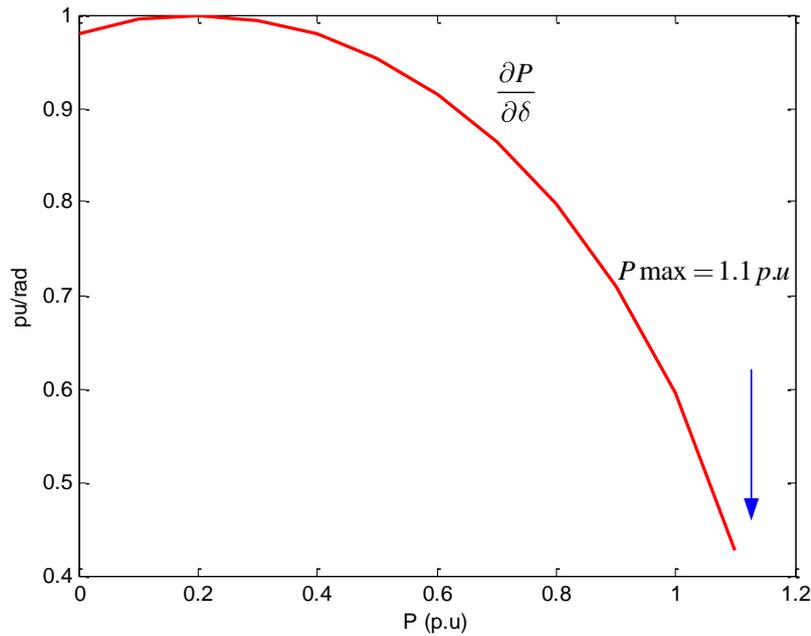


Figura 3. 3 Limite de Estabilidade Angular LEA.

3. 3. Análise da Instabilidade de Tensão IT

A nova abordagem que analisarmos, ao invés de considerar as curvas V vs P ou V vs Q , consideram-se as curvas da susceptância B e de potência reativa capacitiva Q_c , requerida para regular a tensão V no nó de injeção de potência [5].

Também analisa-se as curvas de sensibilidade da tensão V relativa à variação dos parâmetros B, Q_c, Ir , indicados anteriormente, para valor crescente da potência ativa P injetada.

A equação geral obtém-se a partir da soma dos quadrados das equações (3.9) e (3.10).

$$V^2 = V^2 \cdot \cos^2 \theta - P^2 + V^2 \cdot \sin^2 \theta - Q^2 \quad (3.15)$$

Assim mesmo, definem-se as variáveis $K_1 = V^2 \cdot \cos \theta - P$ e $K_2 = \sqrt{V^2 - K_1^2}$ que substituídas na equação geral resulta a potência reativa de compensação Q_c como segue

$$\begin{aligned} K_2 &= \sqrt{V^2 - K_1^2} = V^2 \cdot \sin \theta - P \cdot T - Q_c \\ Q_c &= V^2 \sin \theta - K_2 - P \cdot T \end{aligned} \quad (3.16)$$

Da equação (3.16), pode-se calcular a sensibilidade $\partial V / \partial Q_c$:

$$\frac{\partial V}{\partial Q_c} = 1 / \left[2 \cdot V \cdot \sin \theta - 1 - 2 \cdot K_1 \cdot \cos \theta \cdot V / K_2 \right] \quad (3.17)$$

De igual forma, se expressamos a susceptância em relação da potência reativa $B = Q_c / V^2$, podemos calcular a sensibilidade $\partial V / \partial B$ como se mostra abaixo:

$$\frac{\partial V}{\partial B} = 1 / \left\{ 1 / V^2 \cdot \partial V / \partial Q_c - \frac{2 \cdot Q_c}{V^3} \right\} \quad (3.18)$$

Por último, considerando a relação $I_r = Q_c / V$ obtém-se a sensibilidade $\partial V / \partial I_r$ expressada como segue:

$$\frac{\partial V}{\partial I_r} = 1 / \left[1 / V \cdot \partial V / \partial Q_c - Q_c / V^2 \right] \quad (3.19)$$

A partir destas equações são traçadas as curvas de sensibilidade, tal como se observa na seguinte figura.

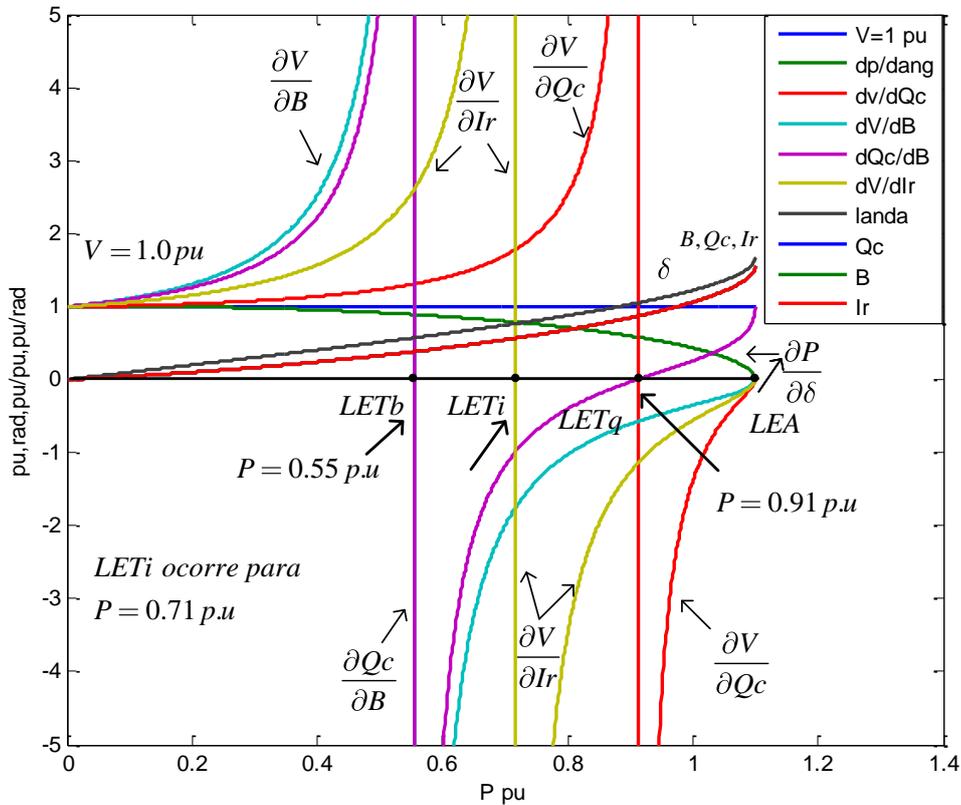


Figura 3. 4 Limites de Estabilidade de Tensão.

Analisando a Fig. 3.4, observa-se que os Limites de Estabilidade de Tensão por variação dos parâmetros B , lr e Qc aparecem quando as curvas de sensibilidade traçadas mudam de polaridade positiva a negativa. Em particular, o $LETb$ nos indica que mantendo a susceptância B crescente, a tensão V começaria afundar até colapsar (curto-circuito), isto ocorre para $P = 0.55$ pu e ângulo de potência. $\delta = 32.8^\circ$. Este tipo de compensação se consegue, mediante bancos de capacitores, ou compensador estático do tipo SVC que acrescentam a susceptância B em forma permanente para aumentar a tensão da barra V .

O limite da estabilidade de tensão por variação de potência reativa $LETq$, ocorre para um valor de potência ativa injetada de $P = 0.91 p.u$ com ângulo de potência $\delta = 60^\circ$, podendo ser alcançado em sistemas que aumentam Q_c para regular V . A potência reativa de compensação Q_c se define em função da susceptância B através da relação $Q_c = V^2 \cdot B$. Então, a sensibilidade de Q_c respeito à susceptância B resulta como segue:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial B} = V^2 + 2.V.B. \frac{\partial V}{\partial B} \quad (3.20)$$

Para os sistemas que aumentam B para regular tensão V não é possível aumentar P acima do $LETb$. Portanto, embora a variação da tensão V com relação a Q_c seja positivo $\partial V / \partial Q_c > 0$, o valor da potência reativa de compensação Q_c não poderia ser acrescentada elevando a susceptância B , pois a sensibilidade $\partial Q_c / \partial B$ é negativa.

Isto, devido a que a sensibilidade $\partial V / \partial B$ já inverteu a sua polaridade para valores acima do limite $LETb$, ou seja, muito antes de atingir o limite de estabilidade por variação de potencia reativa $LETq$, tal como se observa na figura 3.4.

O Limite de Estabilidade de Tensão por variação de Ir $LETi$ aparece quando a curva de sensibilidade $\partial V / \partial Ir$ muda de polaridade, passando a ser negativa. Neste caso o $LETi$ ocorre quando a potência injetada é $P = 0.71 p.u$ e com um ângulo de potência $\delta = 43.7^\circ$, permitindo injetar potência ativa P acima do limite $LETb$, mas produzindo instabilidade antes de alcançar o limite $LETq$.

A proposta da dissertação é calcular a curva $\partial V / \partial P$ de sensibilidade da tensão V respeito a potência ativa injetada P , considerando compensação reativa fixa ou constante (capacitor shunt) para regular a tensão V , ou seja, a susceptância B é constante, resulta a expressão seguinte:

$$\frac{\partial V}{\partial P} = \frac{\frac{K_1}{K_2} + T}{\left\{ \left(\frac{1}{\partial V / \partial Q_c} \right) - 2.V.B \right\}} \quad (3.21)$$

Utilizando a equação (3.21) que indica a sensibilidade $\partial V / \partial P$ se traça

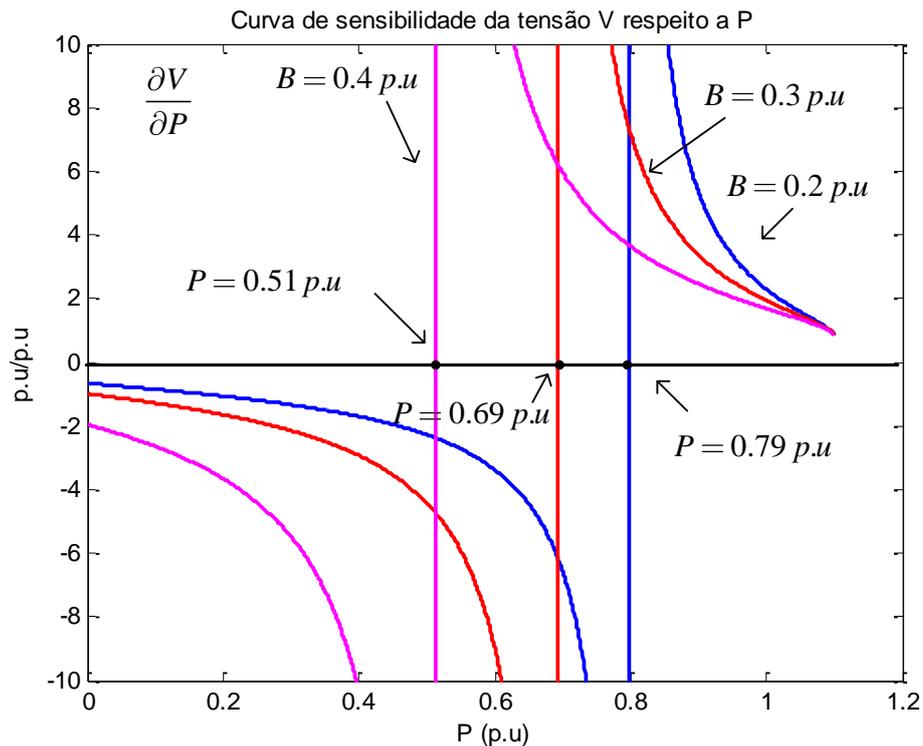


Figura 3. 5 Limite de Estabilidade considerando P variável e B fixo.

Analisando a Fig. 3.5 nota-se que ao acrescentar a compensação reativa (fixa) mediante a susceptância B, faz que o limite de estabilidade $\partial V / \partial P$ varie limitando a capacidade de injetar potência ativa no sistema.

Em relação do caso anterior o qual considera P fixa e B variável apresentam melhor característica, devido a que com menores valores de susceptância pode-se transmitir maior P.

3.3.1 IT da Geração interligada através de um Back to Back

Uma análise considerando gerador eólico conectado à rede CA através de um conversor *back-to-back* com comutação natural é apresentado a seguir [5].

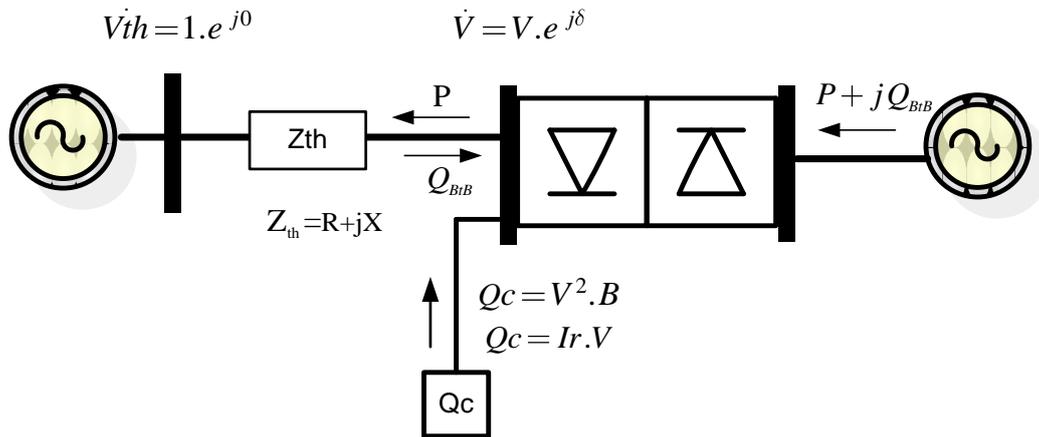


Figura 3. 6 Geração interligada através de um Back to Back de comutação natural.

Observa-se, um gerador síncrono conectado do lado retificador e do lado inversor a rede CA, onde se injetaria a potência ativa P . Neste caso o inversor está operando com ângulo de extinção γ constante e com compensação reativa Q_c no lado CA que regula a tensão V

A potência reativa total no lado inversor é dada por $Q = Q_{BTB} + Q_c$ onde Q_{BTB} é a potência reativa requerida pelo *back to back* (da ordem 50% da potencia transmitida), que é calculada utilizando as seguintes equações:

$$Q_{BTB} = P \cdot \tan \phi$$

$$\tan \phi = -2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2\gamma + \mu \quad (3.22)$$

A equação do ângulo de comutação μ no inversor é dada por:

$$\mu = \cos^{-1} \left(\cos \gamma - \frac{2 \cdot X_c \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot V} \right) - \gamma \quad (3.23)$$

Por tanto, são traçadas as curvas de sensibilidade para uma reatância de comutação $X_c = 0.1 pu$, corrente CC $I_d = 1.0 pu$ e um ângulo de extinção $\gamma = 15^\circ$

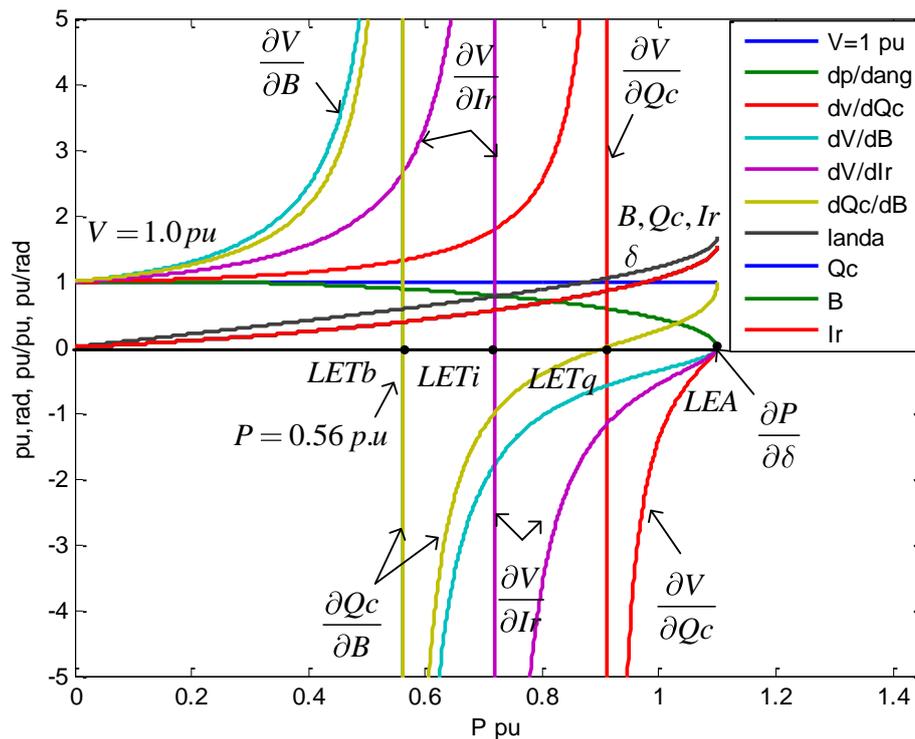


Figura 3. 7 Limites de Estabilidade de Tensão LET operando com $\gamma = 15^\circ$.

Na Figura. 3.7, se mostra as curvas de sensibilidade de tensão considerando regulação da tensão V do lado CA do inversor na referência de $1.0 pu$. Se for o caso de termos compensação reativo mediante a variação de susceptância B SVC . O limite $LETb$ ocorre para um valor de potência ativa transmitida $P = 0.56 pu$ e com ângulo de potência $\delta = 33.17^\circ$. Calculando a relação de curto-circuito neste caso $SCR = 1/P_{pu}$ resulta igual a 1.7. Por tanto, a rede CA deveria operar pelo menos

com nível de SCR igual ou maior do que a 2 para que não ocorra nenhum tipo de instabilidade de tensão.

Por outro lado, considerando que o inversor está operando com ângulo de extinção $\gamma = 8^\circ$, o qual seria factível se fosse do tipo comutado por capacitor. Neste cenário, observa-se na Fig. 7 que o limite $LETb$ ocorre quando a potencia ativa injetada é $P = 0.59 p.u$ e com ângulo de potência $\delta = 35.13^\circ$. De igual forma, os limites $LETi$ e $LETq$ ocorrem para valores de $p = 0.73 p.u$ e $P = 0.91 p.u$ respectivamente.

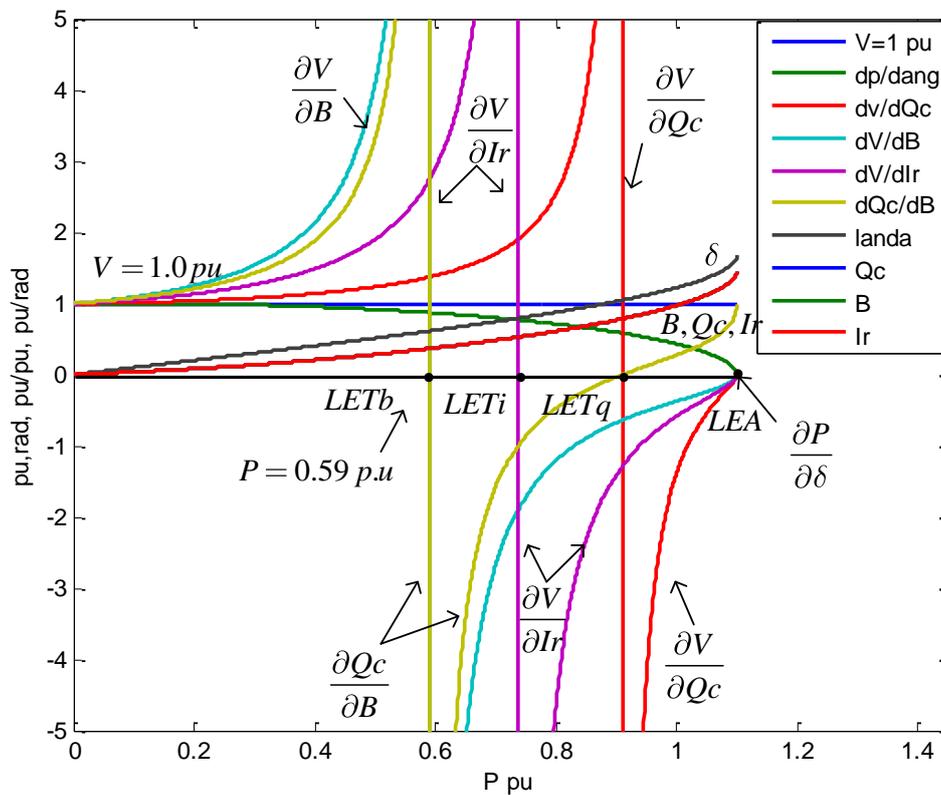


Figura 3. 8 Limites de Estabilidade de Tensão LET operando Com $\gamma = 8^\circ$.

O valor de potência obtido $P = 0.59 p.u$ resulta em um maior valor em relação ao caso anterior, onde a instabilidade acontece no valor de $P = 0.56 p.u$. Isto

demonstra com clareza que a operação do inversor com ângulo de extinção γ menor apresenta uma melhor condição da estabilidade de tensão do sistema.

Quando sistemas HVDC são interligados a redes CA que apresentam baixa relação de curto-circuito $SCR < 2$ é necessário considerar compensação síncrona e/ou capacitor série para um melhor desempenho.

3. 4. Simulações

Para comprovar os conceitos apresentados relativos à instabilidade de tensão na geração elétrica, se utilizou o modelo Cigre-BenchMark HVDC disponível no software EMTDC–PSCAD [6]. No qual se coloca compensação reativa no lado inversor para analisar os efeitos sobre a transmissão CC.

O sistema HVDC, é de configuração monopolar 500 kV, 1000 MW de potência, com conversores de 12 pulsos tanto para o lado retificador como para o lado inversor, ambos conectados a sistemas CA com baixo nível de SCR.

Parâmetros	Retificador	Inversor
Tensão CA	345 kV	230 kV
Potência Base	100 MVA	100 MVA
Tap do Transformador(HV)	1.01 pu	0.989 pu
Tensão Nominal CC	500 kV	500 kV
Corrente Nominal CC	2 kA	2 kA
Reatância do Transformador	0.18 pu	0.18 pu
Impedância do lado CA	R=3.737 Ω L=0 H	R=0.7406 Ω L= 0.0365 H
Frequência	50 Hz	50 Hz
Ângulo Mínimo	$\alpha=15^\circ$	$\gamma=15^\circ$

A seguir se apresentam os casos simulados:

3.4.1 Caso 1. Sistema CCAT convencional.

Considerando o sistema HVDC monopolar, em condições de operação normal, onde não se considera compensação reativa no lado inversor, com relação de SCR igual a 2.5. Na figura 3.9, indica-se a potência CC medida no inversor, no valor de 0.99 p.u, a qual se conseguiu de forma manual a partir de uma potência inicial transmitida de 0.20 p.u.

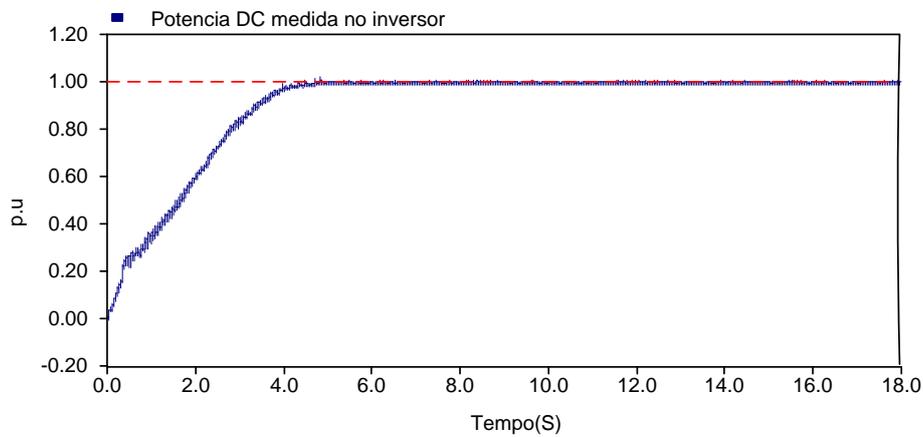


Figura 3. 9 Potência CC medido no inversor com rede CA de SCR=2.5.

Observa-se, que a corrente e tensão CC medidas no inversor se encontram nos valores de. 1.03 p.u e 0.96 p.u respectivamente, como se indica na figura 3.10.

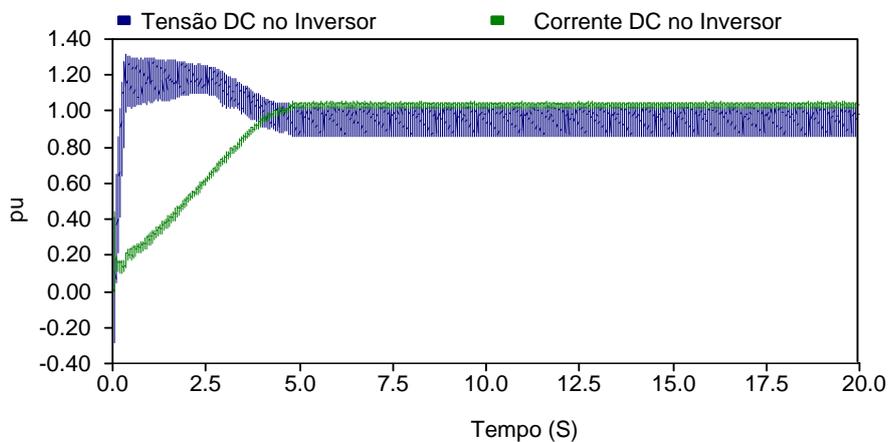


Figura 3. 10 Tensão e Corrente CC medido no inversor.

3.4.2 Caso 2: Compensador Estático (SVC) no lado Inversor.

Neste caso, se considera o caso base, com um compensador estático SVC no lado inversor, cujas características se indicam na tabela 3.1:

Tabela 3.1. Características gerais do compensador estático SVC.

Parâmetros	Dados
Potência do Transformador	200 Mvar
Relação de transformação	230/12.5/12.5 kV
Potência Reativa do TCR	100 Mvar
Potência Reativa do TSC	167 Mvar

Primeiramente é analisado o comportamento do sistema com compensação estática, com relação de curto-circuito (SCR) no lado CA do inversor de 2.5, obtendo o seguinte resultado:

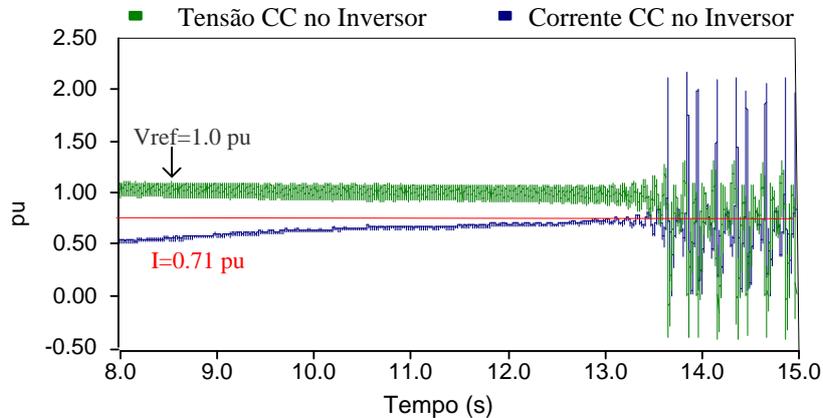


Figura 3. 11 Tensão e Corrente CC considerando Compensação Estática (SVC) no lado Inversor de SCR=2.5

Na Figura 3.11, observa-se que a tensão CC medida no inversor se encontra no valor 1.0 p.u, isto demonstra claramente que o compensador estático efetivamente regula a tensão CA do lado inversor. A partir do instante que se incrementa a transmissão de potência no elo para uma ordem de corrente no valor de 0.71 p.u, o

sistema CCAT entra em instabilidade de tensão. Devido, a que o limite $LETb$ é ultrapassado.

Portanto, não se consegue transmitir a potência plena diferente do obtido no caso 1(Fig. 3.9). Vale salientar que não foi simulado nenhum tipo de distúrbio.

Este caso evidência que a curva de sensibilidade $\partial V/\partial B$ inverte sua polaridade, confirmando a análise apresentada anteriormente.

Por outro lado, simulou-se também um caso considerando a rede CA do inversor com relação de curto circuito (SCR) de 1.8.

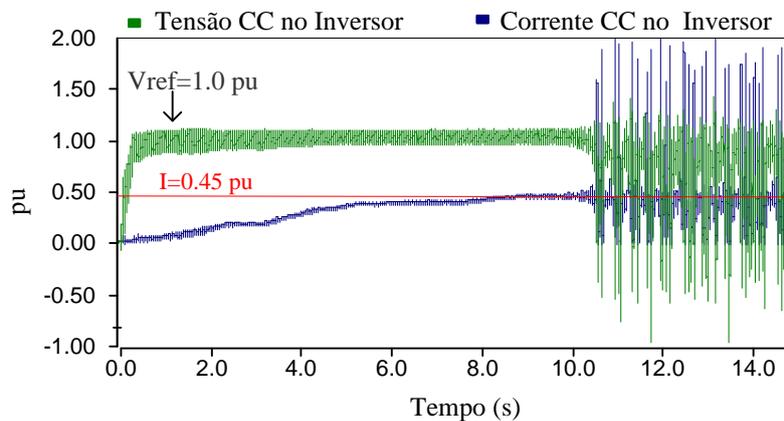


Figura 3. 12 HVDC com Compensação Estática (SVC) no lado Inversor e com $SCR=1.8$.

O compensador estático regula a tensão CA do lado inversor para um valor de referência de 1.0 p.u, conseqüentemente a tensão CC medida no inversor se encontra regulada nesse valor, tal como se observa na figura 3.12. Assim mesmo, a partir do instante que se incrementamos a transmissão de potencia no elo CC para um valor igual a 0.45 p.u, o sistema CC entraria em instabilidade de tensão.

Dos casos simulados, conclui-se que se a relação de curto-circuito na rede CA diminui-se de 2.5 para 1.8, considera compensação reativa do tipo susceptivo (SVC), seria um limitante no sistema CCAT, já que só se conseguiria transmitir potência no

valor de $P=0.45$ p.u. Desta forma, verificam-se os conceitos de instabilidade de tensão que se indicaram no início deste capítulo.

3.4.3. Caso 3: Statcom no lado Inversor.

Neste caso, se considera o caso base com compensação reativa por variação de corrente reativa $\partial V/\partial I_r$ (Statcom) no lado CA do inversor, cuja relação SCR é de 1.8.

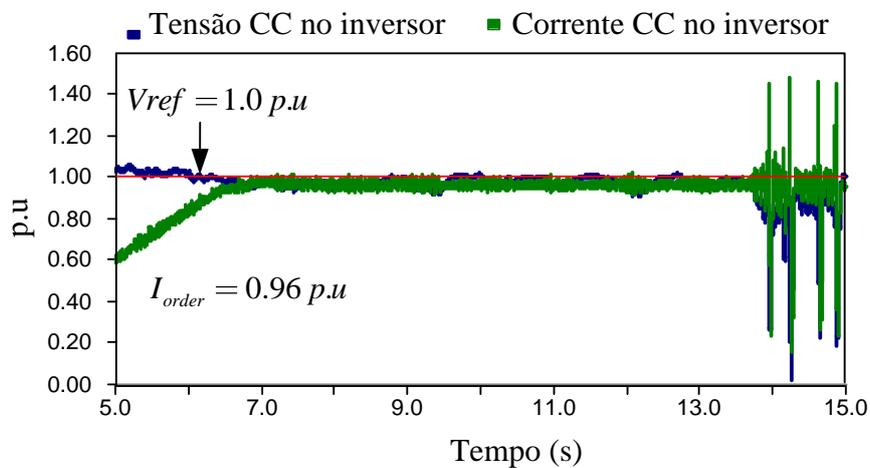


Figura 3. 13 HVDC com Compensação Reativa (Statcom) no Inversor SCR=1.8 .

Da Figura 3.13, observa-se efetivamente que o compensador Statcom está regulando tensão CA do lado inversor para um valor de referência de 1.0 p.u. Observa-se, que no instante que a corrente CC medida no inversor atinge o valor de 0.96 p.u o sistema CC entra num estado de instabilidade de tensão.

Desta forma, verifica-se que no quando a rede CA do inversor apresentasse uma relação de curto-circuito SCR menor a 2.5, o sistema de controle do compensador estático (statcom), origina problemas de instabilidade de tensão.

3.4.4. Caso 4: Compensador Síncrono no lado Inversor.

No caso a seguir se analisa o comportamento do elo CC com compensação reativa do tipo sincrônica (100M var) conectada no lado CA do inversor. Um fato importante a ter presente é que os compensadores síncronos aumentam a potência de curto-circuito e por tanto a relação *SCR* por serem fontes de tensão com reserva de energia girante [7].

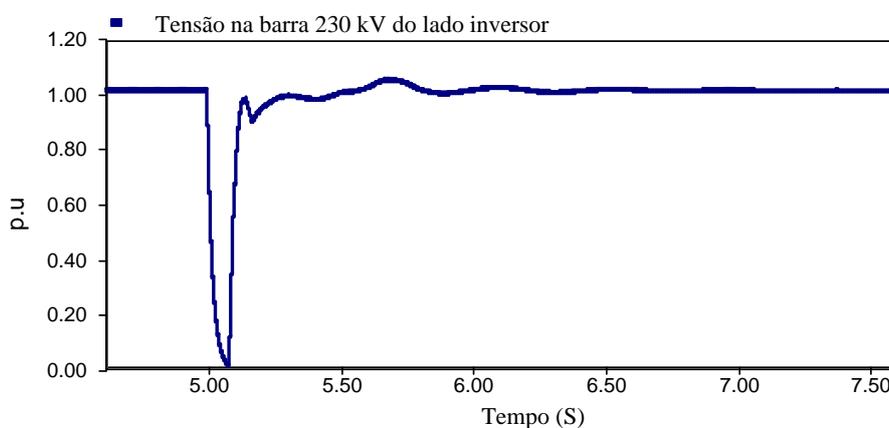


Figura 3. 14 Tensão não lado CA inversor com CS e relação *SCR*=1.8.

Na Figura 3.14 é mostrada a tensão da barra 230 kV do inversor, aplicando-se uma falta trifásica com duração de 80 ms, sendo a relação *SCR* igual a 1.8. Verifica-se que antes da falta, o compensador síncrono faz a regulação da tensão do lado CA para a referência de 1.0 p.u. Assim mesmo, após eliminação da falta, a primeira oscilação a tensão CA do lado inversor supera o valor de 0.80 p.u.

O compensador síncrono injeta potência de curto-circuito rapidamente durante a falta. Observa-se que a corrente da fase A atinge o seu valor máximo em menos de meio ciclo após início da falta, tal como se observa na figura 3.15.

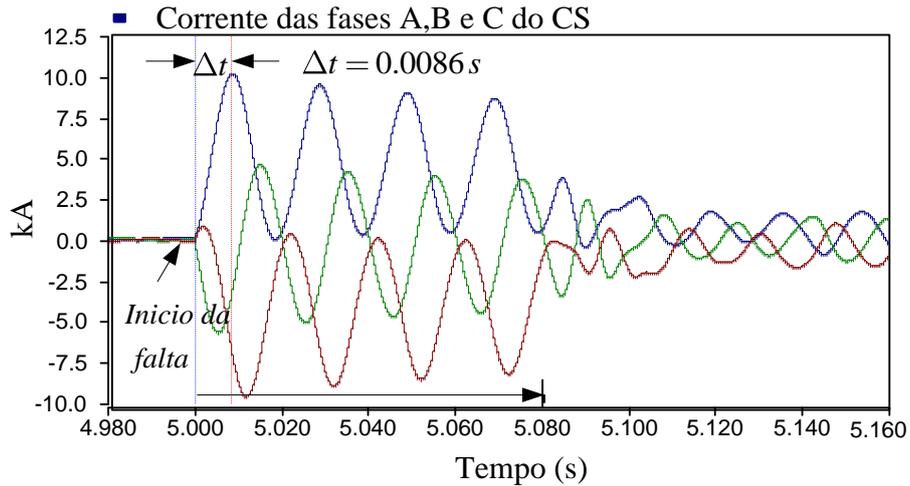


Figura 3. 15 Correntes nas fases do CS durante a falta simétrica.

Analisa-se o comportamento do compensador síncrono frente à queda de 15% da tensão no lado CA inversor. Para isto, simulou-se uma falta monofásica que origina uma queda de tensão durante 80 ms.

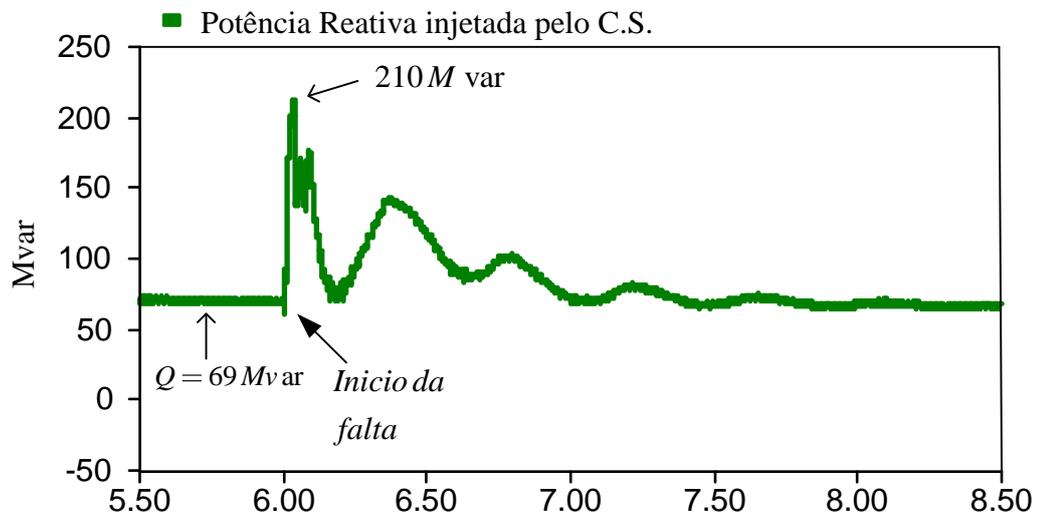


Figura 3. 16. Potência Reativa injetada pelo C.S.

Na figura 3.16, observa-se que o compensador síncrono apresenta uma resposta imediata frente a variações de tensão. Na condição de operação normal o C.S está compensando a rede CA com 69 Mvar e durante o distúrbio consegue injetar até 210 Mvar de potência reativa, o qual ajuda a sustentar a tensão na barra CA do inversor.

Capítulo IV
Conversor com Capacitor de
Comutação CCC-HVDC

4. 1. Introdução

A maioria dos sistemas de transmissão em corrente contínua (*High Voltage Direct Current HVDC*) que existem na atualidade são de comutação natural pela linha ou indutância (*Line Commutated Converter LCC*). Esta topologia, embora eficiente, confiáveis e econômica requer uma grande quantidade de reativos para operar. Esta potência reativa é fornecida pelos filtros CA instalados na subestação, ou banco de capacitores.

Estes conversores apresentam problemas no lado inversor, especialmente quando operam conectado a redes CA com baixo nível de curto circuito (SCR).

Como alternativa, aparece uma nova topologia que consiste na inserção de um capacitor série entre o transformador conversor e as válvulas conversoras. Desta forma, se melhora o desempenho do inversor frente às falhas de comutação. Este é o foco deste trabalho, será analisado o conversor com capacitor de comutação (CCC), que é uma pequena variante do sistema convencional. Suas vantagens frente ao HVDC convencional serão evidenciadas.

4. 2. Características Básicas

Existem vários tipos de arranjos para inserir o capacitor série nos sistemas de transmissão CC, seja no interior do circuito de comutação ou em série com a rede CA ou linhas que alimentam os conversores. A seguir apresenta-se três configurações estudadas e citadas na literatura[8].

Na Figura 4.1, o capacitor série está localizado no lado da linha CA, à semelhança da compensação serie tradicional. Neste caso, o capacitor não está incluído no circuito de comutação e, portanto, não tem influência na operação interna do conversor.

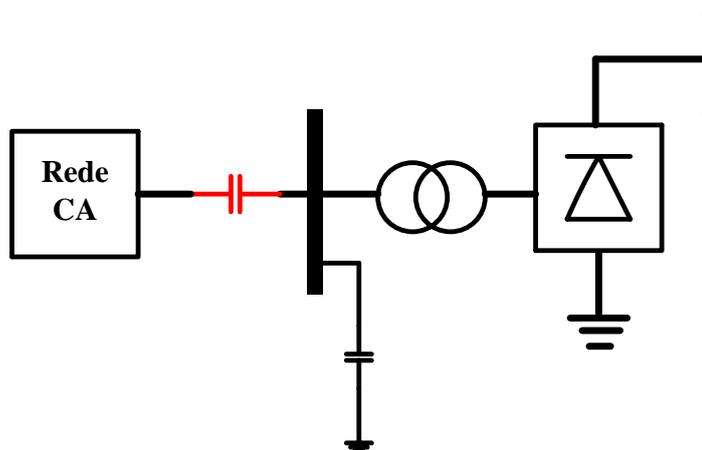


Figura 4. 1 Configuração de capacitor série no lado CA.

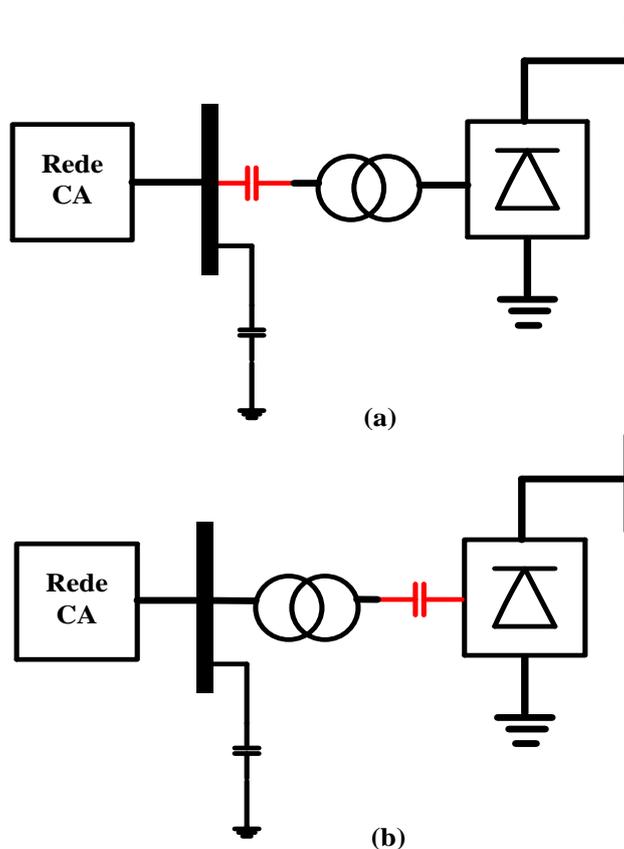


Figura 4. 2 Topologia Capacitor Série em Conversores CC.

Nos arranjos observados na Figura 4.2, o capacitor série é inserido no circuito de comutação e, conseqüentemente, influi no funcionamento interno do conversor. Na configuração (a) o capacitor é colocado entre o transformador e a barra de comutação.

Por outro lado, na configuração (b) que é a opção mais aceita até agora, o capacitor série está localizado entre o transformador conversor e as válvulas.

Desta forma, é possível fornecer tensão inversa adicional às válvulas, assim podendo operar com ângulos menores, tanto de disparo α no retificador como de extinção γ no inversor.

4. 2.1 Circuito de Comutação

A seguir são indicadas as equações que determinam a operação do conversor comutado por capacitor durante a comutação da válvula 1 para 3, tal como se observa na Figura 4.3[9,10].

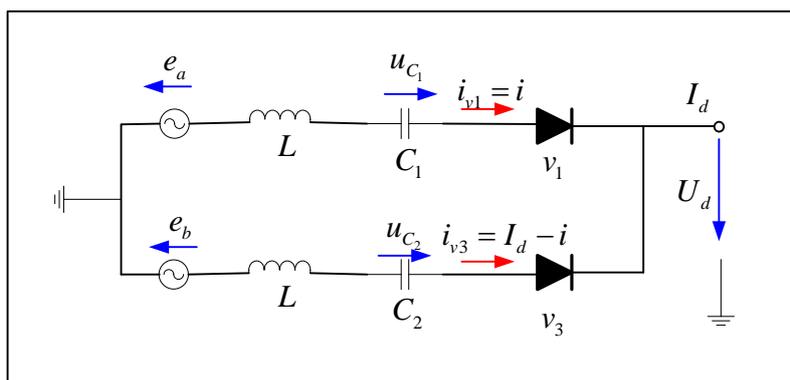


Figura 4. 3 Circuito básico durante o processo de comutação.

Assume-se que a corrente no início da comutação da válvula v_3 é zero e na válvula v_1 seria I_d . Assim mesmo o carregamento do capacitor C_1 e C_2 é pelas correntes i e $I_d - i$ respectivamente.

Nota-se que uma vez terminado o processo de comutação, a válvula 3 continua conduzindo até o instante $\omega t = 2\pi/3 - \mu$. Desta forma o capacitor C_2 continua o processo de carregamento, mas de forma linear tal como se observa na figura 4.4.

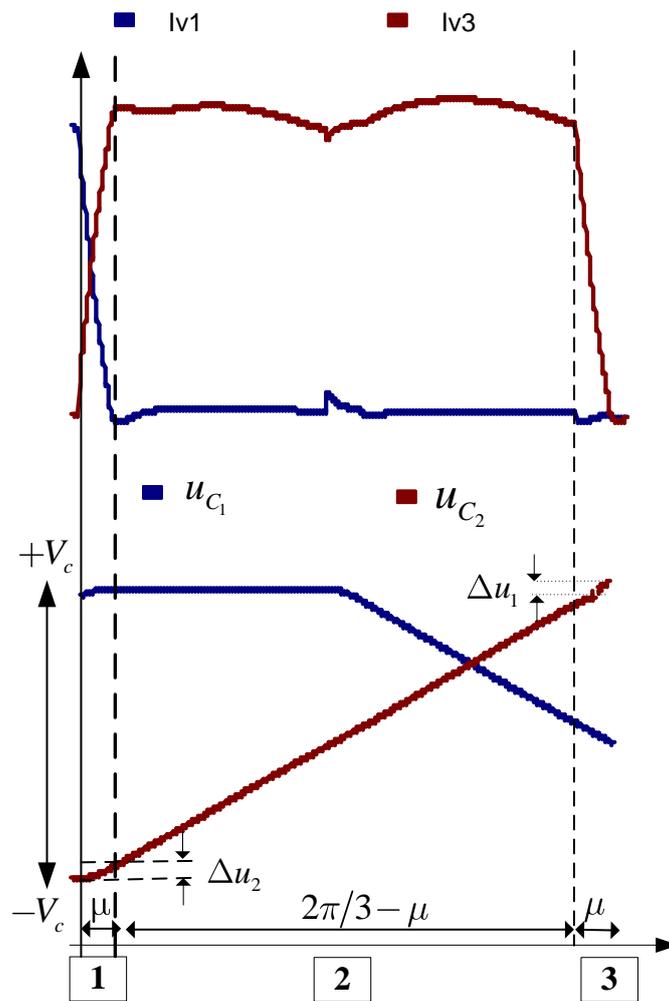


Figura 4. 4 Formas de onda de tensão e corrente.

Por questão de simetria se assume que os capacitores carregam-se desde uma tensão mínima $-V_c$ até um valor máximo $+V_c$.

$$V_{\max} - V_{\min} = 2.V_c = \frac{1}{\omega C} \cdot \left[\int_0^{\mu} (I_d - i) d\theta + \int_{\mu}^{2\pi/3} (I_d) d\theta + \int_{2\pi/3}^{2\pi/3+\mu} (i) d\theta \right] \quad (4.1)$$

Resolvendo-se a integral da equação (4.1) obtemos o valor máximo V_c de tensão no capacitor é obtido:

$$V_c = \frac{\pi Id}{3\omega C} \quad (4.2)$$

Da figura 4.4, observa-se que o capacitor C_2 apresenta duas etapas de carregamento não linear que chamamos de Δu_1 e Δu_2 . Portanto, no início do processo de comutação, quando a válvula v_3 ainda não conduz, o capacitor C_1 está carregado com tensão $u_{C_1(t=0)} = V_c - \Delta u_1$, de igual forma o capacitor C_2 apresenta uma tensão inicial igual à $u_{C_2} \ t = 0 = -V_c$.

De igual forma no instante final da comutação, o capacitor C_1 está com tensão máxima positiva $u_{C_1} \ t = \mu/\omega = V_c$, enquanto o capacitor C_2 se encontra no final do período não linear de carga $u_{C_2(t=\mu/\omega)} = -V_c + \Delta u_2$.

Então se deve achar a relação entre essas variáveis, através da tensão total do capacitor $2V_c$, que aparece durante três períodos de condução da válvula segundo a figura 4.4, tal como segue:

$$V_c - \Delta u_1 = -V_c + \Delta u_2 + \frac{1}{\omega C} \int_{\mu}^{2\pi/3} I_d d\theta \quad (4.3)$$

$$\Delta u_1 = \frac{I_d \mu}{\omega C} - \Delta u_2 \quad (4.4)$$

A soma das tensões no circuito de comutação resulta na seguinte equação:

$$e_b - e_a = L \frac{d(i_{v3})}{dt} + u_{C_2} - \left[L \frac{di_{v1}}{dt} + u_{C_1} \right] \quad (4.5)$$

A expressão $e_{ba} = E.S \sin \omega t + \alpha$ é a tensão no início da comutação e onde E indica a tensão pico fase-fase do lado das válvulas do transformador.

O respectivo sistema laplaciano da equação (4.5) resulta como segue:

$$E \frac{(\omega \cos \alpha + S \sin \alpha)}{(S^2 + \omega^2)} = LS \cdot I_{v3(S)} + \frac{I_{v3(S)}}{SC} + u_{C_2(0)} - LS \cdot I_{v1(S)} - LI - \frac{I_{v1(S)}}{SC} - u_{C_1(0)} \quad (4.6)$$

Calculando o laplaciano da corrente que circula pela válvula 3 $I_{v3(S)}$, obtém-se a seguinte expressão:

$$I_{v3(S)} = \left\{ \begin{array}{l} S^3 \left[\frac{E}{2L} \sin \alpha + \frac{I_d \pi}{3\omega LC} - \frac{\Delta V_1}{2L} \right] \\ + S^2 \left[\frac{E}{2L} \omega \cos \alpha + \frac{I_d}{2LC} \right] + \\ S \left[\frac{I_d \pi}{3LC} - \frac{\Delta V_1 \omega^2}{2L} \right] + \frac{I_d \omega^2}{2LC} \end{array} \right\} / \left\{ S(S^2 + \omega^2)(S^2 + 1/LC) \right\} \quad (4.7)$$

A equação (4.5) expressa em funções parciais, tal como se indica a continuação:

$$I_{v3(S)} = \frac{A}{S} + \frac{(BS + D\omega)}{(S^2 + \omega^2)} + \frac{(ES + F\omega_0)}{(S^2 + \omega_0^2)} \quad (4.8)$$

Onde ω_0 , representa a frequência de oscilação durante o período de comutação, o qual está definido mediante a relação:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.9)$$

Por outro lado, as constantes A, B, D, E e F estão definidas como segue:

$$A = \frac{I_d}{2} \quad (4.10)$$

$$B = \frac{E \cos \alpha}{[2L(\omega_0^2 - \omega^2)]} \quad (4.11)$$

$$D = \frac{-E \omega \sin \alpha}{[2L(\omega_0^2 - \omega^2)]} \quad (4.12)$$

$$E = \frac{-E \omega \cos \alpha}{[2L(\omega_0^2 - \omega^2)]} - \frac{I_d}{2} \quad (4.13)$$

$$F = \frac{E \omega_0 \sin \alpha}{[2L(\omega_0^2 - \omega^2)]} + \frac{I_d \pi \omega_0}{3\omega} - \frac{\Delta u_1}{2L\omega_0} \quad (4.14)$$

A corrente i_{v3} no domínio do tempo é indicada como:

$$i_{v3} = A + B \cos \omega t + D \sin \omega t + E \cos \omega_0 t + F \sin \omega_0 t \quad (4.15)$$

Sabendo que $i_{v1} = I_d - i_{v3}$, resulta o seguinte:

$$i_{v1} = A - B \cos \omega t - D \sin \omega t - E \cos \omega_0 t - F \sin \omega_0 t \quad (4.16)$$

Uma vez calculado a corrente que circula pela válvula 1, pode-se determinar o valor de Δu_1 , tal como se indica a continuação:

$$\Delta u_1 = \frac{1}{\omega C} \int_0^{\mu} i_{v1} d\omega t = \frac{1}{\omega C} \left[\int_0^{\mu} A d\omega t - \int_0^{\mu} B \cos \omega t d\omega t - \int_0^{\mu} D \sin \omega t d\omega t - \int_0^{\mu} E \cos \omega_0 t d\omega t - \int_0^{\mu} F \sin \omega_0 t d\omega t \right] \quad (4.17)$$

Note-se que a constante F apresenta um termo em função da variável Δu_1 , tal como se indica na equação (4.12). Então resulta a seguinte expressão para o cálculo de Δu_1 :

$$(\Delta u_1) = H + \frac{1}{2L\omega_0} \left(\int_0^{\mu} \Delta u_1 d\omega t \right) \quad (4.18)$$

Onde H expressa o cálculo das integrais definidas e que foram resolvidas mediante o software mathematica, tal como se observa a continuação:

$$\begin{aligned}
 H = & \frac{1}{\omega_{Ccc}} \{ \text{Integrate}[A, \{\theta, 0, \mu\}] - \text{Integrate}[B \text{ Cos}[\theta], \{\theta, 0, \mu\}] - \\
 & \text{Integrate}[D \text{ Sin}[\theta], \{\theta, 0, \mu\}] - \text{Integrate}[E \text{ Sin}[\frac{\omega_0}{\omega} \theta], \{\theta, 0, \mu\}] - \\
 & \square \text{Integrate}[\text{((Sqrt}[2]VL\omega_0 \text{Sin}[\alpha]) / (2L(\omega_0^2 - \omega^2)))] \text{Sin}[\frac{\omega_0}{\omega} \theta], \{\theta, 0, \mu\}] - \\
 & \text{Integrate}[\text{((Id}\pi\omega_0) / (3\omega)) \text{Sin}[\frac{\omega_0}{\omega} \theta], \{\theta, 0, \mu\}] \} \quad (4.19)
 \end{aligned}$$

Da equação (4.18), obtém-se a seguinte expressão para a variável Δu_1 :

$$\Delta u_1 = \frac{H}{\left(1 - \frac{\mu}{2L\omega_0}\right)} \quad (4.20)$$

Mediante o mathematica a equação (4.20) resulta como segue:

$$\begin{aligned}
 \Delta u_1 = & \frac{\frac{\text{Id}\mu}{2} + \frac{1}{3}\text{Id}\pi(-1 + \text{Cos}[\frac{\mu\omega_0}{\omega}]) - \frac{\text{Id}\omega(-1 + \text{Cos}[\frac{\mu\omega_0}{\omega}])}{2\omega_0} - \frac{\text{VL}\omega^2(1 - \text{Cos}[\mu])\text{Sin}[\alpha]}{\sqrt{2}(\text{XT}\omega^2 - \text{XT}\omega_0^2)} - \frac{\text{VL}\omega^2(-1 + \text{Cos}[\frac{\mu\omega_0}{\omega}])\text{Sin}[\alpha]}{\sqrt{2}\text{XT}(\omega^2 - \omega_0^2)} - \frac{\text{VL}\omega\text{Cos}[\alpha]\text{Sin}[\mu]}{\sqrt{2}(-\text{XT}\omega^2 + \text{XT}\omega_0^2)} - \frac{\sqrt{2}\text{VL}\omega^3\text{Cos}[\alpha]\text{Sin}[\frac{\mu\omega_0}{2\omega}]^2}{\text{XT}\omega^2\omega_0 - \text{XT}\omega_0^3}}{\text{Ccc}\omega(1 - \frac{\mu\omega}{2\text{XT}\omega_0})}} \quad (4.21)
 \end{aligned}$$

No caso de se ter os seguintes dados do conversor

$$I_d = 3.863 \text{ kA}$$

$$C = 1540 \cdot 10E-6 \text{ uF}$$

$$V_{L-L} = 37.800 \text{ kV}$$

$$f = 60 \text{ HZ}$$

$$S_{\text{Base}} = 400 \text{ MVA}$$

$$\mu = 8^\circ \text{ Graus}$$

$$\alpha = 12^\circ \text{ Graus}$$

Resulta que a variável $\Delta u_1 = 0.85 \text{ kV}$, o qual é um valor coerente.

4. 2.2 Metodologia para Seleção do Capacitor Série

A tensão nas válvulas do CCC, podem se incrementar excessivamente devido à presença de baixos níveis de capacitância na compensação série [10].

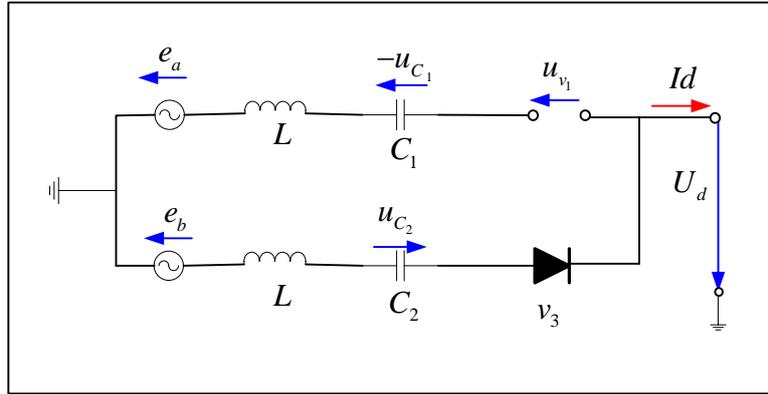


Figura 4. 5 Circuito de Comutação depois que a válvula 1 foi bloqueada.

A figura 4.5 mostra o intervalo onde as válvulas 2 e 3 estão conduzindo, então a válvula v_1 fica submetida a uma tensão reversa, durante o intervalo $\omega t \in \mu, \pi/3$ que pode ser indicada como segue:

$$u_{v1} = e_{ba} + u_{C1} - u_{C2} = E \sin(\omega t + \alpha) + u_{C1} - u_{C2} \quad (4.22)$$

Onde as condições de fronteira para este intervalo são:

$$\omega t = \mu, u_{C1} = \frac{\pi Id}{3\omega C} \quad u_{C2} = -V_c + \Delta u_1 \quad (4.23)$$

$$\omega t = \frac{\pi}{3}, u_{C1} = \frac{\pi Id}{3\omega C} \quad u_{C2} = -\frac{\pi Id}{3\omega C} + \Delta u_1 + \frac{1}{\omega C} \int_{\mu}^{\pi/3} Id d\omega t \quad (4.24)$$

Substituindo-se (4.23) e (4.24) em (4.22), obtém-se as expressões da tensão reversa na válvula para os instantes $\omega t = \mu$ e $\omega t = \pi/3$. Estes valores de tensão são comparados para conhecer a tensão de pico.

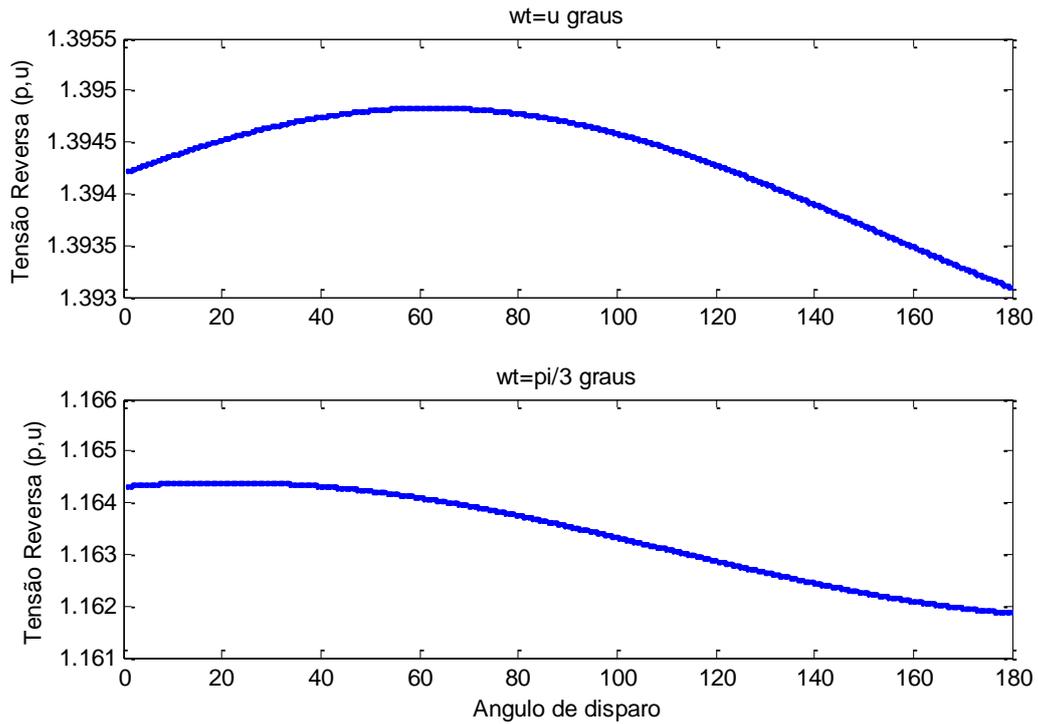


Figura 4. 6 Tensão de pico reversa na válvula.

Na figura 4.6, observa-se que a máxima tensão reversa da válvula ocorre exatamente no instante $\omega t = \mu$, ou seja quando a válvula v_1 deixa de conduzir completamente.

Para um maior detalhamento considerou-se que a compensação série é maior, baixa capacitância do capacitor, observando-se que a tensão reversa que suporta a válvula se incrementa até alcançar o valor de 4.5 p.u. Isto demonstra que se considerarmos uma excessiva compensação teríamos uma sobretensão nas válvulas bloqueadas tal como se observa na figura 4.7.

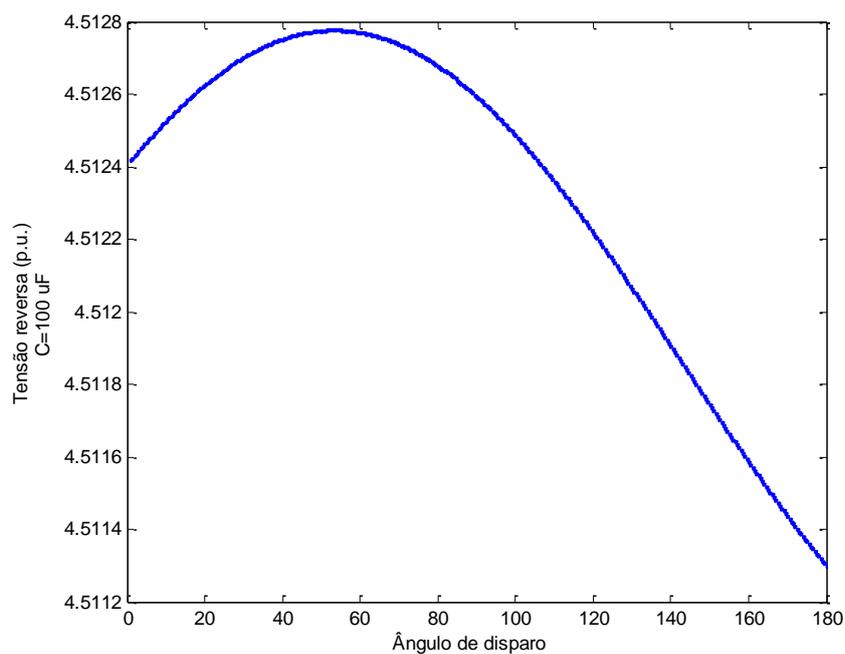


Figura 4. 7 Tensão reversa na válvula com capacitor série de 100 μF .

Utilizando um capacitor comutação cujo valor de capacitância C varia entre 100 μF e 400 μF , a tensão pico reversa atinge o valor de 4.5 p.u e 1.4 p.u respectivamente, tal como se observa na figura 4.8.

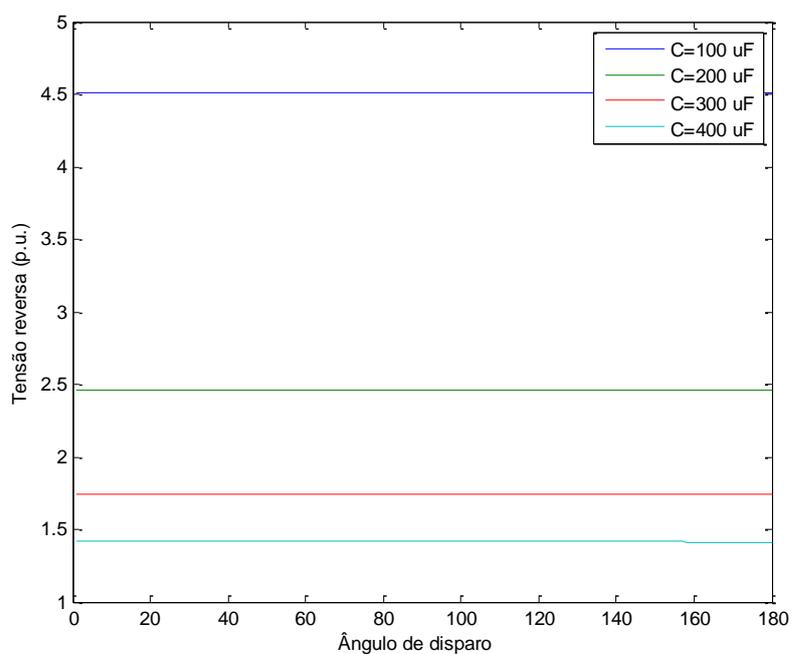


Figura 4. 8 Efeito da capacitância na tensão reversa da válvula.

Desta forma, determina-se que o valor de capacitância ideal é da ordem de $400 \mu F$ de modo de evitar uma sobretensão reversa na válvula. Por outro lado, para maior detalhe do comportamento da tensão reversa u_{v1} , considerou-se que o ângulo de disparo α varia entre $\langle 0, 180^\circ \rangle$.

4. 2.3 Contribuição dos capacitores na tensão CC.

Uma característica importante é a contribuição da tensão dos capacitores série sobre a tensão CC. Para este fim, se calcula a tensão média dos capacitores. Para isso, conforme a figura 4.4 apenas os períodos de tempo 1 a 3 são necessários, o período 4 não dá nenhuma contribuição porque ele aparece duas vezes em cada período de 2π , com alternância de sinal da tensão máxima $-V_c$ e $+V_c$ de forma que se elimina do cálculo.

A tensão de contribuição dos capacitores U_{db} calcula-se da seguinte forma:

$$U_{db} = 2 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2} \int_0^\mu u_{c2} d\omega t + \int_\mu^{2\pi/3} u_{c2} d\omega t + \frac{1}{2} \int_{2\pi/3}^{2\pi/3+\mu} u_{c2} d\omega t \right] \quad (4.25)$$

A tensão CC que aparece durante os períodos 1 e 3 tem que ser multiplicada por $1/2$ porque durante a comutação a tensão do capacitor é distribuída nas duas fases que estão conduzindo. Então a tensão no capacitor da válvula 3 que entra em condução é obtida pelas equações a seguir:

$$\begin{aligned} u_{c_2} &= -V_c + \frac{1}{\omega C} \int_0^\mu i d\omega t \\ u_{c_2} &= -V_c + \Delta u_1 + \frac{1}{\omega C} \int_u^{2\pi/3} Id d\omega t \\ u_{c_2} &= V_c - \Delta u_2 + \frac{1}{\omega C} \int_{2\pi/3}^{2\pi/3+\mu} Id - i d\omega t \end{aligned} \quad (4.26)$$

Substituindo-se (4.17) em (4.16), a tensão CC contribuição dos capacitores-série pode ser expressa segundo a fórmula:

$$U_{db} = \frac{3}{\pi} [(\Delta u_2 - \Delta u_1) \cdot (\pi/3 - \mu/4)] \quad (4.27)$$

Em geral, a contribuição máxima à tensão CC ocorre para ângulos de operação α e γ mínimos no retificador e no inversor, respectivamente. A figura 4.9 mostra a relação U_{db}/U_d , onde U_{db} é a contribuição na tensão pelo capacitor série e U_d relação a tensão U_d a tensão no elo CC, resultando valores pequenos em termos de percentagem o que significa que a contribuição dos capacitores na tensão CC é desprezível.

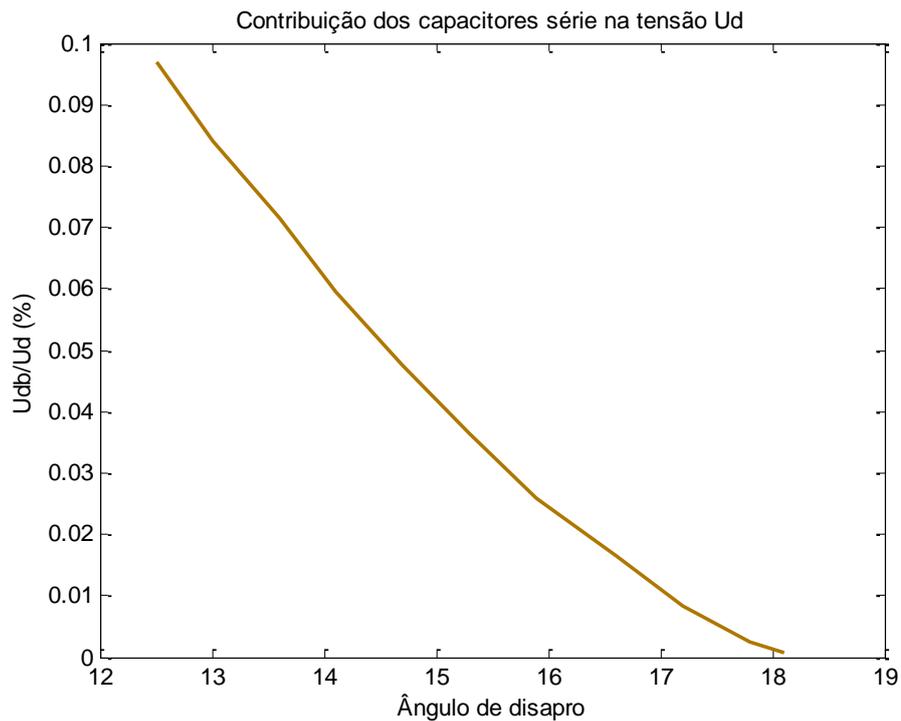


Figura 4. 9 Relação da U_{db}/U_d (%).

4.3 Cálculo do ângulo de comutação μ considerando capacitor série

Neste item, indica-se a proposta para o cálculo do ângulo de comutação (μ) baseada na análise da integral de tensão durante a comutação, para tal fim se define as seguintes relações.

A queda de tensão devido á indutância Δx_l se expressa como segue:

$$\Delta x_l = \frac{3}{\pi} \cdot \omega \cdot L \cdot \frac{I_d}{U_{do}} \quad (4.28)$$

Onde

ω : Frequência Angular

I_d : Corrente contínua no conversor

U_{do} : Tensão CC sem carga ou quando o angulo de disparo $\alpha = 0$

A queda de tensão Δx_c devido ao capacitor série C , se define como:

$$\Delta x_c = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{I_d}{U_{do}} \quad (4.29)$$

Uma forma de calcular o ângulo de comutação (μ), é mediante a análise da integral das tensões do circuito de comutação, obtendo-se a expressão:

$$2LId = \frac{1}{\omega} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} e_b - e_a + u_{cb} - u_{ca} d\omega t \quad (4.30)$$

Observando-se a expressão (4.30) apresenta duas partes. A primeira corresponde a contribuição da rede CA e a outra é função da tensão dos capacitores.

$$\frac{1}{\omega} \int_0^{\mu} (e_b - e_a) d\omega t = \frac{1}{\omega} \frac{\pi}{3} U_{do} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (4.31)$$

Como já se indicou anteriormente a tensão dos capacitores apresenta um carregamento linear quando as correntes que percorrem elas são igual a I_d ($i_1 = Id$ e $i_3 = Id$) e constante $\neq Vc$ quando ditas correntes são nulas.

$$\frac{1}{\omega} \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} u_{cb} - u_{ca} d\omega t = \frac{1}{\omega} \frac{2\pi}{3} \left(1 - \frac{\mu}{2\pi}\right) \mu \frac{Id}{U_{do}} \quad (4.32)$$

Substituindo-se (4.31) e (4.32) em(4.30), a equação transcendental em função do ângulo de comutação é obtida:

$$\frac{3}{\pi} \omega L \frac{Id}{U_{do}} = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] + \frac{\mu}{\omega C} \left(1 - \frac{\mu}{2\pi}\right) \frac{Id}{U_{do}} \quad (4.33)$$

Ordenando-se a equação anterior e multiplicando por U_{do}/Id a ambos lados obtém-se a equação transcendental:

$$\left(\frac{\pi}{6\omega L}\right) \frac{U_{do}}{Id} [\cos \alpha + \cos \alpha + \mu] + \frac{\mu}{6\omega^2 LC} 2\pi - \mu = 1 \quad (4.34)$$

No item anterior se comprovou que a contrubuição do capacitor serie na tensão CC do conversor é desprezível. Logo, a proposta da pesquisa para o cálculo do ângulo de comutação (μ), tem como ponto de partida expresar U_{do} como indicado pela equação seguinte:

$$U_{do} = \frac{2 \cdot U_d}{(\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu))} \quad (4.35)$$

As variações de tensão no lado CA, de igual acarretam variações de tensão no lado CC. Por tanto a equação transcendental em função de μ seria:

$$\frac{\pi}{3\omega L} \frac{Ud}{Id} \left[\frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)}{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)} \right] + \frac{\mu}{6\omega^2 LC} (2\pi - \mu) = 1 \quad (4.36)$$

Para resolver a equação anterior, o termo $\cos(\alpha + \mu)$ é desenvolvido mediante aproximação de quarta ordem da série de Taylor.

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \mu \sin \alpha - \frac{\mu^2}{2!} \cos \alpha + \frac{\mu^3}{3!} \sin \alpha + \frac{\mu^4}{4!} \cos \alpha \quad (4.37)$$

Então a equação (4.36) se reduz a uma equação quadrática com variável μ , conforme indicado a seguir:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{A}{2} \cos \alpha + \frac{B}{6} \sin \alpha - \frac{D}{24} \cos \alpha \right) \mu^4 + \left(C \sin \alpha - \frac{B}{2} \cos \alpha - \frac{D}{6} \sin \alpha \right) \mu^3 + \\ & \left(C \sin \alpha - \frac{B}{2} \cos \alpha - \frac{D}{6} \sin \alpha \right) \mu^2 + (C \sin \alpha + 2B \cos \alpha - 2A \cos \alpha) \mu - \\ & 2 \cos \alpha = 0 \end{aligned} \quad (4.38)$$

Onde as constantes A, B, C e D são definidas como segue:

$$A = \frac{1}{6\omega^2 LC}, \quad B = 2\pi \cdot A, \quad C = \frac{\pi}{3} \frac{Ud}{\omega L Id} \quad \text{e} \quad D = C + 1 \quad (4.39)$$

A seguir, será dado um exemplo de cálculo do o ângulo de comutação μ utilizando a equação proposta anteriormente. Os dados gerais do conversor CCC em modo inversor são indicados na seguinte tabela:

Tabela 4. 1 Dados do CCC para estado estacionário

CCC - Modo Inversor	
Tensão CC	= - 80.676 kV.
Tensão CA do lado Secundário	= 60 kV
Reatância do Transformador (%)	= 18
Ângulo de Disparo	= 169.9 °
Capacitor Serie	= 410 μF

Utilizando o Programa Mathematica, obtém-se o valor das quatro raízes que resolvem a equação.

$$\{ \{ \mu_1 \rightarrow -6.49677 \}, \{ \mu_2 \rightarrow 0.989205 \}, \{ \mu_3 \rightarrow 0.283816 \}, \{ \mu_4 \rightarrow 2.90999 \} \}$$

Uma simples inspeção nas raízes obtidas mostra que a solução correta é a terceira solução $\mu_3 = 0.283816 rad$, que expresso em ângulo sexagesimais dá 16.26 graus. Por outro lado fazendo o calculo da potência consumida pelo conversor:

$$Q = P \cdot \tan \phi \tag{4.40}$$

Sendo $tg \phi$ se define como segue:

$$\tan \phi = \frac{2\mu + \sin 2\alpha - \sin 2\alpha + \mu}{\cos 2\alpha - \cos 2\alpha + \mu} \tag{4.41}$$

Substituindo o valor do ângulo de comutação μ_3 calculado e o ângulo de disparo nominal indicado do inversor indicado na tabela 4.1 resulta:

$$\tan \phi = 0.21142 \tag{4.42}$$

Portanto, a potência reativa Q fornecida a ponte conversora é 54.42 Mvar, que representa 21% da potencia ativa transmitida P , valor muito menor ao 50% da potência nominal, valor típico num sistema de transmissão HVDC convencional.

4.4 Cálculo do margem de ângulo de extinção γ'

A presença do capacitor no circuito de comutação faz com que a tensão de comutação real seja a soma entre a tensão da rede CA e a tensão do capacitor série. Desta forma, aparece uma nova variável chamada de ângulo de extinção real γ' que indica o período de tempo onde a válvula deixa de conduzir, isto é, a tensão negativa ou reversa que suporta a válvula se acrescenta, evitando assim entrar em condução de forma intempestiva.

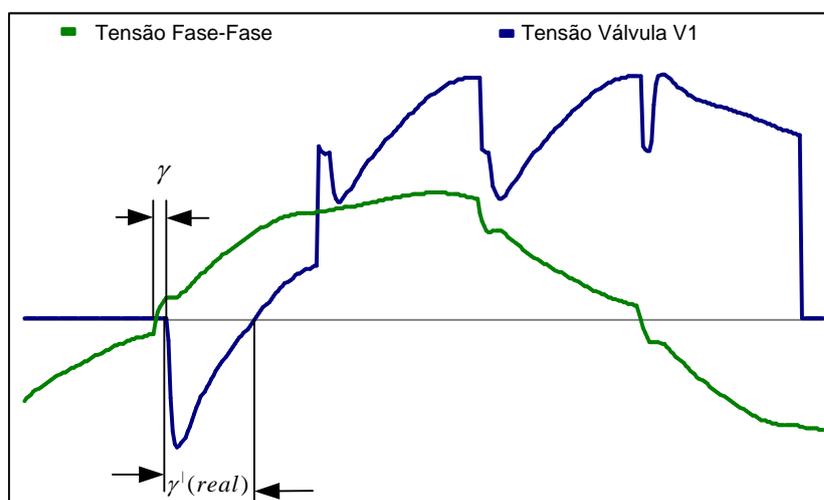


Figura 4.10 Margem de Comutação no CCC inversor.

Para calcular a margem de comutação γ' , utilizamos a equação para calcular a tensão reversa da válvula só que com pequenas variações.

$$u_{v_1} = e_{ba} + u_{C_1} - u_{C_2} = E \cdot \sin(\omega t + \alpha + \mu) + u_{C_1} - u_{C_2} \quad (4.43)$$

A tensão u_{C_1} do capacitor da fase A permanece carregado com tensão $+Vc$, enquanto o capacitor da fase B (u_{C_2}) carrega-se como segue:

$$u_{C_2} = -Vc + \Delta u_1 + \frac{1}{\omega C} \int_0^{\gamma'} Id \, d(\omega t) \quad (4.44)$$

No instante $\omega t = \gamma'$, a válvula conduz novamente, então a tensão $u_{v1} = 0$, finalmente aplicando a relação $\delta = \alpha + \mu$, a equação (4.43) resulta:

$$E \sin(\delta + \gamma') + \frac{2\pi Id}{3\omega C} - \frac{Id \cdot \gamma'}{3\omega C} - \Delta u_1 = 0 \quad (4.45)$$

O termo $\sin(\delta + \gamma')$ pode-se expressar utilizando a expansão da série de Taylor de quarta ordem.

$$\sin(\delta + \gamma') = \sin \delta + \gamma' \cos \delta - \frac{\gamma'^2}{2!} \sin \delta - \frac{\gamma'^3}{3!} \cos \delta + \frac{\gamma'^4}{4!} \sin \delta \quad (4.46)$$

A equação de quarta ordem em função do ângulo de extinção real ou margem de comutação seria uma equação e quarto ordem como se indica a continuação:

$$a_4 \gamma'^4 + a_3 \gamma'^3 + a_2 \gamma'^2 + a_1 \gamma' + a_o = 0 \quad (4.47)$$

Onde

$$a_4 = \frac{E}{24} \sin \delta \quad (4.48)$$

$$a_3 = -\frac{E}{6} \cos \delta \quad (4.49)$$

$$a_2 = -\frac{E}{2} \sin \delta \quad (4.50)$$

$$a_1 = E \cos \delta - \frac{Id}{\omega C} \quad (4.51)$$

$$a_o = E \sin \delta + \frac{2\pi Id}{3\omega C} - \Delta u_1 \quad (4.52)$$

Resolvendo no software Mathematica podemos calcular a margem de comutação γ' .

$$\text{Solve}[(a4) * \gamma^4 + (a3) * \gamma^3 + (a2) * \gamma^2 + (a1) * \gamma + (a0) == 0, \gamma]$$

$$\gamma_1 \rightarrow -7.3713, \quad \gamma_2 \rightarrow 0.449117, \quad \gamma_3 \rightarrow 8.5898, \quad \gamma_4 \rightarrow 30.4464$$

Das quatro raízes solução para a margem de comutação, se escolheu como resultado a segunda raiz γ_2 que expresso em graus é $25,73^\circ$. Este valor representa o período no qual a válvula v_1 se mantém bloqueada, sem risco de ocorrer falha de comutação.

4.5 Redução do Margem de Comutação γ'

Com a inserção do capacitor de comutação entre o transformador conversor e as válvulas, consegue-se incrementar a tensão inversa nas válvulas tiristores para impedir que voltassem a conduzir inesperadamente, acarretando uma falha de comutação no conversor.

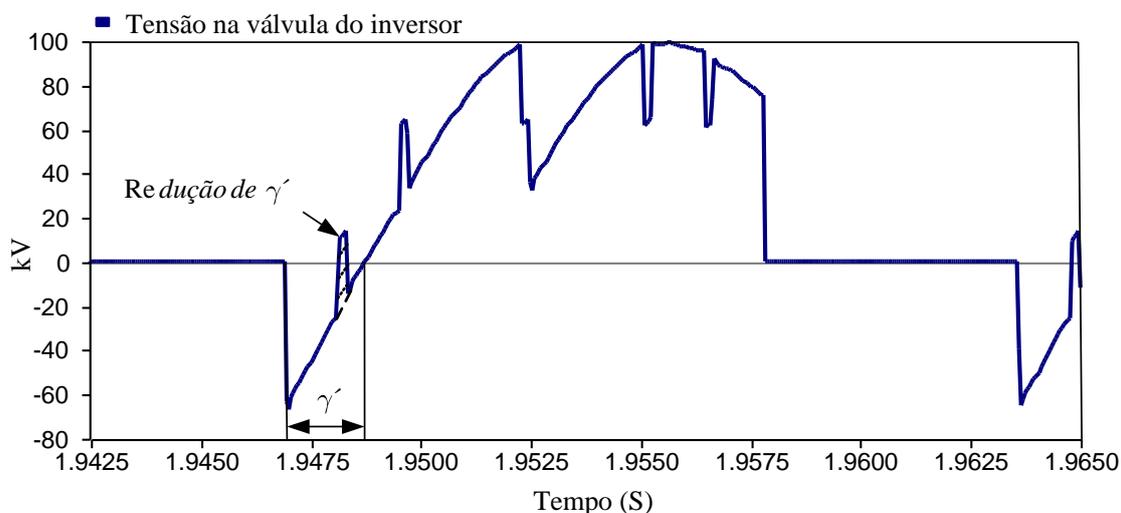


Figura 4.11 Redução do Margem de Comutação γ' .

No caso do conversor com capacitor de comutação CCC de 12 pulsos, a tensão inversa incrementou, mas a margem de comutação γ' apresenta uma redução tal como se observa na figura 4.11. Isso se deve a interação que existe entre os dois conversores de 6 pulsos em série, ou seja, a comutação do conversor conectado do lado delta Δ interage no conversor conectado no lado estrela Y do transformador [12].

A pesquisa realizada mostra que quando é realizada uma adequada distribuição da reatância do transformador de três enrolamentos que conecta a ponte com a rede CA é possível superar este problema de forma permanente.

Cabe indicar que um transformador trifásico de três enrolamentos pode ter capacidade ou potência (MVA) diferente para cada enrolamento. A seguir, na figura 4.12 mostra-se a configuração do transformador de três enrolamentos referidos como primário, secundário e terciário. [13].

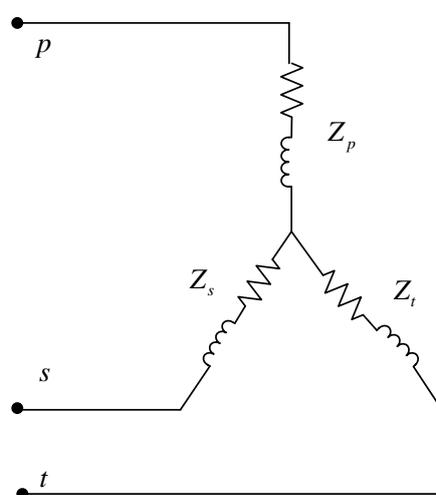


Figura 4. 12 Circuito Equivalente do transformador trifásico de 3 enrolamentos.

Estas impedâncias podem ser calculadas mediante as provas de curto-circuito, resultando:

- Z_{ps} Impedância de dispersão medida no primário, com o secundário em curto-circuito e terciário em circuito aberto.

- Z_{pt} Impedância de dispersão medida no primário, com o terciário em curto-circuito e secundário em circuito aberto.
- Z_{st} Impedância de dispersão medida no secundário, com o terciário em curto-circuito e primário em circuito aberto.

Se estas medições Z_{ps} , Z_{pt} e Z_{st} estão referidas à tensão de um dos enrolamentos do transformador e as impedâncias próprias de cada enrolamento também são referidas a essa mesma tensão base. Então, existe uma relação entre estas impedâncias que é como segue:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s \quad (4.53)$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_t \quad (4.54)$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_t \quad (4.55)$$

Portanto, a solução encontrada para evitar a redução da margem de comutação γ' seria que a impedância Z_{st} seja a soma das impedâncias Z_{ps} e Z_{pt} .

$$Z_{st} = Z_{ps} + Z_{pt} \quad (4.56)$$

Desta forma, nas simulações realizadas no software EMTDC/PSCAD é possível eliminar ou reduzir drasticamente a reatância do enrolamento primário Z_p , o qual seria a reatância comum entre as pontes de 6 pulsos ao secundário e terciário do transformador. Então, a margem de comutação γ' resulta como se observa na figura 4.13.

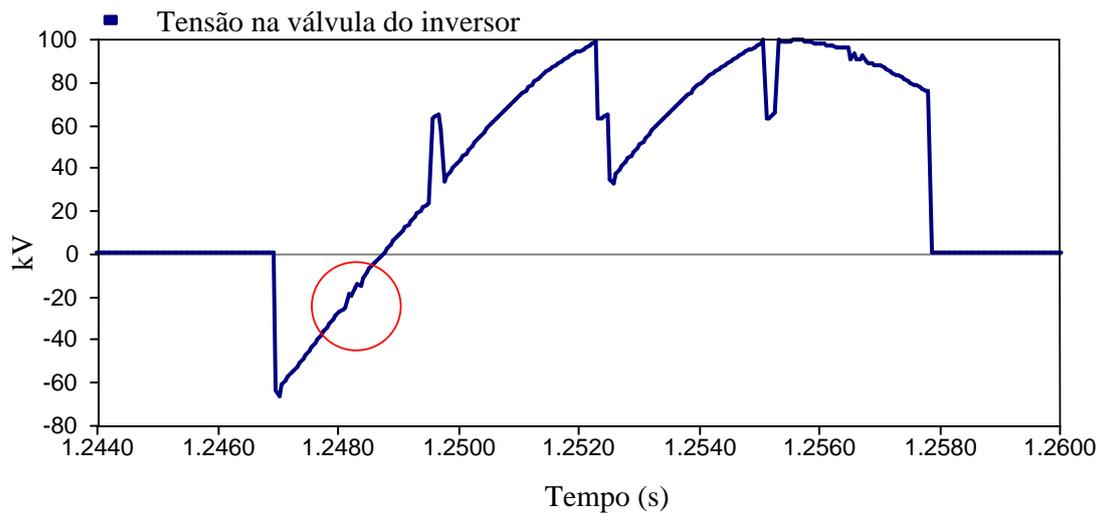


Figura 4.13 Tensão na válvula sem redução da margem de comutação γ' .

Capítulo V
Estudo de Casos de Aplicação de
CCC-HVDC

5. 1. Introdução

Neste capítulo, mostra-se as características básicas da operação de um sistema de transmissão CC e posteriormente os dados do sistema *back to back CCC* implementado para análise na pesquisa com a finalidade de comprovar as vantagens que apresenta em relação ao sistema CC convencional, é dizer , sem capacitor de comutação.

5. 2. Característica Básica de Operação

Na transmissão em CC, a corrente na linha depende da diferença de tensões entre os conversores retificador e inversor, como se observa na figura 5.1.

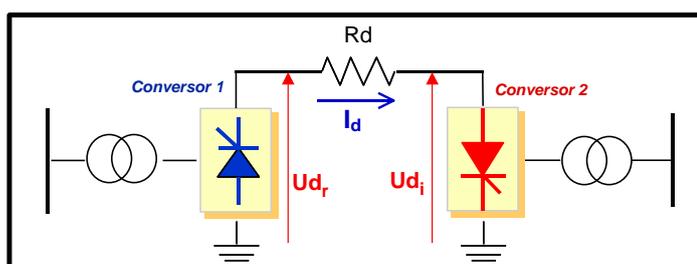


Figura 5. 1 Esquema Básico.

As tensões CC dos conversores dependem da tensão da rede CA, reatância do transformador, posição dos tapes e dos ângulos de disparo α e de extinção γ para cada conversor. A seguir indicam as equações básicas das tensões CC no retificador e no inversor são:

$$\text{Retificador: } U_{dr} = U_{do} \cdot \cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} X_c \cdot I_d \quad (5.1)$$

$$\text{Inversor: } U_{di} = U_{do} \cdot \cos(\gamma) - \frac{3}{\pi} X_c \cdot I_d \quad (5.2)$$

As tensões U_{dr} e U_{di} indicadas na figura 5.1 são quase iguais devido ao pequeno valor resistivo do elo CC Rd . Por outro lado, a corrente I_d pode ser controlada atuando sobre estas tensões, por exemplo, modificando os ângulos de disparo ou de extinção se consegue alterar a tensão CC e consequentemente a corrente I_d . Estes conceitos constituem os fundamentos básicos da estratégia de controle num sistema de transmissão em corrente contínua.

No lado retificador é realizada a função de controlar a corrente I_d mantendo-a igual a uma corrente de ordem I_{ord} . Este controle é de ação rápida atuando sobre o ângulo de disparo α do retificador. Existe também o controle de mudança de tapes, cuja finalidade é manter o ângulo α dentro da faixa de operação, obviamente este é um controle de ação lenta que atua sobre a tensão CA do lado retificador. De igual forma, o inversor têm a função de controlar a tensão CC do elo mediante o controle de ação rápida sobre o ângulo de extinção γ . A mudança dos tapes neste lado é realizado para manter a tensão U_d no valor nominal, sendo de ação lenta e atua sobre a tensão CA do lado inversor.

A característica estática do retificador se representa por uma reta vertical que seria o lugar geométrico dos pontos de operação a corrente constante. De igual forma, a característica estática do inversor se define ao fixarmos o ângulo de extinção γ e a tensão da rede CA nos seus valores nominais. Com estas características se define o ponto de operação do sistema CC, tal como se observa figura 5.2.

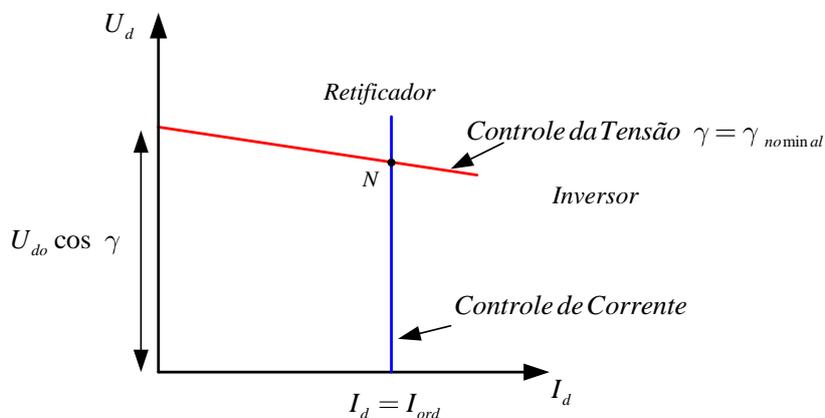


Figura 5. 2 Característica Estática de Operação U_d - I_d .

Observa-se, na figura 5.2 que o retificador está referido ao valor de corrente I_{ord} que também poderia ser indicada em função da potência ativa. Por outro lado, o inversor está referido ao valor de tensão $U_{do} \cos \gamma$, sendo γ constante, apresenta uma dependência do valor da tensão CA do lado inversor.

Na operação normal do elo CC, o ângulo de disparo α do retificador e o ângulo de extinção (γ) do inversor são determinados no menor valor possível, desta forma obtém-se valores máximos na tensão CC. Por tanto, se o inversor opera com ângulo de extinção pequenos se reduz o consumo de potência reativa do lado CA dos conversores.

A característica estática do retificador quando perde a capacidade de controlar a corrente I_d ocorre para um ângulo de disparo α no valor mínimo α_{min} , conforme mostrado na figura 5.3. Por tanto, quando o ângulo α atinge α_{min} o controle fica nesse limite impedindo disparos para $\alpha < \alpha_{min}$.

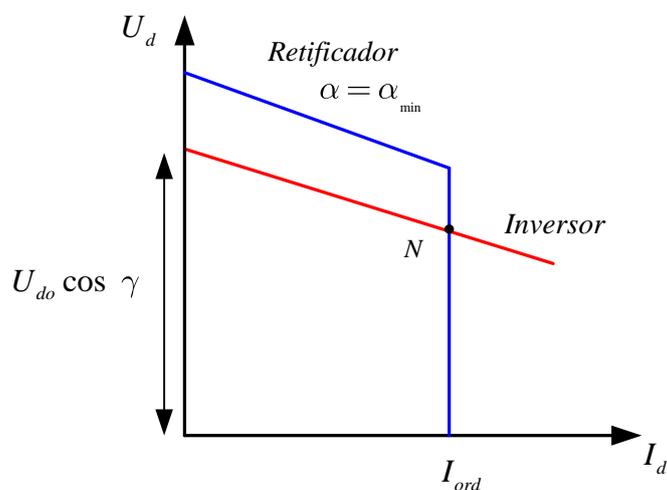


Figura 5. 3 Característica Estática de Operação U_d - I_d para α_{min} .

Caso ocorra uma queda de tensão CA do lado retificador, pode-se perder o ponto de intersecção entre as curvas de característica estática dos conversores. Portanto, a corrente I_d cai para zero e também a transmissão de potência, tal como se observa na figura 5.4.

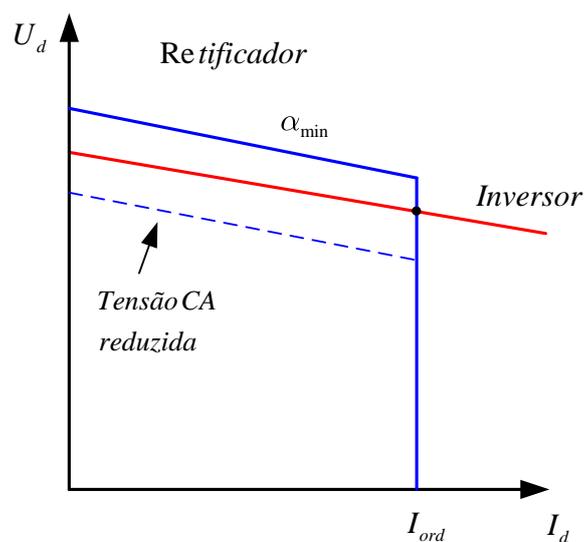


Figura 5. 4 Característica Estática U_d - I_d para uma redução na tensão CA do retificador

Devido a este problema, no lado inversor instala-se um controlador de corrente que atua unicamente para quedas drásticas da tensão CA do retificador. A regulação de corrente I_d é realizado para o valor de referência $I_{ord} - \Delta I_d$, onde ΔI_d é chamado de margem de corrente, geralmente igual ao 10% da corrente nominal, tal como se indica na figura 5.5.

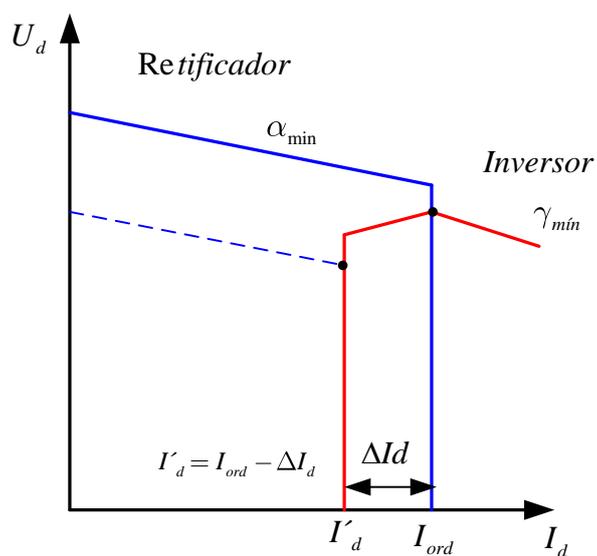


Figura 5. 5 Característica estática U_d - I_d do retificador e inversor com queda da tensão CA do retificador.

A característica estática U_d-I_d do retificador é inversor é útil para análise de regime estacionário do elo CC. Mostram-se todos os pontos possíveis para a operação do sistema. A sua formulação esta baseada na aplicação das equações características dos conversores, considerando a resistência da linha Rd com controle de corrente no retificador e da tensão no inversor. Nota-se, que no caso o conversor ter um capacitor de comutação, para correntes maiores a nominal consegue-se melhorar o perfil de tensão do elo CC.

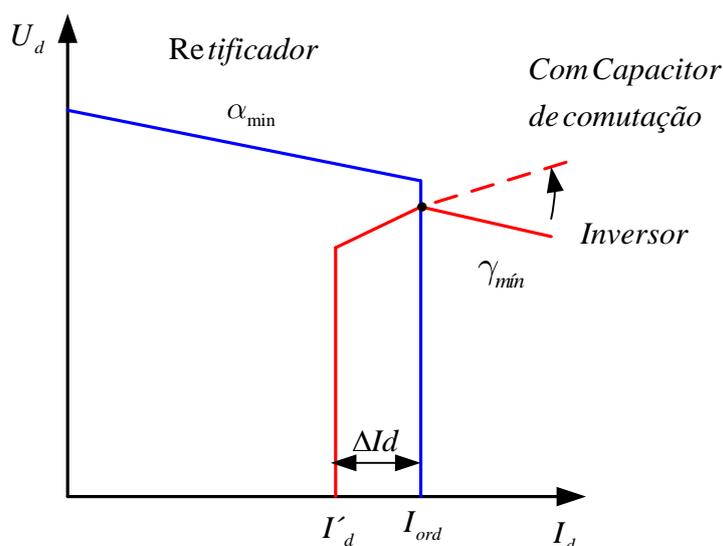


Figura 5. 6 Característica estática U_d-I_d com controle de corrente no retificador.

O retificador realiza o controle da corrente no elo, através de um sistema de controle de corrente em malha fechada, onde a corrente de linha é comparada com uma referência, que seria a corrente de ordem, no instante que houver uma diferença, o erro de corrente obtido será amplificado e agirá como excitação para o controle do ângulo de disparo α , de maneira que a tensão da ponte retificadora atinja o valor necessário para manter a corrente desejada.

Lembrando que quando o angulo de disparo α do retificador atinja seu limite α_{min} , a tensão CC deve-se incrementar ainda mais, para manter a corrente I_d constante. Como isto não é possível, a corrente diminuirá abaixo da corrente de ordem do inversor, em consequência o controle inversor atua sobre o ângulo de

extinção γ incrementando-o, reduzindo desta forma a tensão no elo CC, para atingir a nova corrente desejada.

Em condições anormais ou transitórias o terminal inversor é quem controla a corrente I_d mantendo-o constante e igual a $I_d - \Delta I_d$ através da variação do ângulo γ , tal como se indica na figura 5.7.

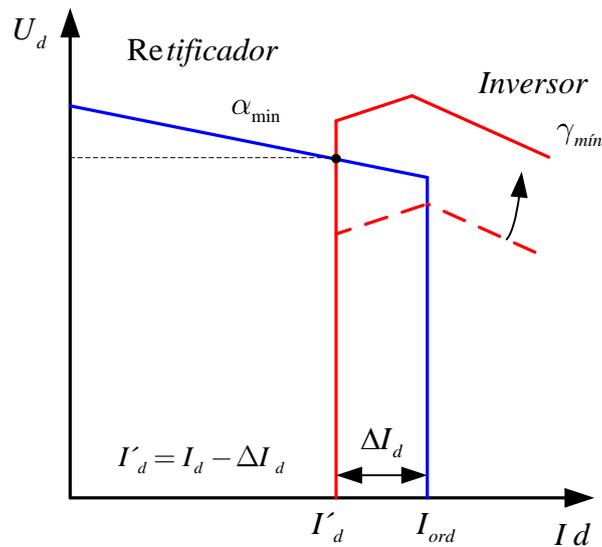


Figura 5. 7. Característica Estática U_d-I_d com controle de corrente no inversor.

As características estáticas de um sistema controle real esta representado basicamente na figura 5.8.

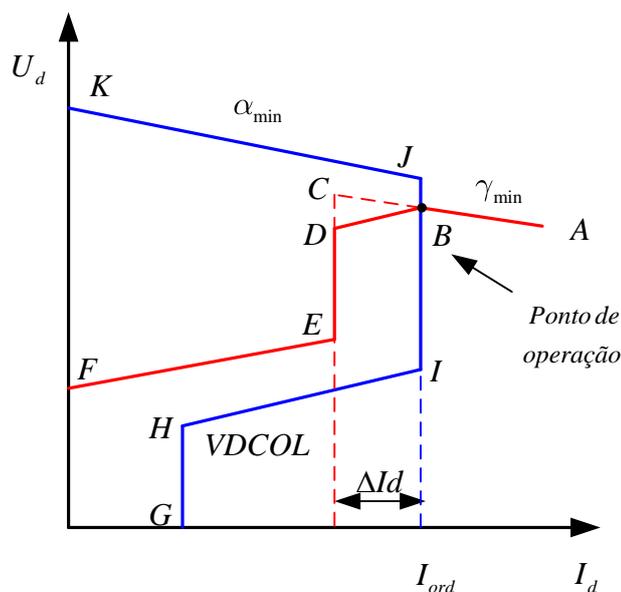


Figura 5. 8 Curva estática do sistema de controle.

Cada segmento da característica estática de controle é consequência da ação de um determinado elemento de controle pré-definido para certa faixa de operação. Por exemplo a interseção entre os segmentos BF e JBI determinam o ponto normal de operação, no qual o controle de corrente é assumido pelo retificador. De igual forma, no modo de operação de tensão reduzida se representa pela interseção dos segmentos HG e KJ . Isto ocorre quando o ângulo α atinge seu valor mínimo KJ . Nesta condição o inversor passa a controlar a corrente do elo CC.

O elemento de control VDCOL (*Voltage Dependent Current Order Limiter*) presente na figura 5.8, é um limitador da corrente I_d . Altera reduzindo a corrente de referência I_{ord} quando houver redução na tensão CC, evitando o colapso de tensão da rede CA.

5.3. Dados do modelo do B2B-CCC

As características do modelo utilizado nas simulações para avaliar o comportamento do conversor comutado por capacitor, cuja configuração é do tipo bipolo com conversor de 12 pulsos (configuração série de dois conversores de 6 pulsos) é mostrada a seguir.

5.3.1 Dados da Rede CA das Estações Conversoras

Características da Rede CA dos Conversores	
Tensão nominal	500 kV
Nível Max. de Tensão em operação normal	550 kV
Nível Min. de Tensão em operação normal	475 kV
Frequência Máxima (operação normal)	60+/- 0.5 Hz
Frecuencia Máxima (operação transitória)	60+6 Hz/-4 Hz

5.3.2 Dados do Transformador Conversor

O transformador conversor trifásico de três enrolamentos conectados em ligação Y/Y e Y/Δ com as válvulas conversores, suas características se expressam por fase como se indica continuação:

	LadoCA (Ret. e Inv.)	Lado Válvula Y	Lado Válvula Δ
Potência por fase	580 MVA	290 MVA	290 MVA
Tensão Nominal	500 kV	51.83 kV	51.83 kV
Reatância %	0.5 %	14.5 %	14.5 %

A faixa de variação dos tapes para os transformadores conversores varia de +11/-11 com degrau de tensão de 1.25% para cada tape.

5.2.3 Capacitor de Comutação

Ratio do Capacitor de Comutação	Retificador	Inversor
Potência Reativa (Ponte 6p)	150 Mvar	150 Mvar
Capacitância (μF)	850 μF	450 μF

5.2.4 Estação Conversora

A seguir as características nominais da tensão e corrente do conversor de 6 pulsos.

Dados do Conversor	Retificador	Inversor
Potência nominal	550 MW	550 MW
Tensão Nominal	+/- 70 kV	+/- 70 kV
Máximo tensão CC	+/- 71.2 kV	+/- 71.2 kV
Mínima tensão CC	+/- 36.2 kV	+/- 36.2 kV
Corrente nominal	3930 A	3930 A

5.3.5 Calculo dos Filtros da Rede CA

Nas estações conversoras se instalam filtros na barra do lado CA, cujo objetivo é eliminar os harmônicos característicos gerados pelo conversor em condições nominais de operação. Portanto, se considera filtros sintonizados para uma única frequência, do tipo passabaixa (BP-bandpass) que é necessário para eliminar os componentes harmônicos característicos da ordem 11^a, 13^a, 23^a e 25^a. Assim mesmo, outro filtro do tipo passa alta (HP-highpass) sintonizado com frequência de corte no harmônico 36th, desta forma se consegue filtrar harmônicos de ordem superior.

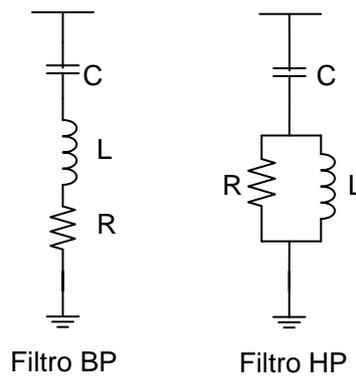


Figura 5. 9 Topologia dos filtros passa-baixa e passa alta.

A topologia dos filtros referidos se observa na figura 5.5, onde o tamanho ou capacitância C é definido fundamentalmente pela potência reativa que fornecerá o filtro na frequência fundamental. Por outro lado, a qualidade do filtro é uma medida que caracteriza a correta sintonização do mesmo. Entende-se, então que a indutância L conectado em serie com a capacitancia C , determina o caminho de baixa impedância, na frequência de ressonância ω_r , eliminado assim a componente harmônica. Finalmente a resistência R seria a qual define o fator de qualidade do filtro. A continuação, indicam-se as equações necessarias para calcular os parametros indicados.

$$C = \frac{Q}{V_{fase} \cdot \omega_f}, L = \frac{1}{\omega_r^2 \cdot C} \text{ e } R = \frac{\omega_r \cdot L}{F_Q} \quad (5.3)$$

$$R = \omega_r \cdot L \cdot F_Q \text{ no caso do filtro passa alta (HP)}$$

Onde

Q : Potência Reativa por fase do filtro.

ω_f : Frequência fundamental.

ω_r : Frequência de ressonância.

F_Q : Fator de qualidade.

Para nosso sistema temos quatro filtros passa-baixa (11th, 13th, 23th, 25th) com 18.75 Mvar de potência reativa e com fator de qualidade de 1800 por cada, de igual maneira um filtro passa-alta (36th) com capacidade de 25 Mvar e fator de qualidade igual a 100. Então a potencia reativa total dos filtros Q_{filtro} conectados na rede CA é como segue:

$$Q_{filtro} = 3.4.BP + HP = 100M \text{ var} \quad (5.4)$$

Cabe ressaltar que não se considerar nenhum tipo de capacitor shunt além dos filtros.

Monstra-se a continuação os valores dos parametros por fase R, L e C que conforma os diversos filtros projetados.

Tabela 5. 1 Parâmetros R, L e C por fase dos filtros CA

Parâmetros	Filtro BP				Filtro HP
	11th	13th	23th	25th	36th
R (Ohms)	0.673	0.570	0.322	0.296	27777.8
L (H)	0.2923	0.2093	0.0669	0.0566	0.0205
C(uF)	0.1989	0.1989	0.1989	0.1989	0.2653

Na figura 5.10 verifica-se que os filtros passa-baixa ou de sintonia simples estão corretamente sintonizadas para às frequências harmônicas de 11^a, 13^a, 23^a e 25^a.

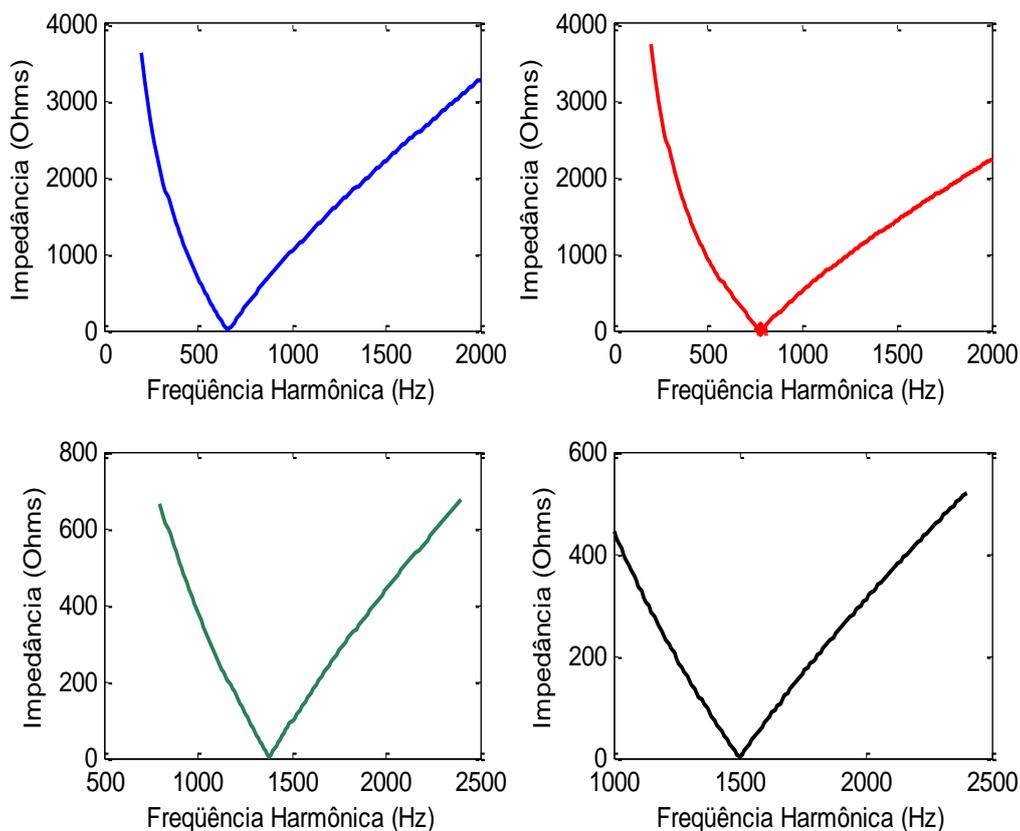


Figura 5. 10 Impedância dos filtros passa-baixa VS. Frequência harmônica.

Por último, da figura 5.11 verifica-se também que o filtro passa-alta está corretamente sintonizado para às frequência harmônica de ordem 36^a.

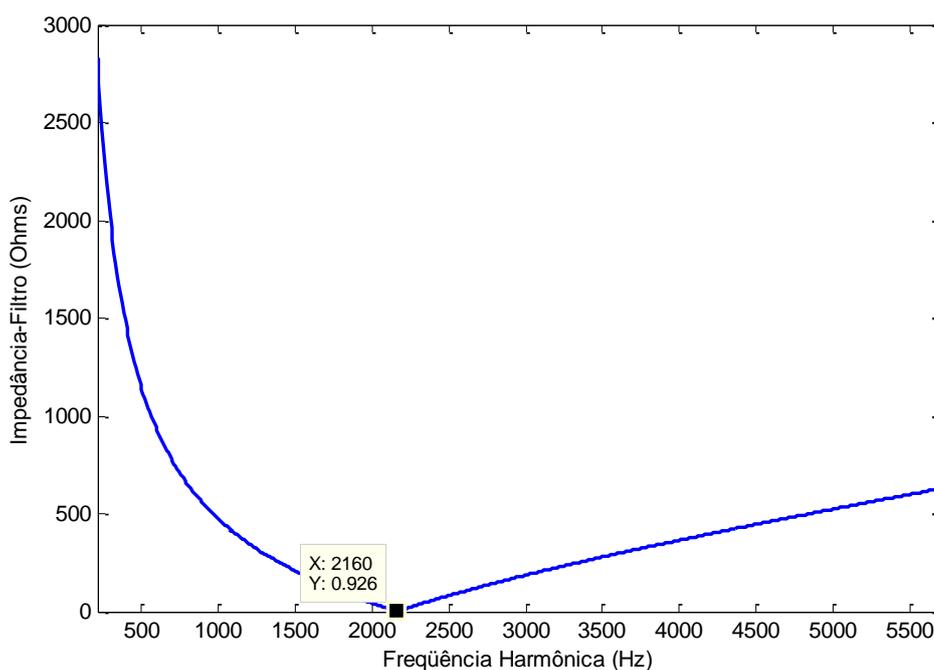


Figura 5. 11 Impedância do filtro passa alta vs. Freqüência harmônica.

5.2.6 Fluxo de Potência

Os resultados do fluxo de potência do sistema CCC analisado está sumarizado na tabela abaixo.

Tabela 5. 2 Resultados de fluxo de potencia no sistema CCC.

	Ângulo de Disparo α °	Tensão CC (p.u)	Tape	μ °	I_d (p.u)	P_d (p.u)	V_{CA} (p.u)
Retificador	7.0	1.00	0.9875	10.8	1.001	550	1.02
Inversor	168	0.999	1.025	6.48	1.0	544	0.9960

Da tabela 5.2 observa-se que os ângulos de disparo α do retificador e inversor dificilmente se conseguiriam no sistema convencional de transmissão CC, como por exemplo, o angulo α do inversor está operando em 168°.

Para efeitos comparativos mostram-se na tabela 5.3 os resultados do fluxo de potência caso base do sistema sem capacitor de comutação, ou seja, de um B2B convencional.

Tabela 5. 3 Resultados de fluxo de potencia no sistema convencional.

	Ângulo de Disparo α°	Tensão CC (p.u)	Tape	μ°	I_d (p.u)	P_d (p.u)	V_{CA} (p.u)
Retificador	20°	0.9470	0.950	13°	1.0	518	1.005
Inversor	152°	0.9407	0.9875	13°	1.0	518	1.003

Por outro lado, a capacidade de transmitir a máxima potência

Na figura 5.12, mostra-se a capacidade de máxima transferência de potência para os sistemas HVDC e CCC-HVDC. Observa-se que no caso do sistema CCC-HVDC, com capacitor de comutação, apresenta melhor regulação da tensão CC na transmissão de potência.

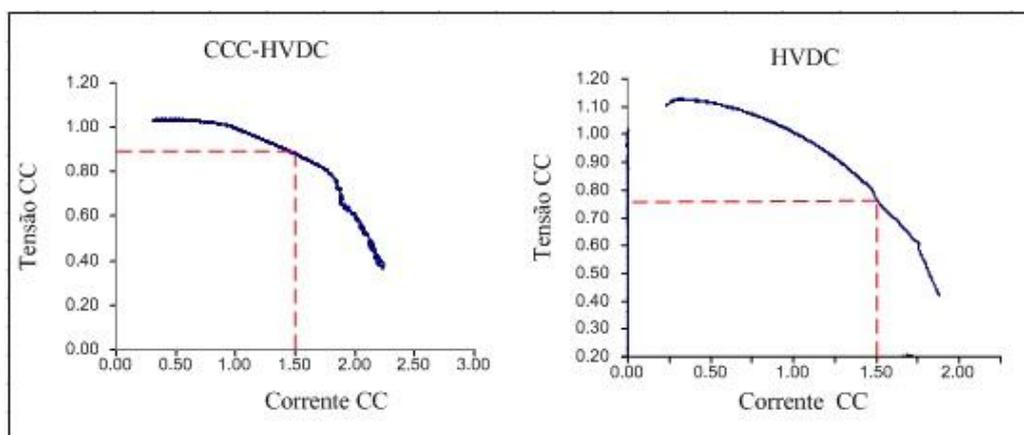


Figura 5. 12 Máxima Transferência de Potência no CCC-HVDC e HVDC.

5. 3. Simulações

As simulações foram feitas num sistema de interligação *Back to Back*, com capacitor de comutação CCC, cuja capacidade nominal de transmissão é de 550 MW, a rede CA as quais se conecta apresentam uma relação de curto-circuito de 2.5.

O modelo CCC-HVDC em estudo esta baseado no Cigre Benchmark HVDC (Pscad-EMTDC), se incorporando o capacitor de comutação e respectivas modificações nos filtros, tal como se observa na figura 5.13.

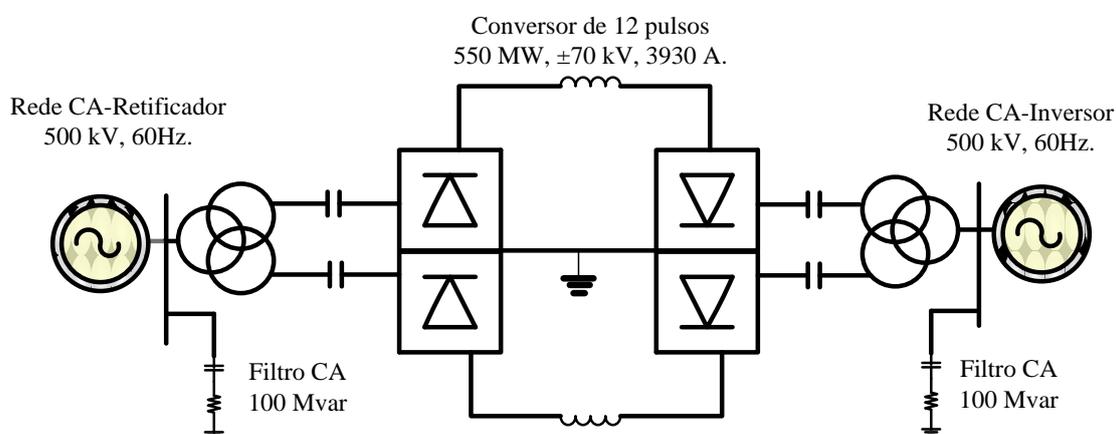


Figura 5. 13 Esquema Básico do CCC-HVDC em estudo.

O B2B deve de cumprir com os seguintes requisitos de desempenho e recuperação [22]:

- Tempo de recuperação após eliminação da falta da rede CA de 200 ms, ou seja, o sistema CC deve atingir 90% do valor da potência transmitida antes da falta.
- A tensão mínima consequência da falta na rede CA, na primeira oscilação após remover a falha, deve ser de 0.80 p.u.

5.3.1 Falha Monofásica a terra no lado CA do Inversor.

Neste item analisa-se o desempenho do conversor comutado por capacitor frente de um distúrbio assimétrico, considera-se que a relação SCR do inversor é igual a 2.5. Cabe indicar que este tipo de falha é considerado severo em termos de falha de comutação.

A seguir são mostrados os resultados das principais variáveis de operação do sistema em análise:

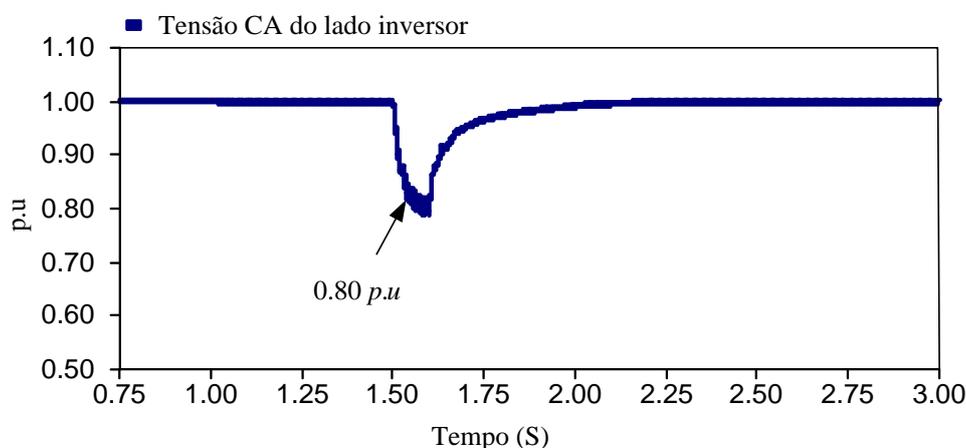


Figura 5. 14 Queda de tensão de 20% no lado CA inversor.

A falta monofásica simulada origina uma queda de tensão de 20% no lado CA do inversor tal como se observa na figura 5.14, o tempo de duração da falha é de 100 ms.

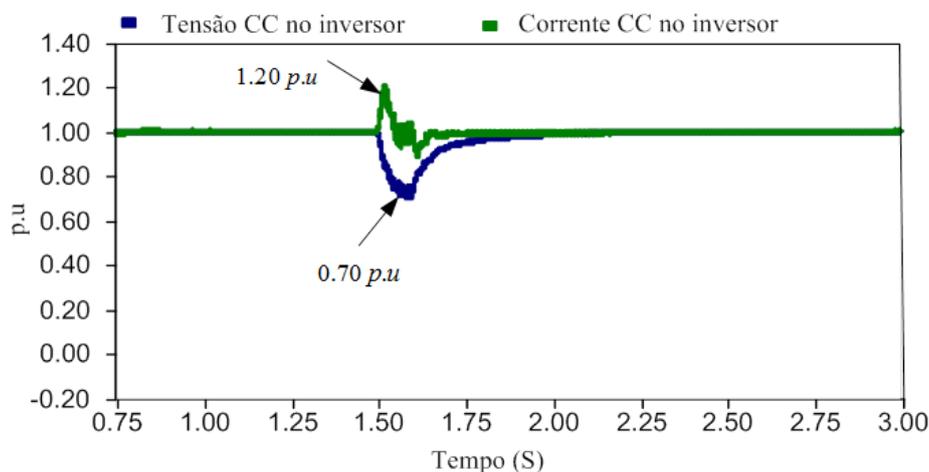


Figura 5. 15 Corrente e tensão CC medido no inversor.

Na figura 5.15, observa-se que durante a falta, o valor da corrente CC medida no inversor atingiu o valor máximo de 1.2 p.u, enquanto a tensão CC diminuiu para 0.70 p.u.

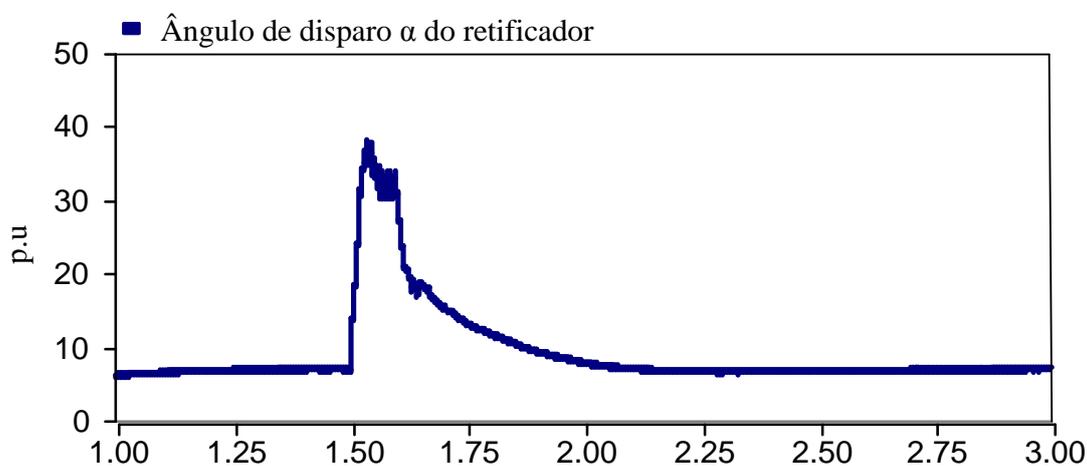


Figura 5. 16 Ângulo de disparo α do retificador.

O ângulo de disparo α retificador alcançou o valor de 36° durante a falta, tal como se observa na figura 5.16.

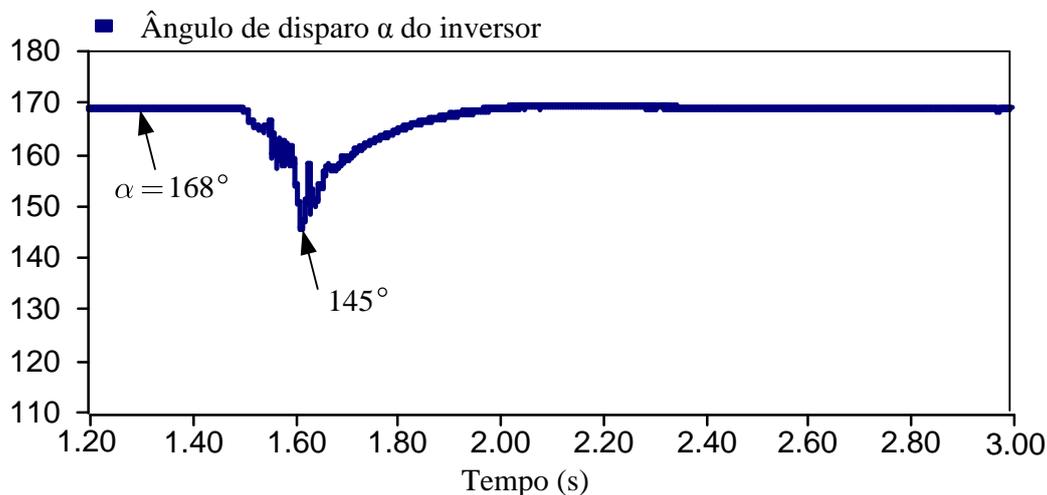


Figura 5. 17 Ângulo de disparo α do inversor.

O ângulo de disparo α do inversor está operando no valor de 168° e durante a falta diminuiu para 145° , conforme mostrado na figura 5.17.

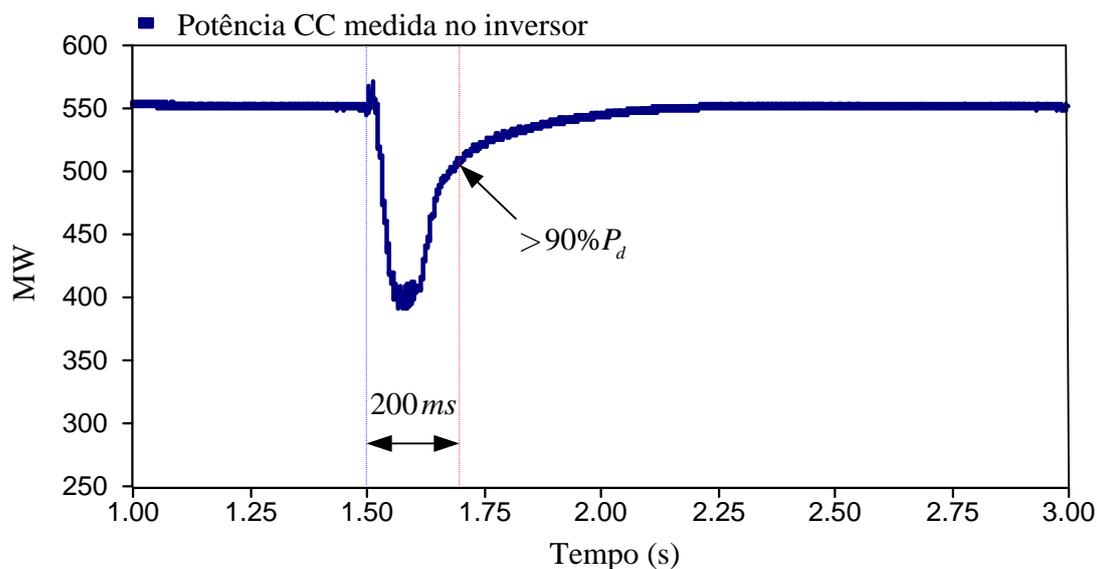


Figura 5.18 Potência CC medido no inversor.

Na figura 5.18 observa-se que a recuperação da potência CC após distúrbio ultrapassa o valor de 90% da potência transmitida $507MW$ pré-falta em menos de 200 ms. Portanto, a operação do sistema com capacitor de comutação CCC-HVDC cumpre satisfatoriamente os requisitos de operação estabelecidos.

5.3.2 Falha Monofásica a terra no lado CA Inversor do B2B convencional

Neste item analisa-se o caso do conversor B2B convencional frente a um distúrbio assimétrico, que como já se indicou seria o mais severo em termos de falha de comutação. Desta forma pode-se estabelecer uma comparação da performance respeito do conversor CCC analisado anteriormente. Considera-se a relação SCR igual a 2.5 no lado CA do inversor.

A seguir são mostrados os resultados das principais variáveis de operação do sistema B2B convencional em estudo:

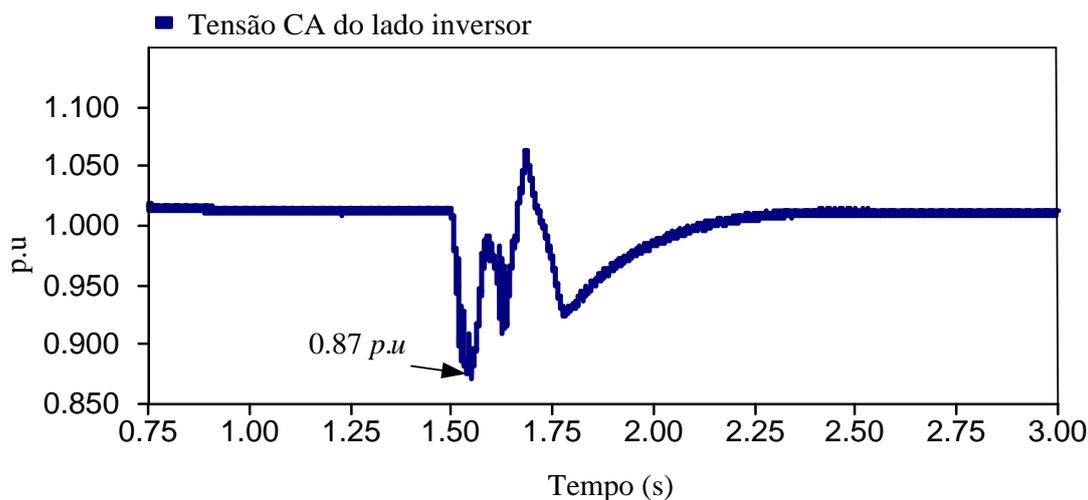


Figura 5. 19 Queda de tensão de 13% no lado CA inversor.

A falta monofásica simulada ocorre no instante $t=1.50$ ms a qual origina uma queda de tensão no lado CA atingindo o valor de 0.87 p.u, tal como se observa na figura 5.19. O tempo de duração da falta é de 100 ms, após liberação da falha ocorre falhas de comutação no conversor razão pela qual a tensão CA demora acima de 200 ms para se recuperar satisfatoriamente.

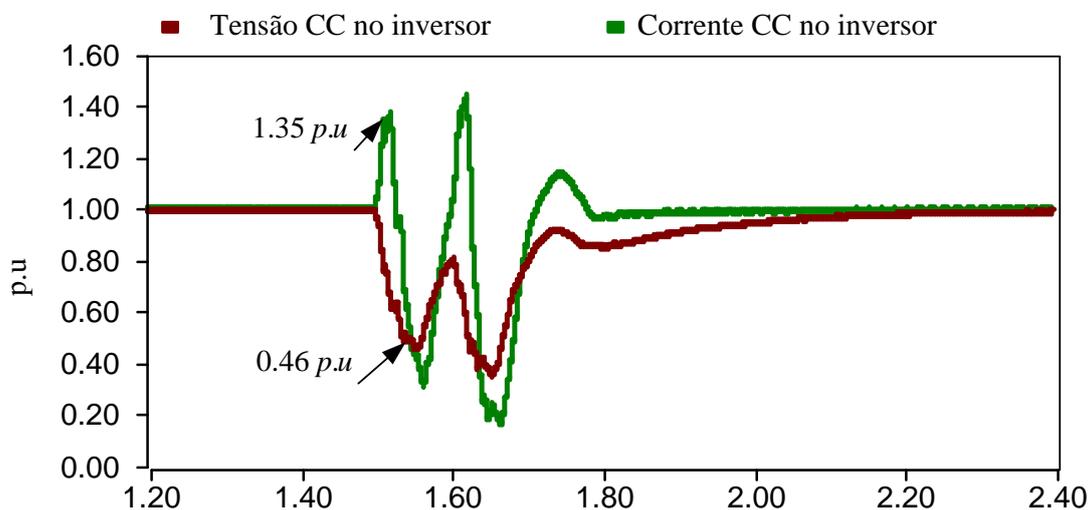


Figura 5. 20 Corrente e tensão CC medido no inversor do B2B convencional.

Na figura 5.20, observa-se que no início da falta o valor da corrente CC medida no inversor atinge o valor 1.35 p.u, de igual forma a tensão CC diminui até alcançar o

nível de 0.46 p.u. Assim mesmo, nota-se que após liberação da falta ocorrem falhas de comutação que levam a corrente CC atinja o valor máximo de 1.44 p.u.

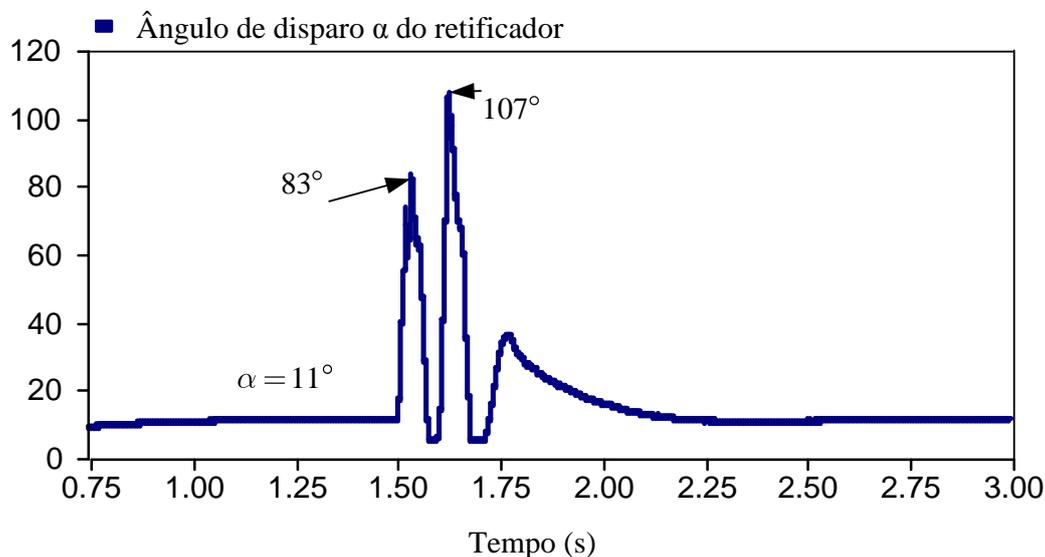


Figura 5. 21 Ângulo de disparo α retificador do B2B convencional.

Na figura 5.21 observa-se que o ângulo de disparo α do retificador encontra-se operando em torno de $\alpha = 11^\circ$. Durante e após falta, o ângulo de disparo α retificador alcança o valor de 83° e 107° , respectivamente, e volta atingir o valor de regime em torno do valor de 11° indicado anteriormente.

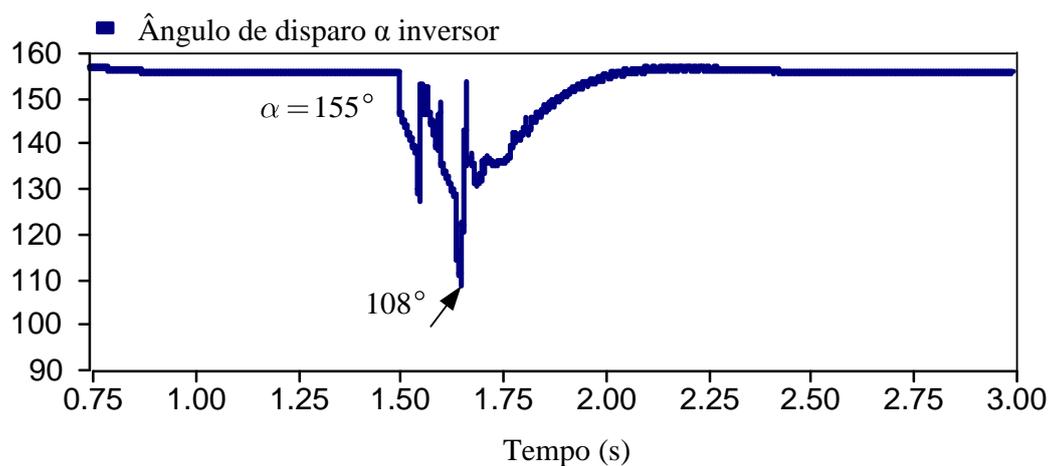


Figura 5. 22 Ângulo de disparo α inversor do B2B convencional.

Na figura 5.22 observa-se que o ângulo de disparo do inversor antes da falta encontra-se em torno de ângulo de 155° . Durante a falta, o ângulo de disparo α inversor alcança o valor mínimo de 108° , após liberação da falha o ângulo α inversor tarde 400 ms para atingir o seu valor de regime de 151° .

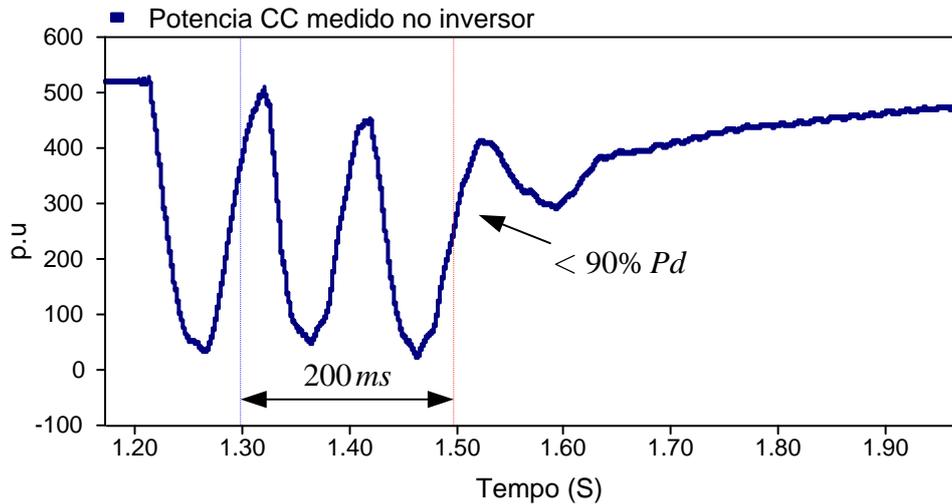


Figura 5. 23 Potencia CC no inversor.

Na figura 5.23 observa-se que a potência CC após distúrbio não consegue atingir o 90% da potência transmitida pré-falta. Portanto, a operação do sistema *B2B* convencional, ou seja sem capacitor de comutação, não cumpre os requisitos de operação estabelecidos inicialmente.

5.3.3 Simulação considerando carga local no lado CA do inversor CCC

A presente análise pretende demonstrar que no caso de considerar carga local conectada no lado CA do inversor CCC, tal como se observa na figura 5.24, a relação de curto-circuito SCR da rede CA pode ser inferior a 1.7 e operar de forma satisfatória.

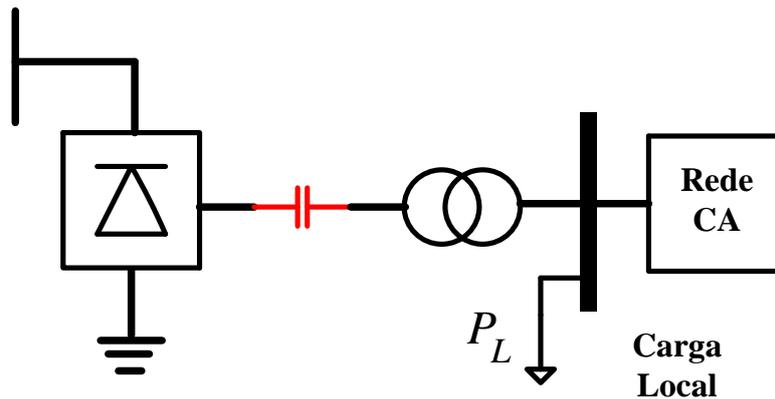


Figura 5. 24 Topologia com carga local no lado CA inversor.

O caso em análise considera carga local P_L igual ao 40% da potência transmitida (540 MW), assim mesmo o nível SCR da rede CA inversor é 0.9 $|Z| = 505\Omega e \underline{Z} = 75^\circ$. A partir disto simulou-se uma falta monofásica que origina uma queda de tensão para 80% no lado CA inversor, o CCC oferece uma resposta adequada tal como se observa na figura 5.25.

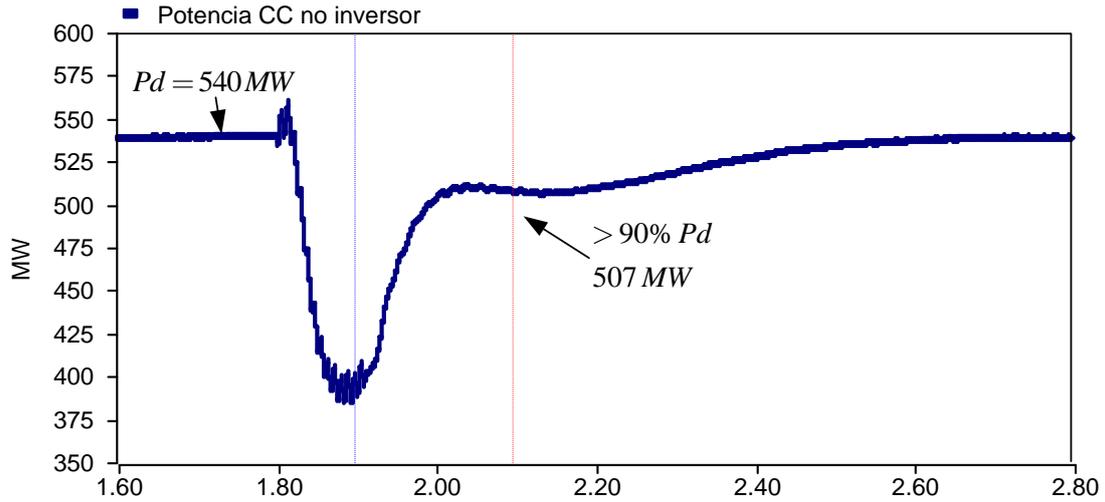


Figura 5. 25 Recuperação da potencia CC medido no inversor.

Desta forma, se demonstra que a carga local influi na operação do back-to-back (CCC-HVDC). Portanto, deveria a formulação da relação de curto-circuito SCR da rede CA deveria levar em conta a seguinte equação:

$$SCR = \frac{\text{Potência de Curto – Circuito } P_{cc}}{P_d} \quad (5.5)$$

Conclusões

- A análise de estabilidade de tensão mediante as curvas de sensibilidade da tensão V no nó de injeção de potência respeito às variáveis da compensação reativa, susceptância B , corrente reativa I_r e potencia reativa capacitiva Q_c , podem ingressar na condição de polaridade negativa, ou seja, que acima do limite de instabilidade, a compensação reativa não conseguiria regular a tensão V aumentando B , I_r , e Q_c . Então, como as curvas de sensibilidade referidas estão com polaridade negativa, os equipamentos de compensação levaria o sistema ao colapso de tensão.
- No caso de termos compensação reativa fixa (capacitor shunt), comprova-se que é favorável para estabilidade de tensão do sistema em comparação à compensação reativa por variação das variáveis B , I_r e Q_c . Assim mesmo, quando a sensibilidade da tensão é invertida uma boa opção
- O compensador síncrono resulta ser a melhor opção, no caso de considerar compensação reativa para um sistema elétrico de potência, pois ele incrementa a potência de curto-circuito do sistema.
- A proposta de resolver o circuito de comutação utilizando a série de Taylor de quarta ordem resulta uma opção válida, devido a que só precisaria das variáveis nominais de tensão e corrente CC para encontrar o ângulo de comutação do conversor.
- Demonstra-se que a redução da margem de comutação γ' unicamente nas simulações feitas no EMTD/PSCAD devido ao acoplamento dos conversores de 6 pulsos em série se resolve diminuindo ou zerando a reatância do primário do transformador trifásico de três enrolamentos, que interliga a ponte conversora com a rede CA. O transformador fisicamente apresenta uma configuração de núcleo especial (5 pernas), a qual não permite a interação de fluxo entre os enrolamentos.

- O conversor com capacitor de comutação apresenta um desempenho adequado quando estiver conectado a uma rede CA com nível de curto-circuito igual a 2.5.
- Segundo as simulações realizadas no capítulo V a operação do CCC diante de faltas assimétricas, que são consideradas severas devido ao desbalanço da energia nos capacitores série. Observou-se que não ocorre falha de comutação alguma diante deste tipo de distúrbio.
- Analisando o caso do conversor sem capacitor de comutação, ou seja, um sistema B2B convencional. Este apresentou diversas falhas de comutação frente à falta simétrica simulada também no primeiro caso. Desta forma conclui-se que a topologia B2B com capacitor de comutação apresenta um melhor desempenho em relação ao sistema convencional.
- No caso tiver uma carga local P_L no lado CA do inversor, o conversor com capacitor de comutação CCC conectado a uma rede CA cuja relação de curto-circuito SCR é 0.9. Este conseguirá operar normalmente e suportar uma falha assimétrica, já que não toda a potência transmitida seria injetada na rede CA, pois uma parte é para fornecer carga local referida.

Referência Bibliográfica

1. John Graham¹, Don Menzies¹, Geir Bileedt¹, Antônio Ricardo Carvalho², Wo Wei Ping², Acacio Wey². "Electrical System Considerations for Argentina-Brazil 1000 MW". ¹ Asea Brown Boveri ABB , ²Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Brazil.
2. Dennis A. Woodford, HVDC Transmission. Manitoba HVDC Research Center.1998
3. Edward Wilson Kimbark, ScD Fellow IEEE. Direct Current Transmission, Vol. I, John Wiley&Sons 1971.
4. Edward Wilson Kimbark, ScD Fellow IEEE. Power Stability, Volume III, Synchronous Machines. John Wiley&Sons 1956
5. Arnaldo Rodrigo Saavedra, Fabio da Costa Medeiros e Leonardo Santos Ferreira. "Sistemas Geradores Eólicos versus Geração Convencional. Estabilidade de Tensão". IEEE T&D 2004, São Paulo.
6. M. Szechtman, T. Wess, C.V. Thio "First Benchmark Model for HVDC Control Studies", Electra, No. 135, April 1991.
7. Paul M. Anderson,"Analysis of Faulted Power Systems", IEEE PRESS Power Systems Engineering Series, New York 1995.
8. The capacitor commutated converter (CCC) as an alternative for application in HVDC projects. Angelo J. J. Rezek 1, Adriana A. dos Santos Izidoro1 , Frederico C. da Fonseca e Jocélio Souza de Sá2, 1 UNIFEL Itajubá. 2 INATEL Santa Rita Sapucaí.
9. Study on Capacitor Commutated Converter applied in HVDC projects. Fenyang, Yong Chang

10. Simon Jensen, Prof. Dr. B. Kühne, Dr. H. Huang, Basic Operation Characteristics of Capacitor Commutated Converters, 15th PSCC, Liege, 22-26 August 2005, Session 12, Paper 5, Page 1-7.
11. John reeve, John A. Baron and G. A. Hanley. "Technical Assessment of Artificial Commutation of HVDC Converters with Series Capacitor". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol-Pas 87, No 10, October 1968.
12. L.L. Freris, Msc(Eng), "Effects of interaction among groups in a multigroup a.c.-d.c. convertor". PROC IEE. VOL. 114. No 7, July 1967.
13. John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. "Analysis of Power System" Mc-Grawn Hill.Inc., U.S.A., 2001.
14. A. M Gole. " Analysis of Certain Aspects of Forced Conmutated HVDC inverters". IEEE Trans. Vol PAS 100. N0 5. May 1985.
15. Mohamed Khatir, Sid Ahmd Zidi, M. Karin Fellah, Samir Hadjeri, Rabie Amiri. " Perfomance Evaluation of HVDC Link with a Capacitor Conmutated Inverter Connected to a very Weak Receiving C Network". Journal of Electrical Engineering. Vol 60, No 4, 2009.
16. M. Khatir, S. A. Zidi, M. K. Fellah, Samir Hadjeri, R. Amiri. " Perfomance Evaluation of Line and Capacitor Commutated Converter based HVDC System in Simulink Enviorenment". Istambul University, Journal of Electrical Engineering. Vol 8, No 1, 2008.
17. S. Nyati, R.M. Mathur." Series Compensation of a Weak AC System Connected to a HVDC inverter". SEPOPE Agust 1989.
18. "Capacitor Commutated Converters (CCC) HVDC Interconnections" Digital Modeling and Benchmark Circuit, Cigre-Working Group B4.34, June 2008.

19. Wolfgang Hammer “Dynamic Modeling of Line and Capacitor Commutated Converters for HVDC Power Transmission” Dissertation for the Degree of Doctor of technical Science. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 2003

20. Sergio Gomes Jr., Nelson Martins, Tomas Jonsson, Donald Menzies, Rolf Ljungqvist. “Modeling Capacitor Commutated Converters in Power System Stability Studies” IEEE Transactions on power System, Vol 17, No 2, May 2002.

21. Niclas Ottosson¹, Lena Kjellin¹, “Modular back-to-back HVDC, with capacitor commutated converters (CCC)” AC-DC Power Transmission, Conference Publication No 485 IEE 2001. ¹ABB Sweden.

22. Agencia Nacional de Energia Elétrica, “Transmissão Associada à Integração das usinas do Rio Madeira” SE 500/230 kV Coletora Porto Velho; Duas Estações Conversoras CA/CC/CA Back to Back 400 MW e LT Coletora Porto Velho-Porto Velho C1 e C2, em 230 kV, Características e Requisitos Básicos das instalações de Transmissão”. Anexo 6A-CC, Lote LA-CC, Requisitos de compensação reativa – controlável (EDITAL DE LEILÃO NO 007/2008-ANEEL- VOL. III - Fl. 1 de 1276).

Apêndice A

A.1 Cálculo das curvas de sensibilidade $\partial V/\partial Q_c$.

Utilizando a equação geral:

$$V^2 = V^2 \cdot \cos^2 \theta - P^2 + V^2 \cdot \sin^2 \theta - Q^2$$

Definem-se as constantes K_1 e K_2 como segue:

$$K_1 = V^2 \cdot \cos^2 \theta - P^2$$

$$K_2 = \sqrt{V^2 - K_1^2}$$

A potência reativa total injetada Q é igual a

$$Q = P.T + Q_c.$$

Então, a potência reativa de compensação Q_c é expressa:

$$Q_c = V^2 \cdot \sin^2 \theta - K_2 - P.T$$

Aplicando a derivada parcial em função de Q_c , na equação anterior resulta:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial Q_c} = \frac{\partial V^2 \cdot \sin^2 \theta - K_2 - P.T}{\partial Q_c},$$

$$\frac{\partial V^2 \cdot \sin^2 \theta}{\partial Q_c} - \frac{\partial K_2}{\partial Q_c} - \frac{\partial P.T}{\partial Q_c} = 1$$

Considere-se que o valor da sensibilidade $\partial P.T / \partial Q_c$ seria zero, devido à variáveis

P e T são consideradas constantes.

$$\frac{\partial V^2}{\partial Q_c} \cdot \sin^2 \theta - \frac{\partial \sqrt{V^2 - K_1^2}}{\partial Q_c} = 1$$

$$2.V.\sin\theta.\frac{\partial V}{\partial Q_c} - \left(\frac{1}{2} \cdot V^2 - K_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{\partial (V^2 - K_1^2)}{\partial Q_c} = 1$$

$$2.V.\sin\theta.\frac{\partial V}{\partial Q_c} - \left(\frac{1}{2} \cdot V^2 - K_1^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(2.V.\frac{\partial V}{\partial Q_c} - 2.K_1.\frac{\partial K_1}{\partial Q_c} \right) = 1$$

$$2.V.\sin\theta.\frac{\partial V}{\partial Q_c} - \left(\frac{V}{K_2}.\frac{\partial V}{\partial Q_c} - \frac{K_1}{K_2}.\frac{\partial K_1}{\partial Q_c} \right) = 1$$

O termo $\partial K_1/\partial Q_c$ define-se como:

$$\frac{\partial K_1}{\partial Q_c} = 2.V.\cos\theta.\frac{\partial V}{\partial Q_c}$$

Finalmente, obtém-se a seguinte expressão:

$$2.V.\sin\theta.\frac{\partial V}{\partial Q_c} - \left(\frac{V}{K_2}.\frac{\partial V}{\partial Q_c} - \frac{K_1}{K_2} \cdot \left(2.V.\cos\theta.\frac{\partial V}{\partial Q_c} \right) \right) = 1$$

$$\frac{\partial V}{\partial Q_c} \cdot \left(2.V.\sin\theta - \frac{V}{K_2} \cdot 1 - 2.K_1.\cos\theta \right) = 1$$

$$\boxed{\frac{\partial V}{\partial Q_c} = \frac{1}{\left\{ 2.V.\sin\theta - 1 - 2.K_1.\cos\theta \cdot \frac{V}{K_2} \right\}}}$$

A.2. Cálculo da curva de sensibilidade $\partial V/\partial B$

Utilizando a equação geral:

$$V^2 = V^2.\cos\theta - P^2 + V^2.\sin\theta - Q^2$$

Definem-se as constantes K_1 e K_2 como segue:

$$K_1 = V^2 \cdot \cos \theta - P$$

$$K_2 = \sqrt{V^2 - K_1^2}$$

A potência reativa total injetada Q é igual a

$$Q = P.T + Q_c.$$

Então, a potência reativa de compensação Q_c é expressa como:

$$Q_c = V^2 \cdot \sin \theta - K_2 - P.T$$

Aplicando a derivada parcial em função da susceptância B na equação anterior resulta:

$$\frac{\partial Q_c}{\partial B} = \frac{\partial V^2 \cdot \sin \theta - K_2 - P.T}{\partial B}$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial B} = \frac{\partial V^2 \cdot \sin \theta}{\partial B} - \frac{\partial K_2}{\partial B} - \frac{\partial P.T}{\partial B}$$

Considere-se que o valor da sensibilidade $\partial P.T / \partial B$ seria zero, devido às variáveis P e T são consideradas constantes.

$$\frac{\partial Q_c}{\partial B} = 2.V \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial B} - \frac{\partial \sqrt{V^2 - K_1^2}}{\partial B}$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial B} = 2.V \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial B} - \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{V^2 - K_1^2}} \cdot \frac{\partial V^2 - K_1^2}{\partial B} \right\}$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial B} = 2.V \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial B} - \left\{ \frac{1}{2} \cdot V^2 - K_1^2^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(2V \cdot \frac{\partial V}{\partial B} - 2.K_1 \cdot \frac{\partial K_1}{\partial B} \right) \right\}$$

O termo $\partial K_1/\partial B$ define-se a seguir:

$$\frac{\partial K_1}{\partial B} = 2.V.\cos\theta.\frac{\partial V}{\partial B}$$

Então a sensibilidade $\partial Q_c/\partial B$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial B} = \frac{\partial V}{\partial B} \left\{ 2.V.\sin\theta - \left(\frac{V}{K_2} - \frac{K_1}{K_2} \cdot 2.V.\cos\theta \right) \right\}$$

Por outro lado, considerando a relação $\partial Q_c/\partial B = V^2 + 2 \cdot Q_c/V \cdot \partial V/\partial B$, pode-se obter a sensibilidade $\partial V/\partial B$.

$$\frac{\partial V}{\partial B} \cdot \left\{ 2.V.\sin\theta - \frac{V}{K_2} \cdot 1 - 2.K_1.\cos\theta \right\} = V^2 + \left(2 \cdot \frac{Q_c}{V} \right) \cdot \frac{\partial V}{\partial B}$$

$$\frac{\partial V}{\partial B} = \frac{1}{\frac{1}{V^2} \cdot \left\{ 2.V.\sin\theta - \frac{V}{K_2} \cdot 1 - 2.K_1.\cos\theta - \left(2 \cdot \frac{Q_c}{V} \right) \right\}}$$

Observa-se, que existe um termo da equação é igual a $\partial V/\partial Q_c$. Por tanto, a sensibilidade é expressa:

$$\frac{\partial V}{\partial B} = \frac{1}{\frac{1}{V^2} \cdot \left[\frac{1}{\frac{\partial V}{\partial Q_c}} - \left(2 \cdot \frac{Q_c}{V} \right) \right]}$$

$$\boxed{\frac{\partial V}{\partial B} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{V^2 \cdot \partial V/\partial Q_c} - \left(2 \cdot \frac{Q_c}{V^3} \right) \right\}}}$$

A.3 Cálculo da curva de sensibilidade $\partial V/\partial Ir$.

Da equação geral $V^2 = (V^2 \cdot \cos \theta - P)^2 + (V^2 \cdot \sin \theta - Q)^2$, podem-se definir as constantes $K_1 = V^2 \cdot \cos \theta - P$ e $K_2 = \sqrt{V^2 - K_1^2}$. Desta forma, a potência reativa de compensação Q_c resulta como segue:

$$Q_c = (V^2 \cdot \sin \theta) - K_2 - P.T$$

Derivando a equação anterior em função da corrente reativa Ir

$$\frac{\partial V}{\partial Ir} \cdot \left\{ 2.V \cdot \sin \theta - \left(\frac{V}{K_2} - \frac{K_1}{K_2} \cdot 2.V \cdot \cos \theta \right) \right\} = \frac{\partial Q_c}{\partial Ir}$$

Usando a relação $Q_c = Ir.V$, resulta:

$$\frac{\partial V}{\partial Ir} \cdot \left\{ 2.V \cdot \sin \theta - \frac{V}{K_2} \cdot 1 - 2.K_1 \cdot \cos \theta \right\} = V + \frac{Q_c}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial Ir} \right)$$

Ordenando e simplificando

$$\frac{\partial V}{\partial Ir} \cdot \left\{ 2.V \cdot \sin \theta - \frac{V}{K_2} \cdot 1 - 2.K_1 \cdot \cos \theta - \frac{Q_c}{V^2} \right\} = 1$$

$$\frac{\partial V}{\partial Ir} = \frac{1}{\left\{ 2.V \cdot \sin \theta - \frac{V}{K_2} \cdot 1 - 2.K_1 \cdot \cos \theta - \frac{Q_c}{V^2} \right\}}$$

$$\boxed{\frac{\partial V}{\partial Ir} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{V^* \cdot \partial V / \partial Ir} - \frac{Q_c}{V^2} \right\}}}$$

A.4 Cálculo da curva de sensibilidade $\partial V/\partial P$ considerando B fixo.

Utilizando a equação geral:

$$V^2 = V^2 \cdot \cos \theta - P^2 + V^2 \cdot \sin \theta - Q^2$$

Substituindo as constantes $K_1 = V^2 \cdot \cos \theta - P$ e $K_2 = \sqrt{V^2 - K_1^2}$, obtemos:

$$Qc = V^2 \cdot \sin \theta - K_2 - P.T$$

Derivando a equação anterior em função de P .

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = \frac{\partial (V^2 \cdot \sin \theta - K_2 - P.T)}{\partial P}$$

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = 2.V \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - \frac{\partial K_2}{\partial P} - T.$$

Sabendo que

$$\frac{\partial K_2}{\partial P} = \frac{1}{2K_2} \cdot \left(2.V \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - 2.K_1 \left(\frac{\partial K_1}{\partial P} \right) \right)$$

$$\frac{\partial K_2}{\partial P} = \frac{1}{2K_2} \cdot \left(2.V \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - 2.K_1 \left(2.V \cdot \cos \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - 1 \right) \right)$$

Substituindo $\partial K_2/\partial P$ na equação, obtém-se a sensibilidade $\partial Qc/\partial P$:

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = 2.V \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - \left\{ \left(\frac{V}{K_2} - \frac{K_1}{K_2} \cdot 2.V \cdot \cos \theta \right) \cdot \frac{\partial V}{\partial P} + \frac{K_1}{K_2} \right\} - T.$$

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = \left\{ 2.V \cdot \sin \theta - \left(\frac{V}{K_2} - \frac{K_1}{K_2} \cdot 2.V \cdot \cos \theta \right) \right\} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - \frac{K_1}{K_2} - T$$

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = \left\{ 2.V.\sin\theta - 1 - 2.K_1.\cos\theta \cdot \frac{V}{K_2} \right\} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - \frac{K_1}{K_2} - T$$

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = \frac{1}{\partial V/\partial Qc} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} - \frac{K_1}{K_2} - T$$

De igual forma, a sensibilidade $\partial Qc/\partial P$ é expressa como segue:

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = 2.V.B. \frac{\partial V}{\partial P} + V^2 \cdot \frac{\partial B}{\partial P}$$

Considerando a susceptância B como uma variável fixa $\frac{\partial B}{\partial P} = 0$, resulta que:

$$\frac{\partial Qc}{\partial P} = 2.V.B. \frac{\partial V}{\partial P}$$

Substituindo na equação e ordenando, obtém-se a expressão da sensibilidade $\partial V/\partial P$:

$$\frac{\partial V}{\partial P} = \frac{\frac{K_1}{K_2} + T}{\left\{ \left(\frac{1}{\partial V/\partial Qc} \right) - 2.V.B \right\}}$$

Apêndice B

B.1 Cálculo dos carregamentos não lineais do capacitor Δu_2 e Δu_1

```

delta_V1_29_10_B.nb

ClearAll["Global`*"]
Id = 3.863; (*kA*)
Ccc = 1540. * 10^-6;
VL = 37.800; (*kV*)
w = 2 * pi * 60.;
Sb = 400; 10^6;
Udio = (3*sqrt(2)/pi) VL;
XT = 0.141 * VL^2 / Sb;

L = XT / w;

mu = 8.2 Degree;
wo = Sqrt[1 / (L Ccc)];

alpha = 12.5 Degree;
AA = Id / 2;
BB = (Sqrt[2] VL Cos[alpha]) / (2 L (wo^2 - w^2));
DD = (-Sqrt[2] VL w Sin[alpha]) / (2 L (wo^2 - w^2));

EE = ((-Sqrt[2] VL w Cos[alpha]) / (2 L (wo^2 - w^2))) - Id / 2;
FF = ((Sqrt[2] VL wo Sin[alpha]) / (2 L (wo^2 - w^2))) + ((Id pi wo) / (3 w)) - (DeltaV1 / 2 L wo);

H = (1 / (w Ccc)) {Integrate[AA, {theta, 0, mu}] - Integrate[BB Cos[theta], {theta, 0, mu}] - Integrate[DD Sin[theta], {theta, 0, mu}] - Integrate[EE Sin[(wo/w) theta], {theta, 0, mu}] -
  Integrate[(Sqrt[2] VL wo Sin[alpha]) / (2 L (wo^2 - w^2)) Sin[(wo/w) theta], {theta, 0, mu}] - Integrate[(Id pi wo) / (3 w) Sin[(wo/w) theta], {theta, 0, mu}]}

Out[129]= {0.784712}

```

Observa-se que o valor de $\Delta u_1 = 0.8500 \text{ kV}$, o qual é um valor coerente.

```

delta_V1_29_10_B.nb

DeltaV1 = {
  (Id mu / 2 + 1/3 Id pi (-1 + Cos[mu wo / w]) - (Id w (-1 + Cos[mu wo / w]) / (2 wo)) - (VL w^2 (1 - Cos[mu]) Sin[alpha] / (sqrt(2) (pi w^2 - pi wo^2))) - (VL w^2 (-1 + Cos[mu wo / w]) Sin[alpha] / (sqrt(2) pi (w^2 - wo^2))) - (VL w Cos[alpha] Sin[mu] / (sqrt(2) (pi w^2 - pi wo^2))) - (sqrt(2) VL w^3 Cos[alpha] Sin[mu wo / (2 w)] / (pi w^2 wo - pi wo^3))} / (1 - mu / (2 L wo));

DeltaV1

Out[129]= {0.850017}

```

B.2 Rotina para o calculo do ângulo de comutação μ

Dados Gerais

```
ClearAll ["Global`*"]
```

```
Vprim=400*10^3;
```

```
Vsec=60;
```

```
Sb=305; (*MVA*)
```

```
 $\omega=2*\pi*50;$ 
```

```
Udio=(3* $\sqrt{2}$ )/ $\pi$ *Vsec;
```

```
Pd=254.1;
```

```
Ud=-80.676;
```

```
IdN=3.125;
```

```
Id=Pd/Ud;
```

```
Xt=0.18;
```

```
L= xt*Vsec^2/(Sb* $\omega$ );
```

```
Ccc=410*10-6;
```

```
dxC=3/ $\pi$  1/( $\omega$ *Ccc) IdN/Udio ;
```

```
dxL= 3/ $\pi$  * ( $\omega$  *L ).IdN/Udio;
```

```
 $\alpha=169.9*\pi/180;$ 
```

Constantes A,B, C e D

$$A=1 / (6*\omega^2*L*CCC) ;$$

$$B=2*\pi*A;$$

$$CC=\pi/3 Ud / (\omega*L*Id) ;$$

$$DD=CC+1;$$

Coefficientes da equação quadrática

$$a4=A/2*\cos[\alpha]+B/6*\sin[\alpha]-DD/24*\cos[\alpha];$$

$$a3=A*\sin[\alpha]-B/2*\cos[\alpha]-DD/6*\sin[\alpha];$$

$$a2=DD/2*\cos[\alpha]-B*\sin[\alpha]-(2*A)*\cos[\alpha];$$

$$a1=CC*\sin[\alpha]+(4*\pi*A)*\cos[\alpha];$$

$$a0=-2*\cos[\alpha];$$

$$\text{Solve}[(a4)*\mu^4+(a3)*\mu^3+(a2)*\mu^2+(a1)*\mu+(a0)==0,\mu]$$

$$\{\{\mu\rightarrow-6.49677\},\{\mu\rightarrow0.989205\},\{\mu\rightarrow0.283816\},\{\mu\rightarrow2.90999\}\}$$

B.3 Rotina para o calculo da margem de comutação γ'

Dados Gerais

$$I_d=3.150;$$

$$C_{cc}=410.10^{-6};$$

$$V_L=60; E=\text{Sqrt}[2]V_L;$$

$$\omega=2*\pi*50;$$

$$S_b=305;$$

$$X_T=0.18*V_L^2/S_b;$$

$$L=X_T/\omega;$$

$$\alpha=169.9 \text{ Degree};$$

$$\mu=17.2 \text{ Degree};$$

$$V_c=(\pi*I_d)/(3*\omega*C_{cc});$$

$$\omega_o=1/\sqrt{L*C_{cc}};$$

Coefficientes da equação cuadrática

$$a_4=E/24*\text{Sin}[\alpha+\mu];$$

$$a3 = -(E/6) * \text{Cos}[\alpha + \mu];$$

$$a2 = -(E/2) * \text{Sin}[\alpha + \mu];$$

$$a1 = E \text{ Cos}[\alpha + \mu] - \text{Id} / (\omega \text{ Ccc});$$

$$a0 = E \text{ Sin}[\alpha + \mu] + (2 * \pi * \text{Id}) / (3 * \omega * \text{Ccc}) - (\text{Id} * \mu) / (\omega * \text{Ccc}) -$$

$$((E \omega) / (2 (\omega_0^2 - \omega^2) L) \text{ Cos}[\alpha + \mu] - \text{Id} / 2 - \text{Id} / 2 + (E \omega) / (2 (\omega_0^2 -$$

$$\omega^2) L) * \text{Cos}[\alpha]) * \text{Cos}[\omega_0 / \omega]) / \text{Sin}[\omega_0 / \omega \mu] + (E \omega_0) / (2 (\omega_0^2 -$$

$$\omega^2) L) * \text{Sin}[\alpha] + (\pi \text{Id}) / (3 (\omega / \omega_0)) * 2 \omega_0 * L;$$

$$\text{Solve}[(a4) * \gamma^4 + (a3) * \gamma^3 + (a2) * \gamma^2 + (a1) * \gamma + (a0) == 0, \gamma]$$

$$\text{FindRoot}[(a4) * \gamma^4 + (a3) * \gamma^3 + (a2) * \gamma^2 + (a1) * \gamma + (a0), \{\gamma, 0\}$$

]

$$\{\{\gamma \rightarrow -7.37135\}, \{\gamma \rightarrow 0.449117\}, \{\gamma \rightarrow 8.5898\}, \{\gamma \rightarrow 30.4464\}\}$$

B.4 Cálculo da Tensão CC no conversor comutado por capacitor CCC

A tensão média CC em um ciclo pode ser calculada pela média da tensão CC instantânea ao longo de um intervalo de $\pi/3$, como é conhecido a forma de onda se repete seis vezes em cada ciclo. As tensões de fase da rede CA corresponde ao instante de disparo da válvula de 3, são as seguintes:

$$e_a = \frac{E}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \alpha + \pi/3), \quad e_b = \frac{E}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \alpha - \pi/3), \quad e_c = \frac{E}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \alpha - \pi).$$

Sabe-se que as válvulas disparam a cada $\pi/3$ rad, dito intervalo consiste no intervalo de comutação μ , onde a válvula 3 assume a condução da válvula 1 que deixa a condução, e o intervalo de $\pi/3 - \mu$ restante, onde a válvula de 3 conduz sozinha.

Durante o processo de comutação $\omega t = [0, \mu]$, a tensão CC instantânea pode-se expressar da seguinte forma:

$$Ud_{(\mu)} = \frac{1}{2} \left\{ \left(e_b - L \frac{d(Id - i)}{dt} - u_{cb} \right) + \left(e_a - L \frac{di}{dt} - u_{ca} \right) \right\} - \left\{ e_c - L \frac{d(-Id)}{dt} - u_{cc} \right\}$$

Onde u_{ca}, u_{cb} e u_{cc} , representam as tensões do capacitor serie para cada fase.

Reordenado a equação anterior, obtemos:

$$Ud_{\mu} = \frac{e_b - e_a}{2} - \frac{u_{cb} - u_{ca}}{2} - e_c + u_{cc}$$

Onde

$$u_{ca}(\omega t) = \frac{Id \pi}{3 \omega C} - \Delta u_2 + \frac{1}{\omega C} \int_0^{\omega t} i d\omega t,$$

$$u_{cb}(\omega t) = -\frac{Id \pi}{3\omega C} + \frac{1}{\omega C} \int_0^{\omega t} (Id - i) d\omega t,$$

$$u_{cc}(\omega t) = -\left[-\frac{Id \pi}{3\omega C} - \Delta u_1 + \frac{Id}{\omega C}(\pi/3 - \mu) + \frac{Id}{\omega C} - \omega t \right] = -\frac{Id}{\omega C}(\theta) + \Delta u_2$$

Por tanto, substituindo as tensões dos capacitores das três fases indicadas, a tensão CC durante o intervalo de comutação resulta:

$$Ud_{\mu}(\theta) = \frac{E}{\sqrt{3}} \frac{\cos(\theta + \alpha)}{2} - \frac{1}{2} \left[-\Delta u_2 + \frac{Id\theta}{\omega C} \right] - \left[\frac{E}{\sqrt{3}} \cos(\theta + \alpha - \pi) \right] - \left[\frac{Id}{\omega C} \theta - \Delta u_2 \right]$$

$$Ud_{\mu}(\theta) = \frac{E\sqrt{3}}{2} \cos(\theta + \alpha) + \left[\frac{3}{2} \Delta u_2 - \frac{3}{2} \frac{Id}{\omega C} \theta \right]$$

Por último a tensão CC instantânea, durante o intervalo de condução $\omega t = [\mu, \pi/3]$, aonde unicamente a válvula 3 conduz na parte superior da ponte conversora.

$$Ud_{condução} = \left[e_b - L \frac{dId}{dt} - u_{cb} \right] - \left[e_c - L \frac{d(-Id)}{dt} - u_{cc} \right] = e_{bc} - u_{cb} + u_{cc}$$

$$u_{cb} = -\frac{Id \pi}{3\omega C} + \Delta u_1 + \frac{Id(\theta - \mu)}{\omega C} = \frac{Id}{\omega C}(\theta - \pi/3) - \Delta u_2$$

$$Ud_{condução} = \frac{E}{\sqrt{3}} \left[\cos(\theta + \alpha - \pi/3) - \cos(\theta + \alpha - \pi) \right] - \left[\frac{Id}{\omega C}(\theta - \pi/3) - \Delta u_2 \right] - \left[\frac{Id}{\omega C} \theta - \Delta u_2 \right]$$

$$Ud_{condução} = \left[\frac{E\sqrt{3}}{2} \cos(\theta + \alpha) + \frac{E}{2} \sin(\theta + \alpha) \right] - \left[\frac{Id}{\omega C}(\pi/3 - 2\theta) + 2\Delta u_2 \right]$$

A tensão CC é calculada a través da média da tensão CC instantânea indicada anteriormente durante o intervalo $\pi/3$, comutação e intervalo de condução, tal como se indica a continuação:

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \left[\int_0^{\mu} U d_u(\theta) d\theta + \int_{\mu}^{\pi/3} U d_{condução}(\theta) d\theta \right]$$

Desta forma a tensão CC se expressa como segue:

$$U_d = \frac{3E}{\pi} \left[\frac{\cos(\alpha) + \cos(\alpha + \mu)}{2} \right] + \frac{3}{\pi} [(\Delta u_2 - \Delta u_1)(\pi/3 - \mu/4)]$$

Note-se que o primeiro termo da equação é idêntico da formula da tensão CC para o conversor convencional, sem capacitor de comutação. De igual forma há duas contribuições da capacitância série na tensão CC, o mais importante é representado no primeiro termo na qual o ângulo μ é reduzido no seu valor devido ao capacitor, conseqüentemente a tensão CC, se incrementa. A segunda contribuição expressada pelo segundo termo é praticamente nula, causada por uma diferença entre a carga do capacitor que entra a conduzir Δu_1 e o capacitor que deixa de conduzir Δu_2 durante o intervalo de comutação.

C.2 Topologia do Inversor com capacitor de Comutação

