



Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Samuel Neves Duarte

ESTRATÉGIAS DE ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO DE UM
COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO PARA DISTRIBUIÇÃO

Dissertação de Mestrado

Juiz de Fora
2017

Samuel Neves Duarte

Estratégias de Energização e Desenergização de um Compensador Estático Síncrono
para Distribuição

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

Juiz de Fora
2017

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Duarte, Samuel Neves.

Estratégias de Energização e Desenergização de um Compensador Estático Síncrono para Distribuição / Samuel Neves Duarte. -- 2017.

121 p. : il.

Orientador: Pedro Gomes Barbosa

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

1. Conversores fonte de tensão. 2. VSC energização. 3. VSC desenergização. 4. DSTATCOM. I. Barbosa, Pedro Gomes, orient. II. Título.

Samuel Neves Duarte

Estratégias de Energização e Desenergização de um Compensador Estático Síncrono
para Distribuição

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em 08 de março de 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Prof. Marcelo Aroca Tomim, Ph.D.

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Prof. Benedito Donizeti Bonatto, Ph.D

Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Geraldo e Celeste, à minha irmã Talita, à minha avó Isabel e aos meus familiares pelo apoio, suporte e motivação.

À Cíntia pelo carinho, amor e cumplicidade.

Ao Professor Pedro Gomes Barbosa pela orientação, ensinamentos, amizade, atenção e paciência durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Gabriel pela ajuda durante a obtenção dos resultados experimentais para esta dissertação de mestrado.

Aos amigos do NAEP: Rodolfo, Pablo, Fred, Igor, Ettore, Andrei e Adeilson.

Aos meus amigos que me ajudaram de alguma forma durante este trabalho.

Ao CNPq, INERGE, CAPES, FAPEMIG, à Universidade Federal de Juiz de Fora e à Faculdade de Engenharia pelo suporte financeiro e por prover as ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Esta dissertação propõe estratégias de energização/desenergização de um compensador estático síncrono para distribuição. É também proposta uma alteração na topologia do compensador estático síncrono com a inclusão de dois circuitos capazes de realizar o procedimento de energização/desenergização proposto. O primeiro circuito é baseado em um retificador semi-controlado enquanto o segundo circuito é baseado na topologia de um gradador. A metodologia de controle é derivada da modelagem matemática do circuito equivalente formado durante a energização e a desenergização. A equação obtida é resolvida numericamente pelo método de Newton-Raphson e posteriormente usa-se uma aproximação linear por partes para representar os pontos intermediários da curva que relaciona a tensão do barramento CC do compensador com o ângulo de disparo dos tiristores. Um modelo digital do compensador estático, desenvolvido no programa PSIM, e um modelo experimental de pequena escala (3,8 kVA/220 V) são usados para validar a metodologia proposta. Resultados de simulação e experimentais demonstram a eficiência dos controladores de energização e desenergização.

Palavras-chave: Conversores fonte de tensão, VSC energização, VSC desenergização, DSTATCOM.

ABSTRACT

This dissertation proposes strategies to energize/de-energize a distribution static synchronous compensator. It is also proposed a change in the topology of the static synchronous compensator with the inclusion of two circuits capable of performing the energization/de-energization procedure. The first circuit is based on a semi-controlled rectifier while the second one is based on a grader. The control methodology is derived from the mathematical modeling of the equivalent circuit formed during the energization and de-energization process. The resulting equation is numerically solved by the Newton-Raphson method and a piecewise linear method is used to model the curve that relates the DC bus voltage of the compensator to the firing angle of the thyristors. A digital model, in the PSIM program, and a small scale laboratory prototype (3,8 kVA/220 V) are used to validate the proposed methodology. Simulation and experimental results demonstrates the effectiveness of the energization and de-energization controllers.

Keywords: Voltage-source converter, VSC energization, VSC de-energization, DSTATCOM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Topologia do circuito de energização de um retificador trifásico.	34
Figura 2	Topologia do circuito de energização de um STATCOM-CMC.	34
Figura 3	Topologia do circuito de energização de um VSC trifásico.	35
Figura 4	Topologia do circuito de desenergização de um STATCOM-MMC. ..	35
Figura 5	Topologia do circuito de energização de um STATCOM utilizando uma fonte CC de alta tensão.	36
Figura 6	Topologia de um compensador estático síncrono para distribuição conectado a uma rede elétrica e diagrama do sistema de controle.	40
Figura 7	Topologia do filtro de interface de segunda ordem.	40
Figura 8	Diagrama esquemático do SRF-PLL.	44
Figura 9	Diagrama de blocos do SRF-PLL linear.	44
Figura 10	Diagrama de blocos da malha de controle de corrente do conversor.	47
Figura 11	Diagrama de blocos das malhas de controle de corrente desacopladas: (a) Eixo direto, (b) eixo em quadratura.	48
Figura 12	Diagrama de blocos da malha de controle da tensão do barramento CC.	51
Figura 13	Topologia de um DSTATCOM conectado às cargas e à rede elétrica.	52
Figura 14	Diagrama de blocos da malha de controle da tensão do ponto de acoplamento comum.	55
Figura 15	Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta do circuito de sincronismo: (a) Ganho, (b) fase.	59
Figura 16	Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta do sistema de controle da tensão do barramento CC: (a) Ganho, (b) fase.	60
Figura 17	Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta do sistema de controle da tensão do ponto de acoplamento comum: (a) Ganho, (b) fase.	61

Figura 18	Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Forma de onda da corrente da fase “a”, (b) forma de onda da potência reativa trocada com a rede e (c) forma de onda da corrente de quadratura.	63
Figura 19	Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Valor de pico da tensão de fase do ponto de acoplamento comum, (b) forma de onda da tensão do barramento CC e (c) forma de onda da frequência angular rastreada pelo circuito de sincronismo.	64
Figura 20	Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Detalhe da forma de onda da corrente da fase “a”, (b) detalhe da forma de onda da potência reativa trocada com a rede e (c) detalhe da forma de onda da frequência angular rastreada pelo circuito de sincronismo.	65
Figura 21	Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Detalhe da forma de onda da corrente de quadratura, e (b) detalhe do valor de pico da tensão de fase do ponto de acoplamento comum.	66
Figura 22	Formas de onda quando o DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV é conectado à rede elétrica com seu capacitor CC equivalente descarregado: (a) Tensão do barramento CC e (b) correntes de linha.	68
Figura 23	Forma de onda da tensão do barramento CC do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV durante o processo de desenergização natural.	68
Figura 24	Topologia do circuito de pré-energização do DSTATCOM.	69
Figura 25	Topologia equivalente do circuito de pré-energização do DSTATCOM.	70
Figura 26	Formas de onda durante a pré-energização síncrona do DSTATCOM: (a) Tensão da rede e tensão CC e (b) corrente CA.	70
Figura 27	Característica $V_{cc} \times \alpha$ para a pré-energização síncrona do DSTATCOM.	76
Figura 28	Valores de pico da corrente do circuito de pré-energização do DSTATCOM calculados durante a resolução do método de Newton-Raphson.	76
Figura 29	Número de iterações necessárias durante a resolução do método de Newton-Raphson.	77

Figura 30	Aproximação PWL com dois pontos de quebra sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_e$.	79
Figura 31	Aproximação PWL, sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_e$, utilizada no processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM.	80
Figura 32	Diagrama de blocos do controlador de pré-energização do DSTATCOM.	81
Figura 33	Fluxograma do controlador de energização C_e .	82
Figura 34	Formas de onda durante o processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV: (a) Ângulo de disparo dos tiristores, (b) corrente da fase “a” e (c) tensão do barramento CC.	83
Figura 35	Detalhes das formas de onda durante o processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV: (a) Ângulo de disparo dos tiristores, (b) tensão do barramento CC, (c) corrente da fase “a” e (d) tensão de linha da rede elétrica ($v_{s,ab}$).	84
Figura 36	Topologia do circuito de pré-energização e desenergização usando dois braços de tiristores no VSC.	85
Figura 37	Topologia do circuito de pré-energização e desenergização do DSTATCOM.	85
Figura 38	(a) Topologia equivalente do circuito de pré-energização do DSTATCOM, (b) topologia equivalente do circuito de desenergização do DSTATCOM.	87
Figura 39	Formas de onda durante o processo de desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) tensão da rede e tensão CC e (b) corrente CA.	88
Figura 40	Característica $V_{cc} \times \alpha_d$ para a desenergização do DSTATCOM.	89
Figura 41	Aproximação PWL sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_d$ para a desenergização síncrona do DSTATCOM.	90
Figura 42	Diagrama de blocos do controlador de pré-energização e desenergização do DSTATCOM.	91
Figura 43	Fluxograma do controlador de desenergização C_d .	92
Figura 44	Formas de onda durante os processos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM: (a) Ângulo α , (b) corrente da fase “a” e (c) tensão do barramento CC.	94
Figura 45	Forma de onda da corrente da fase “a” do DSTATCOM quando os contatos Sw_1 e Sw_3 da chave mecânica são fechados.	95

Figura 46	Detalhes das formas de onda durante o processo de desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) Ângulo α , (b) tensão do barramento CC, (c) corrente da fase “a” e (d) tensão de linha da rede CA ($v_{s,ab}$).	96
Figura 47	Válvula formada por vários tiristores conectados em série.	97
Figura 48	Topologia do banco de capacitores do conversor de 3,8 kVA/220 V.	100
Figura 49	Foto da bancada de trabalho: 1 - Módulo de disparo dos tiristores, 2 - tiristores, 3 - sensores de tensão, 4 - sensores de corrente, 5 - disjuntor, 6 - fusíveis, 7 - filtros passivos, 8 - conversor eletrônico, 9 - placas de condicionamento de sinais.	101
Figura 50	Formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a energização do DSTATCOM e a compensação de potência reativa: (a) Simulação, (b) experimental.	103
Figura 51	Detalhes das formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a pré-energização do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.	104
Figura 52	Formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a energização, a compensação de potência reativa e a desenergização do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.	105
Figura 53	Detalhes das formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a pré-energização do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.	106
Figura 54	Detalhes das formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.	107
Figura 55	Sistemas de coordenadas abc e dq	116
Figura 56	Aproximação PWL sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_e$ ($I_{máx} = 5$ A).	119
Figura 57	Aproximações PWL sobrepostas nas características $V_{cc} \times \alpha$ ($I_{máx} = 10$ A): (a) Pré-energização síncrona e (b) desenergização síncrona.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros da rede de distribuição.	56
Tabela 2	Parâmetros do filtro de interface do DSTATCOM.	56
Tabela 3	Parâmetros do DSTATCOM.	57
Tabela 4	Pontos de quebra da aproximação PWL com dois pontos de quebra.	79
Tabela 5	Pontos de quebra da aproximação PWL da característica de pré-energização do DSTATCOM.	80
Tabela 6	Pontos de quebra da aproximação PWL da característica de desenergização síncrona do DSTATCOM.	90
Tabela 7	Parâmetros da rede de distribuição do sistema de pequena escala. ..	99
Tabela 8	Parâmetros do filtro de interface do DSTATCOM de pequena escala.	99
Tabela 9	Parâmetros do DSTATCOM de pequena escala.	100
Tabela 10	Ganhos dos controladores do DSTATCOM de pequena escala.	100
Tabela 11	Coefficientes da aproximação PWL, com dois pontos de quebra, para a pré-energização do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV.	117
Tabela 12	Coefficientes da aproximação PWL para a pré-energização do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV.	118
Tabela 13	Coefficientes da aproximação PWL para a desenergização síncrona do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV.	118
Tabela 14	Coefficientes da aproximação PWL para a pré-energização do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V ($I_{máx} = 5$ A).	119
Tabela 15	Coefficientes da aproximação PWL para a pré-energização do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V ($I_{máx} = 10$ A).	120
Tabela 16	Coefficientes da aproximação PWL para a desenergização síncrona do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V ($I_{máx} = 10$ A).	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMC controle no modo de corrente (do inglês, *Current Mode Control*)

DSP processador digital de sinais (do inglês, *Digital Signal Processor*)

DSTATCOM compensador estático síncrono para distribuição (do inglês, *Distribution Static Synchronous Compensator*)

FACTS sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada (do inglês, *Flexible AC Transmission System*)

FAP filtro ativo de potência

HVDC sistema de transmissão em corrente contínua em alta tensão (do inglês, *High-Voltage Direct Current*)

IGBT transistor bipolar de porta isolada (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor*)

IPFC controlador de fluxo de potência (do inglês, *Intertie Power Flow Controller*)

PAC ponto de acoplamento comum

PI proporcional-integral

PLL circuito de sincronismo (do inglês, *Phase-Locked Loop*)

PWL aproximação linear por partes (do inglês, *Piecewise Linear*)

PWM modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*)

SEP sistemas elétricos de potência

SRF-PLL circuito PLL baseado no sistema de coordenadas síncrono (do inglês, *Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop*)

SSSC compensador série estático síncrono (do inglês, *Static Synchronous Series Compensator*)

STATCOM compensador estático síncrono (do inglês, *Static Synchronous Compensator*)

SVC compensador estático de reativos (do inglês, *Static Var Compensator*)

UPFC controlador de fluxo de potência unificado (do inglês, *Unified Power Flow Controller*)

VSC conversor fonte de tensão (do inglês, *Voltage Source Converter*)

LISTA DE SÍMBOLOS

Grandezas instantâneas

$v_{pac,a}, v_{pac,b}, v_{pac,c}$	Tensões de fase do ponto de acoplamento comum
v_{ta}, v_{tb}, v_{tc}	Tensões terminais de fase do conversor
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tensões de fase da rede elétrica
$v_{s,ab}$	Tensão de linha da rede elétrica
$v_{pac,d}, v_{pac,q}$	Tensões de eixo direto e quadratura do ponto de acoplamento comum
v_{td}, v_{tq}	Tensões de eixo direto e quadratura terminais do conversor
v_{sd}, v_{sq}	Tensões de eixo direto e quadratura da rede elétrica
i_a, i_b, i_c	Correntes de linha do conversor
i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}	Correntes de linha da carga
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Correntes de linha da rede elétrica
i_d, i_q	Correntes de eixo direto e quadratura do conversor
i_{Ld}, i_{Lq}	Correntes de eixo direto e quadratura da carga
i_{sd}, i_{sq}	Correntes de eixo direto e quadratura da rede elétrica
i	Corrente de pré-energização e desenergização síncrona
p, q	Potências ativa e reativa no ponto de acoplamento comum
m_d, m_q	Índices de modulação de eixo direto e quadratura

Grandezas eficazes e médias

V_{sd}, V_{sq}	Tensões de eixo direto e quadratura da rede elétrica em regime permanente
$V_{pac,d}, V_{pac,q}$	Tensões de eixo direto e quadratura do ponto de acoplamento comum em regime permanente
V_{td}, V_{tq}	Tensões de eixo direto e quadratura terminais do conversor em regime permanente
$V_{pac,d0}$	Tensão de eixo direto do ponto de acoplamento comum em regime permanente
V_L	Valor eficaz da tensão de linha da rede elétrica
V_{cc}	Tensão do barramento de corrente contínua do conversor
V_{cc}^*	Tensão do barramento de corrente contínua do conversor de referência
I_d, I_q	Correntes de eixo direto e quadratura no ponto de acoplamento comum em regime permanente
I_d^*, I_q^*	Correntes de eixo direto e quadratura no ponto de acoplamento comum de referência
I_{Ld}, I_{Lq}	Correntes de eixo direto e quadratura da carga em regime permanente
I_{sd}, I_{sq}	Correntes de eixo direto e quadratura da rede elétrica em regime permanente
P, Q	Potências ativa e reativa no ponto de acoplamento comum em regime permanente

Constantes e parâmetros elétricos

f_c	Frequência de comutação do conversor
f_s	Frequência da rede elétrica
ω_s	Frequência angular da rede elétrica
L_s	Indutância da rede elétrica
R_s	Resistência da rede elétrica
L_f	Indutância do filtro de acoplamento do conversor
R_f	Resistência do filtro de acoplamento do conversor
C_f	Capacitância do filtro de acoplamento do conversor
$R_{f,c}$	Resistência série do capacitor do filtro do conversor
R_{IGBT}	Resistência dos interruptores do conversor
R_{eq}	Resistência equivalente do filtro e dos interruptores do conversor
C_{eq}	Capacitância equivalente do barramento de corrente contínua
R_p	Resistência equivalente do barramento de corrente contínua
L	Indutância equivalente do filtro de acoplamento e da rede elétrica
R	Resistência equivalente do filtro de acoplamento e da rede elétrica
\hat{V}_{pac}	Valor de pico da tensão do ponto de acoplamento comum
ρ	Ângulo rastreado pelo circuito de sincronismo
Y	Ângulo rastreado pelo circuito de sincronismo no domínio da frequência
ρ_0	Valor inicial do ângulo rastreado pelo circuito de sincronismo
ρ_{ab}	Ângulo relativo à tensão $v_{s,ab}$
ϕ_0	Ângulo de fase da tensão da rede elétrica
ω_0	Frequência angular da tensão da rede elétrica
ω	Frequência angular rastreada pelo circuito de sincronismo
θ_0	Ângulo de fase da tensão do ponto de acoplamento comum
θ	Ângulo de fase da tensão do ponto de acoplamento comum rastreado pelo circuito de sincronismo
ψ	Ângulo da rede elétrica
Ψ	Ângulo da rede elétrica no domínio da frequência
$S_1 - S_6$	Interruptores do conversor
$T_1 - T_4$	Tiristores dos circuitos de pré-energização e desenergização
$Sw_1 - Sw_6$	Contatos das chaves mecânicas

Funções de transferências

$C_i(s)$	Regulador da malha de controle de corrente do conversor
$C_{V_{cc}}(s)$	Regulador da malha de controle da tensão do barramento de corrente contínua do conversor
$C_{V_{pac}}(s)$	Regulador da malha de controle da tensão do ponto de acoplamento comum
$C_{pll}(s)$	Regulador da malha de controle do circuito de sincronismo
$G_i(s)$	Função de transferência de malha aberta das malhas de controle de corrente
$G_{V_{cc}}(s)$	Função de transferência de malha aberta da malha de controle da tensão do barramento de corrente contínua
$G_{V_{pac}}(s)$	Função de transferência de malha aberta da malha de controle da tensão do ponto de acoplamento comum
$G_{pll}(s)$	Função de transferência de malha aberta do circuito de sincronismo
$H_i(s)$	Função de transferência de malha fechada das malhas de controle de corrente
$H_{V_{cc}}(s)$	Função de transferência de malha fechada da malha de controle da tensão do barramento de corrente contínua
$H_{V_{pac}}(s)$	Função de transferência de malha fechada da malha de controle da tensão do ponto de acoplamento comum
$H_{pll}(s)$	Função de transferência de malha fechada do circuito de sincronismo
$H_1(s)$	Função de transferência canônica de primeira ordem
$H_2(s)$	Função de transferência canônica de segunda ordem
$F_{ff}(s)$	Função de transferência do filtro dos sinais <i>feed-forward</i>

Variáveis do sistema de controle do conversor

$K_{p,i}$	Ganho proporcional do regulador de corrente
$K_{i,i}$	Ganho integral do regulador de corrente
$K_{p,V_{cc}}$	Ganho proporcional do regulador da tensão do barramento de corrente contínua
$K_{i,V_{cc}}$	Ganho integral do regulador da tensão do barramento de corrente contínua
$K_{p,pll}$	Ganho proporcional do regulador do circuito de sincronismo
$K_{i,pll}$	Ganho integral do regulador do circuito de sincronismo
$K_{i,V_{pac}}$	Ganho integral do regulador da tensão do ponto de acoplamento comum
τ_i	Constante de tempo das malhas de controle de corrente
e_d, e_q	Erros das malhas de controle de corrente do conversor
$e_{V_{cc}}$	Erro da malha de controle da tensão do barramento de corrente contínua
e_{pll}	Erro da malha de controle do circuito de sincronismo
$e_{V_{pac}}$	Erro da malha de controle da tensão do ponto de acoplamento comum
u_d, u_q	Variáveis de controle das malhas de corrente

Variáveis e funções matemáticas

ξ	Fator de amortecimento do sistema padrão de segunda ordem
ω_n	Frequência natural não amortecida
x	Variável de estado genérica
\bar{X}	Variável de estado genérica de regime permanente
\tilde{x}	Variável de estado genérica de pequenos sinais
$U_{-1}(t)$	Função degrau unitário
$\delta(t)$	Função delta de Dirac
p	Operador diferencial

Variáveis e símbolos dos controladores de energização e desenergização

α	Ângulo de disparo dos interruptores
α_{PWL}	Ângulo de disparo dos interruptores dado pela aproximação linear por partes
α_e	Ângulo de disparo para a energização
α_d	Ângulo de disparo para a desenergização
$\alpha_{e\pi}, \alpha_{d\pi}$	Ângulos de disparo para o semiciclo negativo da tensão da rede
β	Ângulo de extinção das correntes de pré-energização e desenergização síncrona
γ	Ângulo em que a tensão do barramento de corrente contínua é igual à tensão da rede elétrica
γ_e	Ângulo γ referente à energização do conversor
γ_d	Ângulo γ referente à desenergização do conversor
t_{γ_e}	Tempo relacionado ao ângulo γ_e
t_{γ_d}	Tempo relacionado ao ângulo γ_d
ω_r	Frequência de ressonância dos circuitos equivalentes de pré-energização e desenergização síncrona
$\Delta\alpha$	Incremento do ângulo α no método de Newton-Raphson
α_{ant}	Ângulo α da iteração anterior
Δi	Erro da corrente no método de Newton-Raphson
$I_{máx}$	Valor de pico das correntes de pré-energização e desenergização
a, b, C_k	Coefficientes da aproximação linear por partes
$V_{cc,k}$	Pontos de quebra da aproximação linear por partes
m_0, m_r, m_n	Inclinações da aproximação linear por partes
α_0	Ângulo α para a tensão do barramento de corrente contínua nula
k	Ponto de quebra da aproximação linear por partes
n	Número de pontos de quebra da aproximação linear por partes
r	Índice das inclinações da aproximação linear por partes
$V_{cc,máx}$	Limite superior do limitador da tensão do barramento de corrente contínua
$V_{cc,min}$	Limite inferior do limitador da tensão do barramento de corrente contínua
$\alpha_{e,máx}, \alpha_{d,máx}$	Limites superiores dos limitadores dos ângulos de disparo dos interruptores
$\alpha_{e,min}, \alpha_{d,min}$	Limites inferiores dos limitadores dos ângulos de disparo dos interruptores
PWL_e	Controlador do ângulo de disparo dos interruptores durante a pré-energização síncrona
PWL_d	Controlador do ângulo de disparo dos interruptores durante a desenergização síncrona
C_e	Controlador de pré-energização síncrona do conversor
C_d	Controlador de desenergização síncrona do conversor
$Fire_{T1} - Fire_{T2}$	Sinais de disparo dos tiristores
$Disp_{S1}, Disp_{S6}$	Sinais de disparo dos interruptores S_1 e S_6
$Disp_{S3}, Disp_{S4}$	Sinais de disparo dos interruptores S_3 e S_4

SUMÁRIO

1	Introdução	31
1.1	Identificação do Problema	31
1.2	Motivação	33
1.3	Revisão bibliográfica	33
1.4	Objetivos	36
1.5	Estrutura da dissertação	37
2	O DSTATCOM	39
2.1	A estratégia de controle do DSTATCOM	41
2.2	Modelagem matemática do lado CA do DSTATCOM	41
2.3	O circuito de sincronismo	43
2.4	O controle das potências ativa e reativa	45
2.5	Controle no modo de corrente	46
2.6	O controle da tensão do barramento CC	49
2.7	O controle da tensão do ponto de acoplamento comum	52
2.8	Dados do sistema para o projeto e simulação dos controladores	56
2.9	Projeto dos controladores	56
2.9.1	Regulador de corrente	57
2.9.2	Regulador do circuito de sincronismo	58
2.9.3	Regulador do sistema de controle da tensão do barramento CC	58
2.9.4	Regulador do sistema de controle da tensão do ponto de acoplamento comum	60
2.10	Resultados de simulação do sistema de controle do DSTATCOM	61

2.11	Conclusões parciais	62
3	Pré-energização e desenergização do DSTATCOM	67
3.1	O circuito de pré-energização síncrona	68
3.1.1	A estratégia de controle do circuito de pré-energização síncrona	69
3.2	Modelagem matemática da corrente de pré- energização	71
3.3	O controle da corrente de pré-energização	72
3.3.1	A escolha da amplitude da corrente de pré- energização síncrona	74
3.3.2	A curva característica de pré-energização	75
3.3.3	O desempenho do método de Newton-Raphson	75
3.4	A aproximação linear por partes da característica de pré-energização	77
3.4.1	O controlador de pré-energização do DSTATCOM	79
3.5	Resultados de simulação do circuito de pré- energização do DSTATCOM	81
3.6	O circuito de pré-energização e desenergização síncrona	82
3.6.1	A estratégia de controle do circuito de pré-energização e desenergização síncrona	86
3.6.2	Modelagem matemática da corrente de desenergização síncrona	86
3.6.3	O controle da corrente de desenergização síncrona	88
3.6.4	A curva característica de desenergização síncrona	88
3.6.5	A aproximação linear por partes da característica de desenergização síncrona	89
3.6.6	O controlador de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM	89
3.6.7	A desenergização natural do capacitor CC do DSTATCOM	91

3.7	Resultados de simulação do circuito de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM	92
3.8	Considerações sobre o custo das topologias propostas	95
3.9	Conclusões parciais	95
4	Resultados experimentais	99
4.1	Parâmetros do sistema de pequena escala	99
4.1.1	Considerações sobre a capacidade do banco de capacitores do DSTATCOM de pequena escala	99
4.2	Comparação dos resultados experimentais e de simulação	101
4.2.1	Resultados experimentais e de simulação do processo de energização do DSTATCOM	101
4.2.2	Resultados experimentais e de simulação dos processos de energização e desenergização do DSTATCOM	102
4.3	Conclusões parciais	106
5	Conclusões finais	109
5.1	Resultados complementares deste trabalho	110
5.2	Trabalhos Futuros	110
	Referências	111
	Apêndice A – Transformada de Park	115
	Apêndice B – Aproximação PWL	117
B.1	Características de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV	117
B.2	Características de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V	117

B.2.1	Pré-energização com $I_{máx} = 5$ A	117
B.2.2	Pré-energização e desenergização síncrona com $I_{máx} = 10$ A	118

1 INTRODUÇÃO

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

As principais aplicações de equipamentos eletrônicos de potência nos sistemas elétricos de potência (SEP) foram o compensador estático de reativos (do inglês, *Static Var Compensator*) (SVC), o sistema de transmissão em corrente contínua em alta tensão (do inglês, *High-Voltage Direct Current*) (HVDC) e o sistema de excitação estático das máquinas síncronas. Porém, nas últimas duas décadas as aplicações de conversores estáticos nos SEP vem ganhando destaque principalmente devido à evolução dos dispositivos semicondutores e das tecnologias microeletrônicas e ao aumento da utilização de fontes de energia renováveis (HINGORANI & GYUGYI, 2000; WATANABE et al., 1998; YAZDANI & IRAVANI, 2010).

Um conversor estático é composto por interruptores semicondutores e componentes auxiliares como capacitores, indutores e transformadores. Sua principal função é facilitar a troca de energia entre dois ou mais subsistemas. Para tanto, o padrão de comutação apropriado dos interruptores é definido por um sistema de controle. Muitas vezes os subsistemas têm características diferentes como níveis de tensão, frequência e número de fases. Nestas situações, conversores eletrônicos de potência são usados na interface entre os subsistemas. Um exemplo é a utilização de um conversor estático como interface entre um sistema de geração eólica com frequência e tensão variáveis e a rede elétrica CA (MOHAN & UNDELAND, 2007; YAZDANI & IRAVANI, 2010). Em aplicações envolvendo turbinas marítimas estes conversores também são necessários devido à operação com frequência variável (SHARKH et al., 2014).

O filtro ativo de potência (FAP) é outra aplicação dos conversores eletrônicos. Neste caso, o conversor estático é usado para condicionar a energia elétrica consumida por cargas lineares e não lineares, controlando a frequência, amplitude da tensão, fator de potência, conteúdo harmônico entre outros (AKAGI; WATANABE & AREDES, 2007; YAZDANI & IRAVANI, 2010).

Os conversores estáticos são também usados nos sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada (do inglês, *Flexible AC Transmission System*) (FACTS) para controlar os fluxos de potências ativa e reativa pelas linhas de transmissão (AKAGI; WATANABE & AREDES, 2007; HINGORANI & GYUGYI, 2000). Dentro deste contexto, os conversores eletrônicos de potência são usados, tanto nos sistemas de transmissão quanto nos de distribuição, para aumentar a capacidade de transferência de potência da linha, maximizar a eficiência da transferência de potência e aumentar a estabilidade de tensão e angular do sistema.

Alguns exemplos de controladores FACTS são: O compensador estático síncrono (do inglês, *Static Synchronous Compensator*) (STATCOM), o compensador série estático síncrono (do inglês, *Static Synchronous Series Compensator*) (SSSC), o controlador de fluxo de potência (do inglês, *Intertie Power Flow Controller*) (IPFC) e o controlador de fluxo de potência unificado (do inglês, *Unified Power Flow Controller*) (UPFC). Este último é formado por uma combinação de conversores fonte de tensão em série e em derivação. Além de ser capaz de controlar as potências ativa e reativa em uma linha de transmissão, o mesmo pode simultaneamente regular a tensão em uma barra de corrente alternada (AKAGI; WATANABE & AREDES, 2007; HINGORANI & GYUGYI, 2000; WATANABE et al., 1998; YAZDANI & IRAVANI, 2010).

Os STATCOM são conversores eletrônicos de potência especialmente projetados para compensar potência reativa em seus terminais CA (HINGORANI & GYUGYI, 2000). Apesar de terem sido propostos para os sistemas de transmissão, observa-se um grande número de trabalhos onde estes compensadores são conectados nas redes elétricas de distribuição. Nestas aplicações, além de ser denominado compensador estático síncrono para distribuição (do inglês, *Distribution Static Synchronous Compensator*) (DSTATCOM), funções básicas como o aumento da margem de estabilidade e da capacidade de transmissão são substituídas pelo controle de tensão e correção do fator de potência da rede (SINGH; JAYAPRAKASH & KOTHARI, 2008). Encontram-se ainda trabalhos onde os DSTATCOM são também usados para compensar correntes desequilibradas consumidas por cargas desbalanceadas (AKAGI; WATANABE & AREDES, 2007).

Dentre os diferentes fatores responsáveis pelo sucesso dos DSTATCOM pode-se citar o desenvolvimento de transistor bipolar de porta isolada (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor*) (IGBT) com capacidade de comutar tensões e correntes elevadas, com frequências da ordem de alguns quilohertz. A utilização desses interruptores permite construir conversores fonte de tensão multiníveis que podem ser conectados diretamente nas redes de distribuição, sem a necessidade de transformadores (AKAGI,

2011; MALINOWSKI et al., 2010; RODRIGUEZ; LAI & PENG, 2002).

1.2 MOTIVAÇÃO

Independentemente da topologia do conversor fonte de tensão (do inglês, *Voltage Source Converter*) (VSC), quando os STATCOM estão com seus capacitores descarregados, uma corrente elevada é drenada da rede elétrica na qual são conectados, podendo danificar os interruptores semicondutores, além de provocar o mal funcionamento dos circuitos de proteção e interferência em equipamentos eletroeletrônicos (LARSSON; THORVALDSSON & AKESSON, 2002; MANOLAROU; KOSTAKIS & MANIAS, 2005; PETRY, 2012). Neste caso, o caminho para tal corrente é fornecido pelos diodos intrínsecos aos interruptores semicondutores do compensador estático, de forma que o VSC se comporta como um retificador a diodos. Além disso, a única limitação desta corrente são as impedâncias dos disjuntores, fusíveis, transformadores e as resistências e indutâncias parasitas da rede elétrica (LARSSON; THORVALDSSON & AKESSON, 2002; PETRY, 2012).

Em muitas situações envolvendo transitórios relacionados aos capacitores nos circuitos elétricos, reatores e resistores de pré-inserção são usados para limitar a corrente (CHAVES, 2007; MANOLAROU; KOSTAKIS & MANIAS, 2005; PINTO, 2010; ROCHA; ARAÚJO & NOVAIS, 2003). O peso e o tamanho físico de um reator de pré-inserção pode ser uma desvantagem, dependendo do valor da indutância e da corrente de operação (MANOLAROU; KOSTAKIS & MANIAS, 2005). Da mesma forma, o uso de resistores de pré-inserção pode se tornar inviável dependendo da potência requerida para o resistor, além da energia ser simplesmente dissipada.

Por outro lado, quando o capacitor CC do VSC está carregado, o tempo para que o barramento CC do conversor seja naturalmente desenergizado é geralmente muito grande. Deste modo, um procedimento de desenergização pode ser muito interessante para descarregar o capacitor CC para realizar uma manutenção, de forma que o compensador volte à operação normal no menor tempo possível (HASLER, 2014).

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A energização e desenergização do capacitor CC dos STATCOM não é um tema muito citado na literatura (HAN, 2006). Em (HAN et al., 2005, 2006; HAN, 2006), o processo de energização do capacitor CC de um STATCOM até o valor de pico da tensão da rede no ponto de conexão é definido como pré-carregamento.

Em (PETRY, 2012), são conectados resistores em série com os terminais CA de um retificador trifásico para limitar a corrente de energização do filtro CC de saída. Na Figura 1 é ilustrado o circuito de energização do retificador. Durante a energização os contatos Sw_1 , Sw_2 e Sw_3 são abertos, já em operação normal os três contatos são fechados.

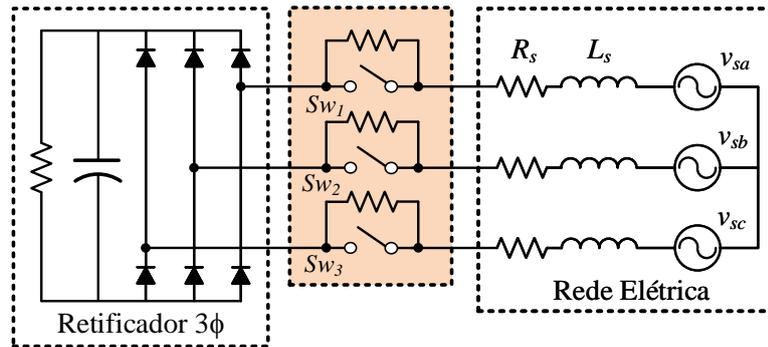


Figura 1: Topologia do circuito de energização de um retificador trifásico.

Uma estratégia similar foi proposta em (HAN et al., 2006; HAN, 2006), porém nestes dois exemplos, com objetivo de energizar o capacitor CC de um STATCOM. Na Figura 2 é ilustrado o circuito de energização do STATCOM.

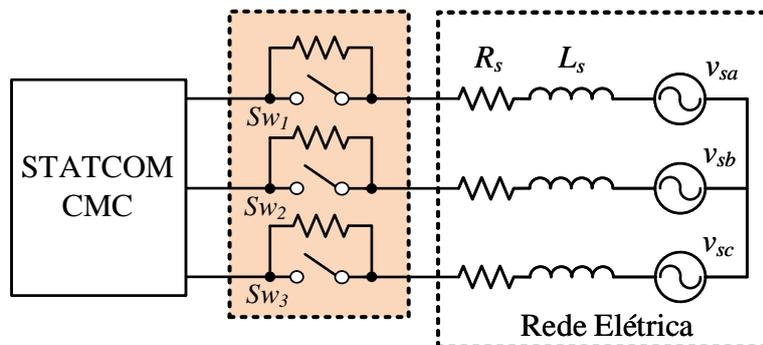


Figura 2: Topologia do circuito de energização de um STATCOM-CMC.

Numa patente publicada em 2002 (LARSSON; THORVALDSSON & AKESSON, 2002), a energização de um VSC trifásico é feita conectando um resistor em série com as bobinas secundárias do transformador de conexão. Na Figura 3 é ilustrado o circuito de energização do VSC. Durante a energização os contatos Sw_1 e Sw_2 são abertos e o contato Sw_3 é fechado. Já em operação normal os contatos Sw_1 e Sw_2 são fechados e o contados Sw_3 é aberto.

De maneira complementar, em (HASLER, 2014) é proposta uma estratégia para

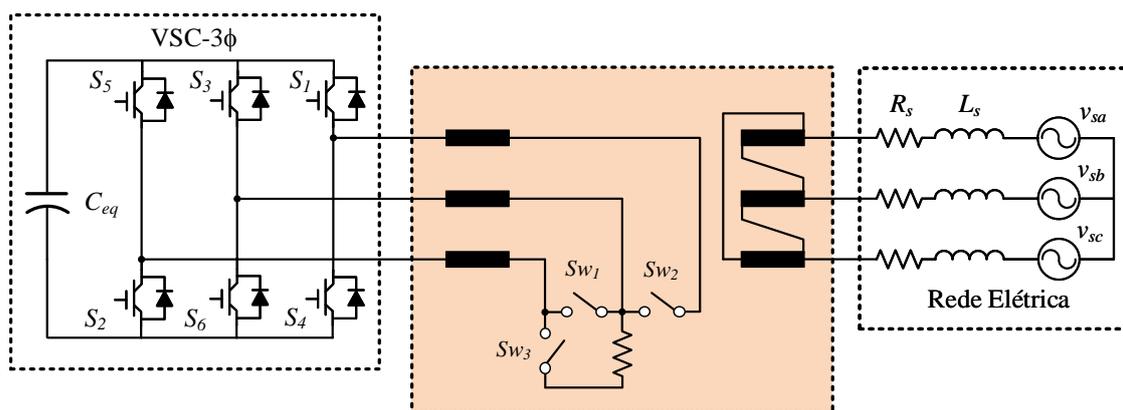


Figura 3: Topologia do circuito de energização de um VSC trifásico.

desenergizar um STATCOM, baseado em um VSC modular, usando resistores e chaves mecânicas de forma que a energia dos capacitores seja dissipada nos resistores. Na Figura 4 é ilustrado o circuito de desenergização do STATCOM. Em operação normal os contatos $Sw_1 - Sw_6$ são fechados e durante a desenergização os IGBTs são comutados de forma a desenergizar os capacitores, mantendo os contatos $Sw_1 - Sw_6$ abertos.

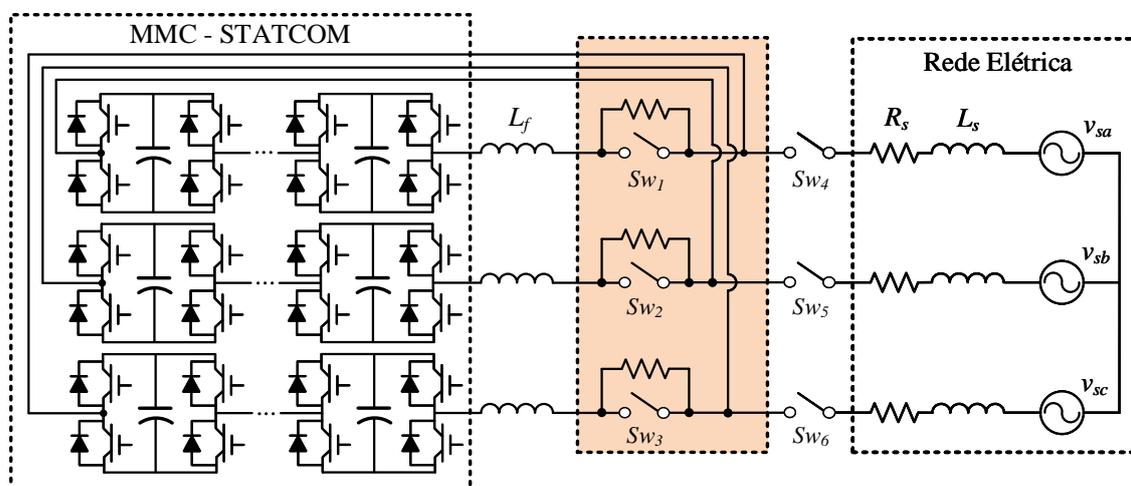


Figura 4: Topologia do circuito de desenergização de um STATCOM-MMC.

Em (RIBEIRO et al., 2014), o pré-carregamento do capacitor CC de um FAP foi feito de maneira manual através de um controle em malha aberta. Já em (SCHAUDER et al., 1998), o capacitor CC de um STATCOM foi energizado por uma fonte CC auxiliar conectada em paralelo com o barramento CC do conversor. Na Figura 5 é ilustrado o circuito de energização do STATCOM. Durante a energização os contatos $Sw_1 - Sw_3$ são abertos e os contatos Sw_4 e Sw_5 são fechados. Já em operação normal os contatos $Sw_1 - Sw_3$ são mantidos fechados e os contatos Sw_4 e Sw_5 abertos.

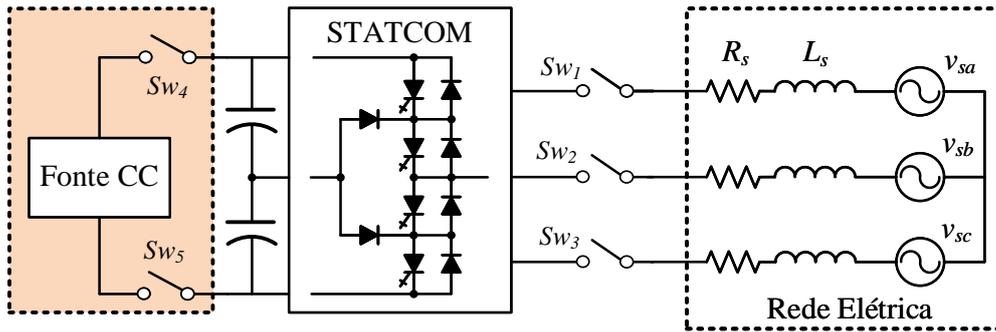


Figura 5: Topologia do circuito de energização de um STATCOM utilizando uma fonte CC de alta tensão.

Após o pré-carregamento do capacitor CC do STATCOM, em (HAN et al., 2005, 2006; HAN, 2006), a malha de controle de corrente do conversor foi utilizada para elevar a tensão do barramento CC até o valor de operação. Já em (RIBEIRO et al., 2014), foi utilizado um esquema de controle em malha fechada, em que foi aplicada uma taxa de crescimento da tensão do capacitor para elevá-la ao valor desejado.

1.4 OBJETIVOS

Quando se trata de conversores de maior potência e níveis de tensão mais elevados, o uso de resistores, indutores ou transformadores para energizar ou desenergizar os compensadores estáticos pode se tornar inviável técnica ou economicamente (MANOLAROU; KOSTAKIS & MANIAS, 2005). Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é apresentar um circuito e um método para energizar e desenergizar o capacitor CC de um DSTATCOM.

O processo de carga do capacitor CC do DSTATCOM até o valor de pico da tensão da rede elétrica CA é denominado pré-energização síncrona. Já o processo de descarga do capacitor, do valor de pico da tensão da rede até zero é denominado desenergização síncrona. Para tanto, a modelagem matemática da corrente pelo circuito equivalente é apresentada e os métodos de Newton-Raphson e aproximação linear por partes (do inglês, *Piecewise Linear*) (PWL) são utilizados na metodologia proposta, de modo que um processador digital de sinais (do inglês, *Digital Signal Processor*) (DSP) seja capaz de fornecer os sinais de comutação dos interruptores do circuito. Para validação da metodologia proposta, são apresentados resultados de simulação de um DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV conectado a uma rede elétrica CA. Também são apresentados resultados de simulação de um DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V para comparação com

os resultados experimentais de um protótipo de laboratório.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 são apresentadas as estratégias de controle e as modelagens matemáticas do DSTATCOM. Os reguladores do sistema de controle do DSTATCOM são projetados considerando tais modelagens matemáticas e as análises dos diagramas de Bode das funções de transferência dos sistemas compensados. Para tanto, um DSTATCOM com potência nominal de 10 MVA conectado a uma rede elétrica com tensão de 23,1 kV é modelado. Por fim, são apresentados alguns resultados de simulação para validação dos controladores projetados.

No Capítulo 3 são apresentadas as propostas dos circuitos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM. A equação da corrente dos circuitos propostos é solucionada utilizando o método de Newton-Raphson, para que o valor de pico da corrente seja controlado durante a pré-energização e a desenergização do compensador. Além disso, para reduzir o esforço computacional, é feita uma aproximação linear por partes da curva característica que relaciona a tensão do barramento CC com os ângulos de disparo dos interruptores dos circuitos propostos. No final deste capítulo são apresentados alguns resultados de simulação dos processos síncronos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM modelado no Capítulo 2.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais e de simulação de um DSTATCOM de pequena escala, com potência de 3,8 kVA e conectado a uma rede elétrica com tensão de 220 V.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais deste trabalho, com enfoque na estratégia proposta para realizar os processos de pré-energização e desenergização de um DSTATCOM. Por fim, são feitas algumas propostas para trabalhos futuros e as publicações resultantes desta dissertação são listadas.

2 O DSTATCOM

O STATCOM é um conversor estático de potência que tem como principal objetivo trocar potência reativa com a rede elétrica. Inicialmente este equipamento foi proposto para aplicações nos sistemas de transmissão visando aumentar sua capacidade de transmissão de energia. Porém, este compensador pode ser também conectado nos sistemas de distribuição. Neste caso, o conversor é comumente chamado de DSTATCOM e é usado para controlar a tensão e regular o fator de potência no ponto de acoplamento comum (PAC). (CAVALIERE et al., 2003; YAZDANI & IRAVANI, 2010).

Na Figura 6 é mostrado um DSTATCOM conectado à rede elétrica de distribuição. O DSTATCOM é formado basicamente por um VSC, filtros passivos de interface com a rede elétrica e seus sistemas de controle. Por sua vez, o VSC é formado por um banco de capacitores e interruptores semicondutores. Devido às características elétricas do DSTATCOM modelado neste trabalho, como potência nominal e frequência de comutação, os interruptores são baseados em IGBT. Além disso, para que seja possível suportar o nível de tensão requerido, cada IGBT da Figura 6 representa uma válvula formada por vários IGBTs conectados em série.

A tensão do barramento CC do DSTATCOM é controlada por uma malha que regula o fluxo de potência ativa entre o conversor e a rede elétrica. Já a tensão do PAC é controlada pelo sinal de referência I_q^* . Os sinais de saída dos controladores de corrente são usados para gerar os pulsos de disparo dos IGBTs através de uma estratégia de modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*) (PWM) (HART, 2011; HINGORANI & GYUGYI, 2000; TEODORESCU; LISERRE & RODRIGUEZ, 2011; YAZDANI & IRAVANI, 2010).

A rede elétrica de distribuição foi modelada por uma fonte de tensão trifásica ideal ($v_{s,abc}$), com frequência de 60 Hz, e por uma impedância formada por uma resistência (R_s) e uma indutância (L_s).

Na Figura 7 é mostrada a topologia do filtro de interface do DSTATCOM com

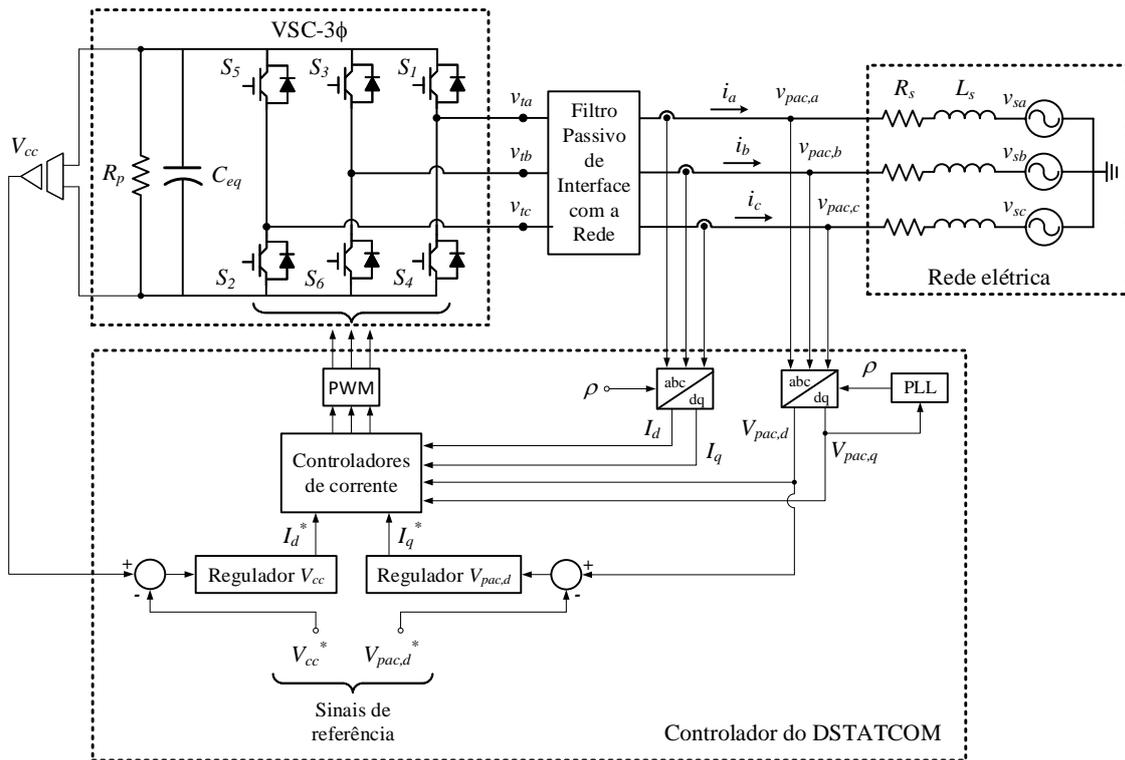


Figura 6: Topologia de um compensador estático síncrono para distribuição conectado a uma rede elétrica e diagrama do sistema de controle.

a rede elétrica, onde R_f é a resistência série do filtro, L_f é a indutância do filtro, C_f é a capacitância do filtro e $R_{f,c}$ é a soma das resistências do capacitor (C_f) e de amortecimento do filtro. A função deste filtro passa baixas é atenuar as componentes harmônicas presentes nas correntes terminais do DSTATCOM, devido ao fato das tensões terminais do compensador ($v_{t,abc}$) serem chaveadas.

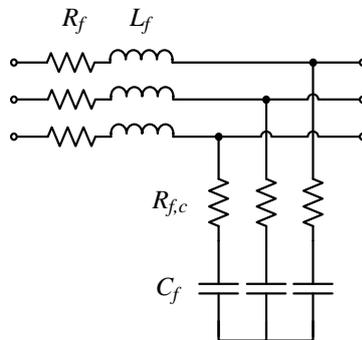


Figura 7: Topologia do filtro de interface de segunda ordem.

Neste capítulo, as modelagens matemáticas do DSTATCOM são abordadas e os

compensadores do sistema de controle do DSTATCOM projetados. No final deste capítulo são apresentados alguns resultados de simulação para validação dos controladores projetados.

2.1 A ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO DSTATCOM

A estrutura de controle do DSTATCOM utilizada neste trabalho é amplamente estudada e consagrada. Esta consiste em uma malha interna de corrente e uma malha externa de tensão. A malha interna, que regula a corrente nos terminais do conversor, deve ter uma constante de tempo menor que as constantes de tempo das malhas externas, que regulam a tensão do barramento CC e a tensão do PAC. Esta estrutura de controle é denominada controle no modo de corrente (do inglês, *Current Mode Control*) (CMC) e tem uma característica robusta com relação às variações dos parâmetros do sistema, além de prover proteção contra sobrecorrentes (ALMEIDA, 2011).

Devido à facilidade no projeto dos reguladores, que podem ser do tipo proporcional-integral (PI), neste trabalho a análise matemática do DSTATCOM e o projeto dos controladores são realizados no sistema de coordenadas síncrono, em que as variáveis senoidais se tornam estacionárias em regime permanente (ALMEIDA, 2011; DUARTE; OLIVEIRA & BARBOSA, 2016; YAZDANI & IRAVANI, 2010).

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO LADO CA DO DSTATCOM

O principal objetivo do DSTATCOM mostrado na Figura 6 é controlar a potência reativa trocada com a rede elétrica, através das correntes i_{abc} . Deste modo, desprezando as componentes harmônicas das tensões e correntes, geradas pela comutação dos interruptores do conversor, a dinâmica das correntes (i_{abc}) do circuito elétrico da Figura 6 é dada por (ALMEIDA, 2011; YAZDANI & IRAVANI, 2010):

$$\begin{cases} L_f \frac{di_a}{dt} = -R_{eq}i_a + v_{ta} - v_{pac,a} \\ L_f \frac{di_b}{dt} = -R_{eq}i_b + v_{tb} - v_{pac,b} \\ L_f \frac{di_c}{dt} = -R_{eq}i_c + v_{tc} - v_{pac,c} \end{cases}, \quad (2.1)$$

onde $v_{t,abc}$ são as tensões instantâneas nos terminais do DSTATCOM em (V), $v_{pac,abc}$ são as tensões instantâneas no PAC em (V), i_{abc} são as correntes de linha instantâneas

do DSTATCOM em (A), L_f é a indutância do filtro de interface em (H) e R_{eq} é a soma da resistência que modela as perdas nos interruptores com a resistência do filtro de interface em (Ω).

Considerando que as tensões instantâneas no PAC são equilibradas e simétricas, tem-se:

$$\begin{cases} v_{pac,a} = \hat{V}_{pac} \cos(\omega_0 t + \theta_0) \\ v_{pac,b} = \hat{V}_{pac} \cos\left(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) , \\ v_{pac,c} = \hat{V}_{pac} \cos\left(\omega_0 t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.2)$$

onde \hat{V}_{pac} , ω_0 e θ_0 são o valor de pico, a frequência angular e o ângulo de fase das tensões no PAC em (V), (rad/s) e (rad), respectivamente.

Aplicando a transformada de Park, apresentada no Apêndice A, em (2.1) e (2.2), pode-se escrever (AKAGI; WATANABE & AREDES, 2007; ALMEIDA, 2011; YAZDANI & IRAVANI, 2010):

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\left(\frac{R_{eq}}{L_f}\right) i_d + \omega i_q + \left(\frac{1}{L_f}\right) v_{td} - \left(\frac{1}{L_f}\right) v_{pac,d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\left(\frac{R_{eq}}{L_f}\right) i_q - \omega i_d + \left(\frac{1}{L_f}\right) v_{tq} - \left(\frac{1}{L_f}\right) v_{pac,q} , \\ \frac{d\rho}{dt} = \omega \end{cases} \quad (2.3)$$

onde ω e ρ são a frequência angular e o ângulo rastreados pelo circuito de sincronismo em (rad/s) e (rad), respectivamente.

Em (2.3), i_d , i_q e ρ são as variáveis de estado, v_{td} , v_{tq} e ω são as variáveis de controle e as tensões no PAC são dadas por:

$$\begin{cases} v_{pac,d} = \hat{V}_{pac} \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \\ v_{pac,q} = \hat{V}_{pac} \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \end{cases} . \quad (2.4)$$

Nota-se que há um acoplamento cruzado das correntes i_d e i_q em (2.3) e que uma estratégia de desacoplamento deve ser usada na malha de controle de corrente do DSTATCOM. Além disso, um circuito de sincronismo deve ser utilizado para rastrear a frequência angular e o ângulo de fase das tensões do PAC de forma que $\rho = (\omega_0 t + \theta_0)$,

em regime permanente.

2.3 O CIRCUITO DE SINCRONISMO

Considerando que será utilizada uma estratégia de controle do DSTATCOM nas coordenadas síncronas dq , como discutido na Seção 2.2, um circuito de sincronismo deve ser usado para que as tensões e correntes do conversor sejam sincronizadas com as tensões do PAC. Deste modo, neste trabalho é utilizado um circuito PLL baseado no sistema de coordenadas síncrono (do inglês, *Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop*) (SRF-PLL) devido à sua simplicidade e da consideração de que o sistema está equilibrado e simétrico.

Da modelagem do lado CA do DSTATCOM nas coordenadas dq (ALMEIDA, 2011; YAZDANI & IRAVANI, 2010), tem-se que as tensões no ponto de acoplamento comum podem ser escritas como:

$$\begin{cases} v_{pac,d} = \hat{V}_{pac} \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \\ v_{pac,q} = \hat{V}_{pac} \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \end{cases}, \quad (2.5)$$

onde $\rho = (\omega t + \theta)$ é o ângulo rastreado pelo circuito de sincronismo (do inglês, *Phase-Locked Loop*) (PLL), em que ω e θ são a frequência angular e o ângulo de fase do sistema de coordenadas dq em (rad/s) e (rad), respectivamente.

Quando a frequência angular e o ângulo de fase do sistema de coordenadas dq forem iguais às do ponto de acoplamento comum, tem-se:

$$\begin{cases} v_{pac,d} = \hat{V}_{pac} \\ v_{pac,q} = 0 \end{cases}. \quad (2.6)$$

Deste modo, o controlador do circuito de sincronismo deve ser projetado para que, em regime permanente, a tensão $v_{pac,q}$ seja nula (ALMEIDA, 2011; YAZDANI & IRAVANI, 2010). Na Figura 8 é mostrado o diagrama esquemático do SRF-PLL, em que $C_{pll}(p)$ é uma função de transferência linear (compensador do PLL) e $p = d(\cdot)/dt$ é o operador diferencial (ALMEIDA, 2011; YAZDANI & IRAVANI, 2010). Além disso, a saída (ρ) do integrador representado na Figura 8 deve ser zerada sempre que a mesma atingir 2π rad.

A partir da Figura 8 e de (2.5) pode-se escrever:

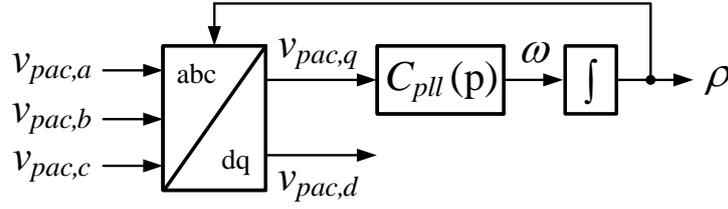


Figura 8: Diagrama esquemático do SRF-PLL.

$$\frac{d\rho}{dt} = C_{pll}(p)\hat{V}_{pac}\sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho). \quad (2.7)$$

Considerando que o PLL rastreia o ângulo de fase e a frequência das tensões do PAC, tem-se que $(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \approx 0$ e $\sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \approx (\omega_0 t + \theta_0 - \rho)$. Deste modo, (2.7) pode ser reescrita como se segue:

$$\frac{d\rho}{dt} = C_{pll}(p)\hat{V}_{pac}(\omega_0 t + \theta_0 - \rho). \quad (2.8)$$

Na Figura 9 é mostrado o diagrama de blocos relativo à (2.8), onde $Y(s)$ e $\Psi(s)$ são as transformadas de Laplace de ρ e $\psi = (\omega_0 t + \theta_0)$, respectivamente.

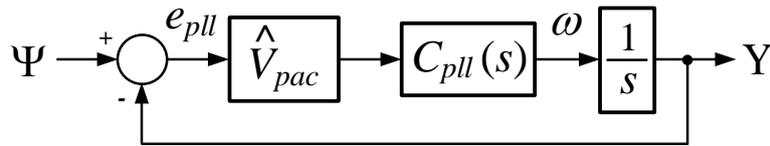


Figura 9: Diagrama de blocos do SRF-PLL linear.

A função de transferência do controlador do tipo PI, escolhido para compor a malha de controle do circuito de sincronismo, é dada por:

$$C_{pll}(s) = \frac{K_{p,pll}s + K_{i,pll}}{s}, \quad (2.9)$$

onde $K_{p,pll}$ e $K_{i,pll}$ são os ganhos proporcional e integral do controlador $C_{pll}(s)$, respectivamente.

Da Figura 9 e de (2.9), chega-se às seguintes funções de transferências de malha aberta e de malha fechada para o circuito de sincronismo, respectivamente:

$$G_{pll}(s) = \frac{K_{p,pll}\hat{V}_{pac}s + K_{i,pll}\hat{V}_{pac}}{s^2} \quad (2.10)$$

e,

$$H_{pll}(s) = \frac{K_{p,pll}\hat{V}_{pac}s + K_{i,pll}\hat{V}_{pac}}{s^2 + K_{p,pll}\hat{V}_{pac}s + K_{i,pll}\hat{V}_{pac}}. \quad (2.11)$$

A forma canônica de uma função de transferência de segunda ordem é dada por:

$$H_2(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (2.12)$$

onde ξ e ω_n são o fator de amortecimento e a frequência natural não amortecida em (Np/s) e (rad/s), respectivamente.

Comparando (2.11) e (2.12), os ganhos do regulador C_{pll} são dados por:

$$K_{p,pll} = \frac{2\xi\omega_n}{\hat{V}_{pac}} \quad (2.13)$$

e,

$$K_{i,pll} = \frac{\omega_n^2}{\hat{V}_{pac}}. \quad (2.14)$$

2.4 O CONTROLE DAS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA

Considerando que o sistema da Figura 6 é equilibrado e simétrico, as potências ativa e reativa do DSTATCOM são dadas por:

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} (v_{pac,d}i_d + v_{pac,q}i_q) \\ q = \frac{3}{2} (-v_{pac,d}i_q + v_{pac,q}i_d) \end{cases}, \quad (2.15)$$

onde $v_{pac,d}$ e $v_{pac,q}$ são as tensões do PAC de eixo direto e em quadratura em (V) e i_d e i_q são as correntes do DSTATCOM de eixo direto e em quadratura em (A). O fator (3/2) foi introduzido nas relações anteriores para que as potências no sistema de coordenadas dq fossem iguais às potências no sistema de coordenadas abc .

Quando o PLL estiver em regime permanente ($v_{pac,q} = 0$), (2.15) pode ser reescrita

da seguinte forma:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}V_{pac,d}I_d \\ Q = -\frac{3}{2}V_{pac,d}I_q \end{cases}. \quad (2.16)$$

Nota-se em (2.16) que as potências ativa e reativa podem ser controladas de maneira totalmente independente por I_d e I_q , respectivamente, utilizando a malha interna de controle de corrente do DSTATCOM (YAZDANI & IRAVANI, 2010).

2.5 CONTROLE NO MODO DE CORRENTE

Assumindo que o circuito de sincronismo rastreia a frequência angular e o ângulo de fase das tensões do PAC, a dinâmica do lado de corrente alternada do DSTATCOM é dada por:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} = L_f \omega_0 i_q - R_{eq} i_d + v_{td} - v_{pac,d} \\ L_f \frac{di_q}{dt} = -L_f \omega_0 i_d - R_{eq} i_q + v_{tq} - v_{pac,q} \end{cases}. \quad (2.17)$$

Em (2.17), i_d e i_q são as variáveis de estado, v_{td} e v_{tq} são as variáveis de controle e $v_{pac,d}$ e $v_{pac,q}$ são os distúrbios. Além disso, as tensões terminais do conversor são dadas respectivamente por (YAZDANI & IRAVANI, 2010):

$$\begin{cases} v_{td}(t) = m_d(t) \left(\frac{V_{cc}}{2} \right) \\ v_{tq}(t) = m_q(t) \left(\frac{V_{cc}}{2} \right) \end{cases}, \quad (2.18)$$

onde V_{cc} é a tensão do barramento CC em (V) e m_d e m_q são os índices de modulação nas coordenadas síncronas dq .

O sistema de equações descrito em (2.17) tem um acoplamento cruzado de corrente que deve ser desacoplado pela malha de controle de corrente. Para desacoplar as correntes i_d e i_q e adicionar os sinais *feed-forward* ($v_{pac,d}$ e $v_{pac,q}$) os índices de modulação são dados por:

$$\begin{cases} m_d(t) = \left(\frac{2}{V_{cc}}\right) (-\omega_0 L_f i_q + v_{pac,d} + u_d) \\ m_q(t) = \left(\frac{2}{V_{cc}}\right) (\omega_0 L_f i_d + v_{pac,q} + u_q) \end{cases}, \quad (2.19)$$

onde u_d e u_q são as novas variáveis de controle (YAZDANI & IRAVANI, 2010).

Substituindo (2.19) em (2.18) e os resultados em (2.17) chega-se às seguintes relações:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} = -R_{eq} i_d + u_d \\ L_f \frac{di_q}{dt} = -R_{eq} i_q + u_q \end{cases}. \quad (2.20)$$

Nos sistemas lineares de primeira ordem desacoplados, dados por (2.20), i_d e i_q são controlados por u_d e u_q , respectivamente (YAZDANI & IRAVANI, 2010). Na Figura 10 é mostrado o diagrama de blocos da malha de controle de corrente do DSTATCOM que permite o controle independente das correntes i_d e i_q . As malhas fechadas desacopladas de controle de corrente são mostradas nos diagramas de blocos simplificados da Figura 11.

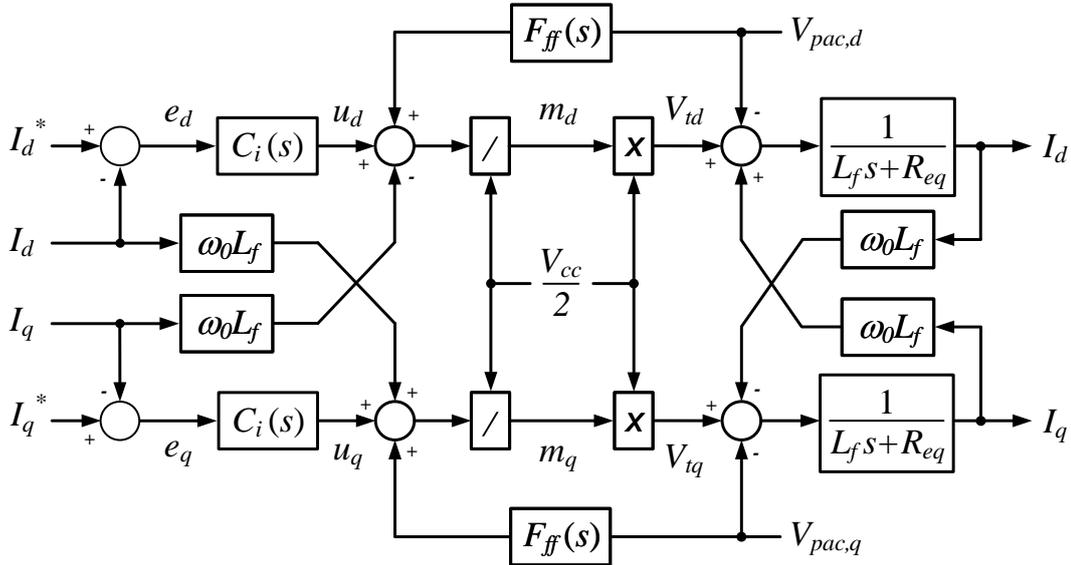
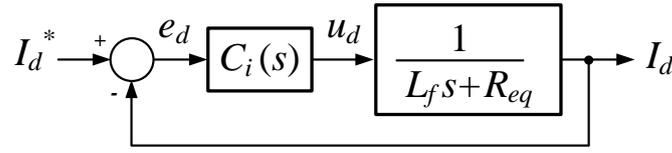
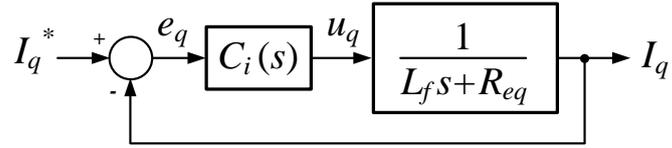


Figura 10: Diagrama de blocos da malha de controle de corrente do conversor.

Devido à aplicação da transformada de Park nas variáveis senoidais do DSTATCOM, estas se tornam constantes em regime permanente, permitindo a utilização de reguladores do tipo PI para controlar as correntes do conversor. Como a malha de controle de



(a)



(b)

Figura 11: Diagrama de blocos das malhas de controle de corrente desacopladas: (a) Eixo direto, (b) eixo em quadratura.

corrente de eixo direto é igual a malha de controle de corrente de eixo em quadratura, a função de transferência do controlador escolhido, para ambas as malhas, é dada por:

$$C_i(s) = \frac{K_{p,i}s + K_{i,i}}{s}, \quad (2.21)$$

onde $C_i(s)$ é o controlador PI das malhas de controle de corrente e $K_{p,i}$ e $K_{i,i}$ são os ganhos proporcional e integral do controlador $C_i(s)$ em (V/A) e (V/As), respectivamente.

A função de transferência de malha aberta da Figura 11 é dada por:

$$G_i(s) = \left(\frac{K_{p,i}}{L_f s} \right) \left(\frac{s + \frac{K_{i,i}}{K_{p,i}}}{s + \frac{R_{eq}}{L_f}} \right). \quad (2.22)$$

A magnitude e a fase de $G_i(s)$ começam a decair em uma frequência relativamente baixa, devido ao polo da planta localizado próximo à origem, em $s = (-R_{eq}/L_f)$ (YAZDANI & IRAVANI, 2010). Deste modo, escolhendo o zero do compensador $C_i(s)$ de forma a cancelar o polo da planta, $G_i(s)$ é reescrita por:

$$G_i(s) = \frac{K_{p,i}}{L_f s}. \quad (2.23)$$

Conseqüentemente, a função de transferência de malha fechada será:

$$H_i(s) = \frac{I_d(s)}{I_d^*(s)} = \frac{I_q(s)}{I_q^*(s)} = \frac{1}{\tau_i s + 1}, \quad (2.24)$$

onde $\tau_i = (L_f/K_{p,i})$ é a constante de tempo escolhida para o sistema de malha fechada.

Deste modo, os ganhos proporcional e integral do regulador de corrente ($C_i(s)$) são dados respectivamente por:

$$K_{p,i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (2.25)$$

e,

$$K_{i,i} = \frac{R_{eq}}{\tau_i}. \quad (2.26)$$

2.6 O CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO CC

Em (ALMEIDA, 2011; ALMEIDA et al., 2012), foi feita uma análise de pequenos sinais da dinâmica da tensão do barramento CC de um VSC, usado para realizar a interface entre um sistema de geração fotovoltaica e uma rede elétrica de distribuição. Já em (YAZDANI & IRAVANI, 2010), uma análise similar foi feita para um DSTATCOM. Para tanto, pode-se aplicar a lei da conservação da energia, de forma que as potências nos terminais CC e CA do DSTATCOM da Figura 6 sejam iguais. Considerando que as tensões e correntes do lado CA do DSTATCOM são equilibradas e simétricas, esta dinâmica é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{dV_{cc}^2}{dt} = & -\frac{3}{C_{eq}} (v_{pac,d}i_d + v_{pac,q}i_q) - \frac{3L_f}{2C_{eq}} \left(\frac{di_d^2}{dt} + \frac{di_q^2}{dt} \right) - \\ & -\frac{2R_{eq}}{C_{eq}} (i_d^2 + i_q^2) - \left(\frac{2}{C_{eq}R_p} \right) V_{cc}^2, \end{aligned} \quad (2.27)$$

onde V_{cc} é a tensão do barramento CC em (V) e R_p é a resistência de um resistor em paralelo com o capacitor C_{eq} , que modela os resistores de equalização das tensões dos capacitores do barramento CC, em (Ω).

Considerando pequenas perturbações em torno de um ponto de operação, as variáveis assumem a forma $x = (\bar{X} + \tilde{x})$, em que \bar{X} representa o valor de estado permanente e \tilde{x} representa pequenas perturbações em torno do ponto de operação. Desta forma,

desprezando a multiplicação de duas variáveis de pequenas perturbações (\tilde{x}), o modelo de pequenos sinais devido à linearização de (2.27) é dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{cc}^2}{dt} = & -\frac{3}{C_{eq}} (\bar{V}_{pac,d}\tilde{i}_d + \tilde{v}_{pac,d}\bar{I}_d + \bar{V}_{pac,q}\tilde{i}_q + \tilde{v}_{pac,q}\bar{I}_q) - \\ & -\frac{3L_f}{C_{eq}} \left(\bar{I}_d \frac{d\tilde{i}_d}{dt} + \bar{I}_q \frac{d\tilde{i}_q}{dt} \right) - \frac{2R_{eq}}{C_{eq}} (2\bar{I}_d\tilde{i}_d + 2\bar{I}_q\tilde{i}_q) - \left(\frac{2}{C_{eq}R_p} \right) v_{cc}^2. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Em regime permanente, as derivadas da parcela que modela a influência do indutor do filtro de acoplamento na dinâmica da tensão do barramento CC serão nulas. Além disso, a tensão de eixo em quadratura do PAC também será zero ($\bar{V}_{pac,q} = 0$). Desta forma, considerando que a tensão da rede elétrica não varia ($\tilde{v}_{pac,d} = \tilde{v}_{pac,q} = 0$) e fazendo $\bar{V}_{pac,d} = V_{pac,d0}$ (ALMEIDA, 2011), (2.28) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{dv_{cc}^2}{dt} = -\frac{3}{C_{eq}} (V_{pac,d0}\tilde{i}_d) - \frac{2R_{eq}}{C_{eq}} (2\bar{I}_d\tilde{i}_d + 2\bar{I}_q\tilde{i}_q) - \left(\frac{2}{C_{eq}R_p} \right) v_{cc}^2. \quad (2.29)$$

Assumindo que a resistência R_{eq} é muito menor que a impedância do DSTATCOM em pu, o resistor R_{eq} pode ser desprezado e (2.29) torna-se:

$$\frac{dv_{cc}^2}{dt} = -\frac{3}{C_{eq}} (V_{pac,d0}\tilde{i}_d) - \left(\frac{2}{C_{eq}R_p} \right) v_{cc}^2. \quad (2.30)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (2.30) a função de transferência da planta é dada por:

$$\frac{\tilde{V}_{cc}^2(s)}{\tilde{I}_d(s)} = -\frac{\left(\frac{3V_{pac,d0}}{C_{eq}} \right)}{s + \left(\frac{2}{C_{eq}R_p} \right)}. \quad (2.31)$$

Desprezando as perdas do lado CC do DSTATCOM, a função de transferência simplificada entre a tensão do barramento CC e a corrente de eixo direto é dada por (YAZDANI & IRAVANI, 2010):

$$\frac{\tilde{V}_{cc}^2(s)}{\tilde{I}_d(s)} = \frac{-3V_{pac,d0}}{sC_{eq}}. \quad (2.32)$$

Na Figura 12 é mostrado o diagrama de blocos da malha de controle da tensão do barramento CC do DSTATCOM.

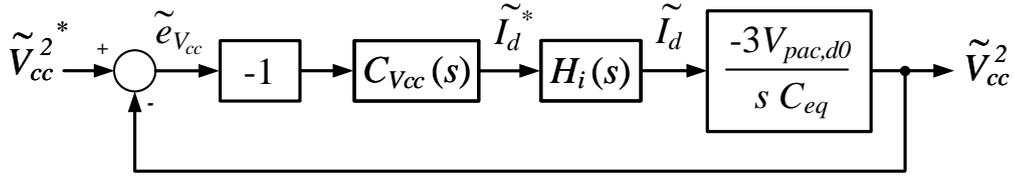


Figura 12: Diagrama de blocos da malha de controle da tensão do barramento CC.

Considerando que o regulador da malha de controle de corrente $C_i(s)$ tem uma constante de tempo muito menor do que a constante de tempo do controlador da tensão do barramento CC $C_{V_{cc}}(s)$, $H_i(s)$ pode ser considerado um ganho unitário e a função de transferência de malha aberta do diagrama de blocos da Figura 12 é dada por:

$$G_{V_{cc}}(s) = C_{V_{cc}}(s) \frac{3V_{pac,d0}}{sC_{eq}}. \quad (2.33)$$

Utilizando um controlador do tipo PI para controlar a tensão do barramento CC, (2.33) torna-se:

$$G_{V_{cc}}(s) = \frac{(3V_{pac,d0}K_{p,V_{cc}})s + 3V_{pac,d0}K_{i,V_{cc}}}{C_{eq}s^2}, \quad (2.34)$$

e a função de transferência de malha fechada é dada por:

$$H_{V_{cc}}(s) = \frac{\left(\frac{3V_{pac,d0}K_{p,V_{cc}}}{C_{eq}}\right)s + \frac{3V_{pac,d0}K_{i,V_{cc}}}{C_{eq}}}{s^2 + \left(\frac{3V_{pac,d0}K_{p,V_{cc}}}{C_{eq}}\right)s + \frac{3V_{pac,d0}K_{i,V_{cc}}}{C_{eq}}}. \quad (2.35)$$

Comparando (2.35) com a forma canônica da função de transferência de segunda ordem ($H_2(s)$), os ganhos do controlador $C_{V_{cc}}$ são dados por:

$$K_{p,V_{cc}} = \frac{2\xi\omega_n C_{eq}}{3V_{pac,d0}} \quad (2.36)$$

e,

$$K_{i,V_{cc}} = \frac{C_{eq}\omega_n^2}{3V_{pac,d0}}, \quad (2.37)$$

onde ξ é o fator de amortecimento e ω_n é a frequência natural não amortecida em (Np/s) e (rad/s), respectivamente.

2.7 O CONTROLE DA TENSÃO DO PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM

Um modelo de pequenos sinais da dinâmica do lado de corrente alternada de um STATCOM foi feito em (YAZDANI & IRAVANI, 2010), para que se possa projetar o regulador do sistema de controle da tensão do PAC. Na Figura 13 é mostrada a topologia de um sistema composto por um DSTATCOM conectado à rede elétrica e às cargas.

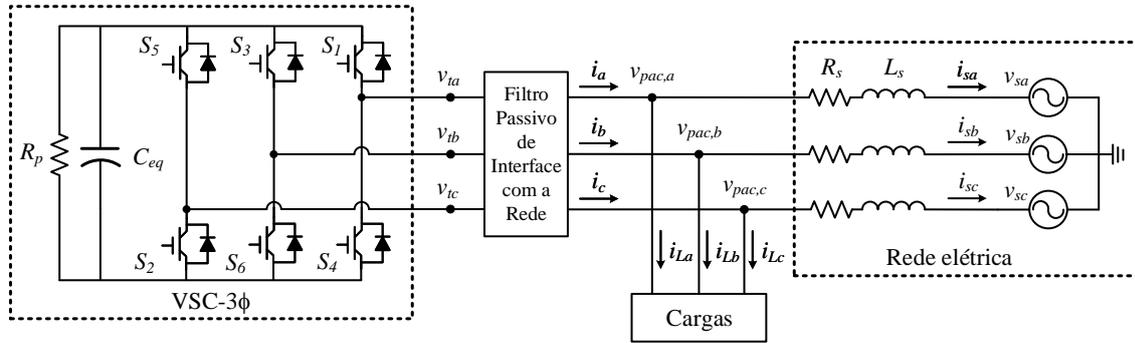


Figura 13: Topologia de um DSTATCOM conectado às cargas e à rede elétrica.

Considerando o circuito da Figura 13, as relações entre as tensões e correntes sobre a impedância da rede e as relações das correntes no PAC são dadas respectivamente por:

$$\begin{cases} v_{pac,a} = L_s \frac{di_{sa}}{dt} + R_s i_{sa} + v_{sa} \\ v_{pac,b} = L_s \frac{di_{sb}}{dt} + R_s i_{sb} + v_{sb} \\ v_{pac,c} = L_s \frac{di_{sc}}{dt} + R_s i_{sc} + v_{sc} \end{cases} \quad (2.38)$$

e,

$$\begin{cases} i_{sa} = i_a - i_{La} \\ i_{sb} = i_b - i_{Lb} \\ i_{sc} = i_c - i_{Lc} \end{cases} \quad (2.39)$$

onde L_s é a indutância da rede em (H), R_s é a resistência da rede em (Ω) e $i_{s,abc}$, $i_{L,abc}$ e i_{abc} são as correntes da rede elétrica, das cargas e do DSTATCOM, respectivamente, em (A).

Aplicando a transformada de Park (Apêndice A) em (2.38) e (2.39), e considerando que o DSTATCOM é sincronizado com a rede CA através de um PLL, pode-se escrever (AKAGI; WATANABE & AREDES, 2007; YAZDANI & IRAVANI, 2010):

$$\begin{cases} v_{pac,d} = L_s \frac{di_{sd}}{dt} - L_s \omega i_{sq} + R_s i_{sd} + \hat{V}_s \cos(\omega_0 t + \phi_0 - \rho) \\ v_{pac,q} = L_s \frac{di_{sq}}{dt} + L_s \omega i_{sd} + R_s i_{sq} + \hat{V}_s \sin(\omega_0 t + \phi_0 - \rho) \\ \omega = \frac{d\rho}{dt} \end{cases} \quad (2.40)$$

e,

$$\begin{cases} i_{sd} = i_d - i_{Ld} \\ i_{sq} = i_q - i_{Lq} \end{cases}, \quad (2.41)$$

onde ω e ρ são a frequência angular e o ângulo rastreados pelo PLL em (rad/s) e (rad), respectivamente; e ω_0 , ϕ_0 e \hat{V}_s são a frequência angular, o ângulo de defasagem e o valor de pico da tensão da rede elétrica em (rad/s), (rad) e (V), respectivamente.

O sistema descrito por (2.40) é não linear e ω é uma variável dinâmica que depende do ponto de operação (YAZDANI & IRAVANI, 2010). Linearizando (2.40) em torno de um ponto de operação as variáveis assumem a forma $x = \bar{X} + \tilde{x}$, em que \bar{X} representa o valor de estado permanente e \tilde{x} representa pequenas perturbações em torno do ponto de operação. Além disso, tem-se que:

$$\begin{cases} (\omega_0 t + \phi_0 - \rho) = -(\rho_0 + \tilde{\rho}) \\ \omega = \omega_0 + \tilde{\omega} \end{cases}, \quad (2.42)$$

onde ρ_0 é o valor inicial do ângulo ρ , em (rad).

Considerando que em regime permanente ($v_{pac,q} = 0$) e que ($\tilde{\rho} \ll 1$) (YAZDANI & IRAVANI, 2010), as equações de regime permanente e de pequenos sinais são dadas respectivamente por:

$$\begin{cases} \bar{V}_{pac,d} = -L_s\omega_0\bar{I}_{sq} + R_s\bar{I}_{sd} + \hat{V}_s \cos(\rho_0) \\ 0 = L_s\omega_0\bar{I}_{sd} + R_s\bar{I}_{sq} - \hat{V}_s \sin(\rho_0) \end{cases} \quad (2.43)$$

e,

$$\begin{cases} \tilde{v}_{pac,d} = L_s \frac{d\tilde{i}_{sd}}{dt} - L_s\omega_0\tilde{i}_{sq} - L_s\bar{I}_{sq}\tilde{\omega} + R_s\tilde{i}_{sd} - \hat{V}_s \sin(\rho_0)\tilde{\rho} \\ \tilde{v}_{pac,q} = L_s \frac{d\tilde{i}_{sq}}{dt} + L_s\omega_0\tilde{i}_{sd} + L_s\bar{I}_{sd}\tilde{\omega} + R_s\tilde{i}_{sq} - \hat{V}_s \cos(\rho_0)\tilde{\rho} \\ \tilde{\omega} = \frac{d\tilde{\rho}}{dt} \end{cases} \quad (2.44)$$

Substituindo (2.43) em (2.44), tem-se:

$$\begin{cases} \tilde{v}_{pac,d} = L_s \frac{d\tilde{i}_{sd}}{dt} - L_s\omega_0\tilde{i}_{sq} - L_s\bar{I}_{sq}\tilde{\omega} + R_s\tilde{i}_{sd} - (L_s\omega_0\bar{I}_{sd} + R_s\bar{I}_{sq})\tilde{\rho} \\ \tilde{v}_{pac,q} = L_s \frac{d\tilde{i}_{sq}}{dt} + L_s\omega_0\tilde{i}_{sd} + L_s\bar{I}_{sd}\tilde{\omega} + R_s\tilde{i}_{sq} - (\bar{V}_{pac,d} + L_s\omega_0\bar{I}_{sq} - R_s\bar{I}_{sd})\tilde{\rho} \end{cases} \quad (2.45)$$

Se i_{Ld} e i_{Lq} tiverem uma dinâmica lenta, as dinâmicas de ρ e ω podem ser desprezadas (YAZDANI & IRAVANI, 2010). Deste modo, considerando (2.41) e que o DSTATCOM troca uma pequena quantidade de potência ativa com a rede elétrica ($\bar{I}_d = \tilde{i}_d \approx 0$), chega-se à seguinte equação simplificada:

$$\tilde{v}_{pac,d} = -L_s \frac{d\tilde{i}_{Ld}}{dt} + L_s\omega_0\tilde{i}_{Lq} - L_s\omega_0\tilde{i}_q - R_s\tilde{i}_{Ld}, \quad (2.46)$$

que no domínio da frequência é dada por:

$$\tilde{V}_{pac,d}(s) = -(L_s s + R_s)\tilde{I}_{Ld}(s) + L_s\omega_0\tilde{I}_{Lq}(s) - L_s\omega_0\tilde{I}_q(s). \quad (2.47)$$

Na Figura 14 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de controle da tensão do PAC, onde $H_i(s)$ e $C_{Vpac}(s)$ são a função de transferência de malha fechada da malha interna de corrente e o regulador da malha externa de controle da tensão do PAC, respectivamente.

No sistema dinâmico descrito por (2.46), $\tilde{v}_{pac,d}$ é a saída e \tilde{i}_q é a entrada. Se os reguladores forem projetados de forma robusta, garantindo a estabilidade da malha de controle, a dinâmica das cargas podem ser ignoradas (YAZDANI & IRAVANI, 2010).

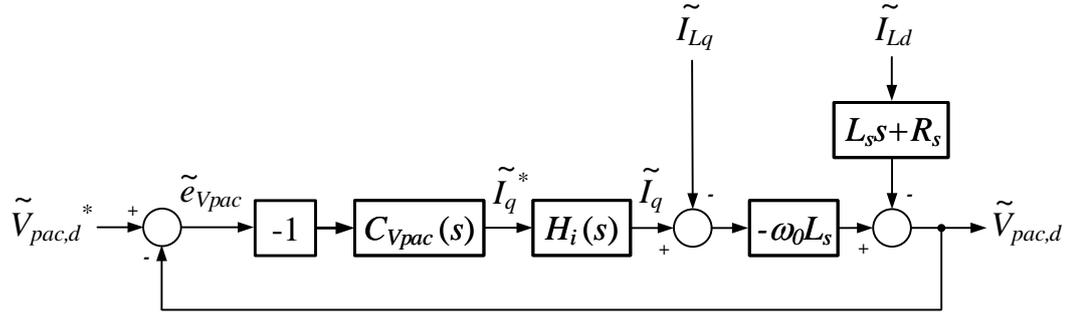


Figura 14: Diagrama de blocos da malha de controle da tensão do ponto de acoplamento comum.

Além disso, se a malha externa de controle da tensão do PAC for projetada com uma constante de tempo maior que a constante de tempo da malha interna de corrente, $H_i(s)$ pode ser considerado um ganho unitário. Desta forma, a função de transferência da planta é dada por:

$$\frac{\tilde{V}_{pac,d}(s)}{\tilde{I}_q(s)} = -\omega_0 L_s. \quad (2.48)$$

A função de transferência do regulador escolhido para controlar a tensão do PAC é dada por:

$$C_{Vpac}(s) = \frac{K_{i,Vpac}}{s}, \quad (2.49)$$

onde $K_{i,Vpac}$ é o ganho do regulador em (A/s).

Assim, as funções de transferência de malha aberta e malha fechada são dadas respectivamente por:

$$G_{Vpac}(s) = \frac{K_{i,Vpac} \omega_0 L_s}{s} \quad (2.50)$$

e,

$$H_{Vpac}(s) = \frac{K_{i,Vpac} \omega_0 L_s}{s + K_{i,Vpac} \omega_0 L_s}. \quad (2.51)$$

A forma canônica de uma função de transferência de primeira ordem é dada por:

$$H_1(s) = \frac{\omega_n}{s + \omega_n}. \quad (2.52)$$

Comparando (2.51) e (2.52), o ganho do controlador pode ser encontrado por:

$$K_{i,Vpac} = \frac{\omega_n}{\omega_0 L_s}, \quad (2.53)$$

onde ω_n é a frequência de corte do controlador, em (rad/s).

2.8 DADOS DO SISTEMA PARA O PROJETO E SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES

Nesta seção são dados os parâmetros do sistema da Figura 6 para o projeto e a simulação dos reguladores do sistema de controle do DSTATCOM. Na Tabela 1 são dados os parâmetros da rede de distribuição, considerando 100 MVA e a tensão nominal da rede como valores base. Na Tabela 2 são dados os parâmetros do filtro de interface do DSTATCOM com a rede de distribuição. Por fim, na Tabela 3 são apresentados os parâmetros do DSTATCOM.

Tabela 1: Parâmetros da rede de distribuição.

Grandeza	Valor
Tensão de linha eficaz (V_s)	23,1 kV
Frequência fundamental (f_s)	60 Hz
Potência de curto-circuito	1,5 pu
Relação X/R da rede	1,1

Tabela 2: Parâmetros do filtro de interface do DSTATCOM.

Grandeza	Valor
Indutância (L_f)	35 mH
Resistência série (R_f)	1,33 Ω
Capacitância (C_f)	2,9 μ F
Resistência ($R_{c,f}$)	50 Ω

2.9 PROJETO DOS CONTROLADORES

Considerando o sistema da Figura 6 e os dados apresentados na Seção 2.8, os reguladores do sistema de controle do DSTATCOM foram projetados de acordo com as

Tabela 3: Parâmetros do DSTATCOM.

Grandeza	Valor
Tensão nominal	23,1 kV
Potência nominal	10 MVA
Frequência de comutação (f_c)	5 kHz
Capacitância equivalente (C_{eq})	6000 μ F
Resistência dos IGBTs (R_{IGBT})	1 m Ω
Tensão nominal do barramento CC	50 kV
Resistência do barramento CC (R_p)	1 k Ω

modelagens matemáticas apresentadas neste capítulo. Para analisar a estabilidade dos sistemas de controle projetados, são apresentados os diagramas de Bode das funções de transferência dos sistemas compensados.

Os sistemas de controle compensados são normalmente projetados de maneira a garantir uma margem de fase maior que 30° , um alto ganho em baixas frequências e o maior valor de frequência possível no ponto de ganho unitário. Deste modo, os controladores foram projetados buscando atender tais requisitos mínimos.

2.9.1 REGULADOR DE CORRENTE

Na modelagem matemática apresentada na Seção 2.5 foi mostrado que os ganhos do regulador de corrente são dados por:

$$K_{p,i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (2.54)$$

e,

$$K_{i,i} = \frac{R_{eq}}{\tau_i}. \quad (2.55)$$

Utilizando os dados apresentados na Seção 2.8, sabe-se que $L_f = 35$ mH e $R_{eq} = 1,331$ Ω . Desta forma, escolhendo $\tau_i = 0,32$ ms e substituindo em (2.54) e (2.55), tem-se:

$$K_{p,i} = 109,37 \left(\frac{V}{A} \right) \quad (2.56)$$

e,

$$K_{i,i} = 4159,37 \left(\frac{V}{sA} \right). \quad (2.57)$$

2.9.2 REGULADOR DO CIRCUITO DE SINCRONISMO

Na modelagem matemática apresentada na Seção 2.3 foi mostrado que os ganhos do regulador do circuito de sincronismo são dados por:

$$K_{p,pll} = \frac{2\xi\omega_n}{\hat{V}_{pac}} \quad (2.58)$$

e,

$$K_{i,pll} = \frac{\omega_n^2}{\hat{V}_{pac}}. \quad (2.59)$$

Utilizando os dados apresentados na Seção 2.8, sabe-se que $\hat{V}_{pac} = 18,861$ kV. Desta forma, escolhendo $\xi = \sqrt{2}$ e $\omega_n = 166,67$ rad/s e substituindo em (2.58) e (2.59), tem-se:

$$K_{p,pll} = 0,025 \left(\frac{1}{sV} \right) \quad (2.60)$$

e,

$$K_{i,pll} = 1,47 \left(\frac{1}{s^2V} \right). \quad (2.61)$$

Os valores dos ganhos proporcional e integral do regulador projetado para o circuito de sincronismo resultam em uma margem de fase de 82,9° na frequência em que o ganho é zero db (475 rad/s), como apresentado na Figura 15.

2.9.3 REGULADOR DO SISTEMA DE CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO CC

Na modelagem matemática apresentada na Seção 2.6 foi mostrado que os ganhos do regulador da malha de controle da tensão do barramento CC são dados por:

$$K_{p,V_{cc}} = \frac{2\xi\omega_n C_{eq}}{3V_{pac,d0}} \quad (2.62)$$

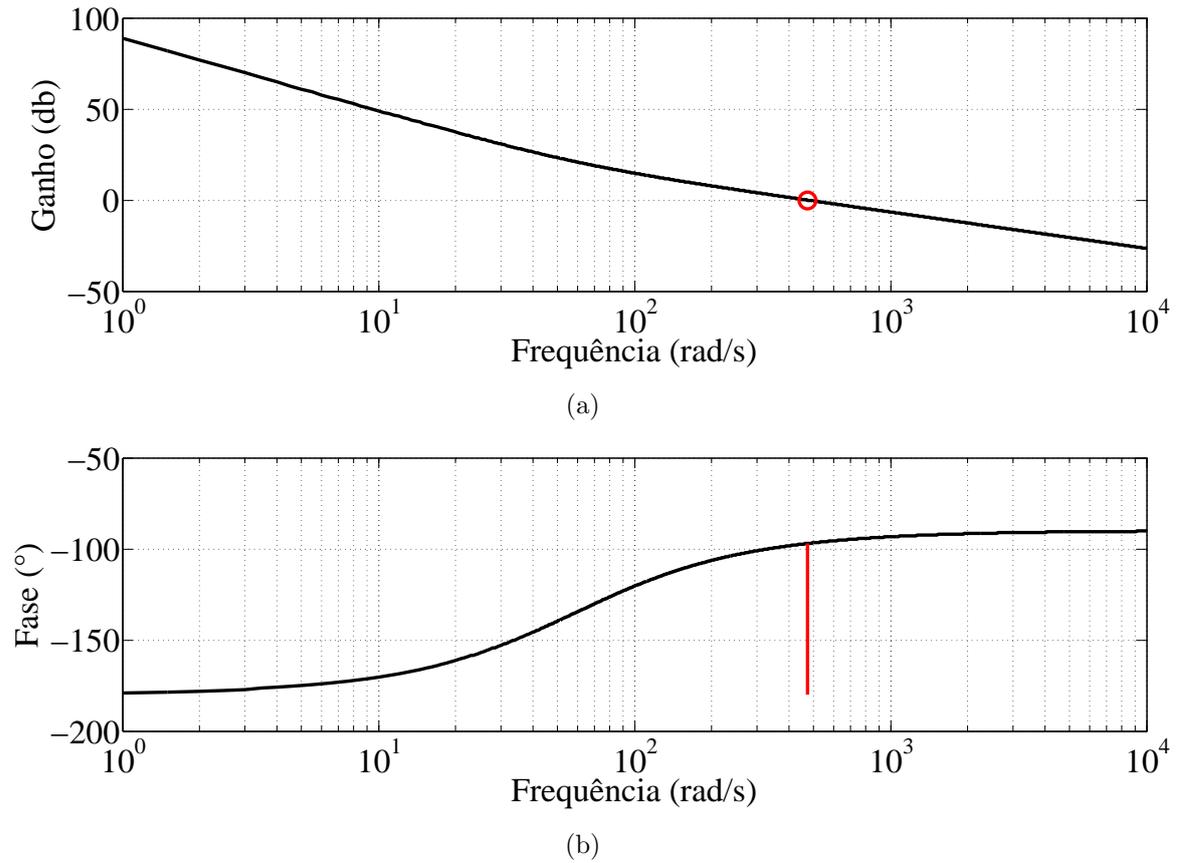


Figura 15: Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta do circuito de sincronismo: (a) Ganho, (b) fase.

e,

$$K_{i,V_{cc}} = \frac{C_{eq}\omega_n^2}{3V_{pac,d0}}. \quad (2.63)$$

Utilizando os dados apresentados na Seção 2.8, sabe-se que $V_{pac,d0} = 18,861$ kV e $C_{eq} = 6000$ μ F. Desta forma, escolhendo $\xi = 1,5$ e $\omega_n = 208,33$ rad/s e substituindo em (2.62) e (2.63), tem-se:

$$K_{p,V_{cc}} = 66,274 \left(\frac{\mu A}{V^2} \right) \quad (2.64)$$

e,

$$K_{i,V_{cc}} = 4,6 \left(\frac{mA}{sV^2} \right). \quad (2.65)$$

Os valores dos ganhos proporcional e integral do regulador projetado para o sistema de controle da tensão do barramento CC resultam em uma margem de fase de $83,7^\circ$

na frequência em que o ganho é zero db (629 rad/s), como apresentado na Figura 16.

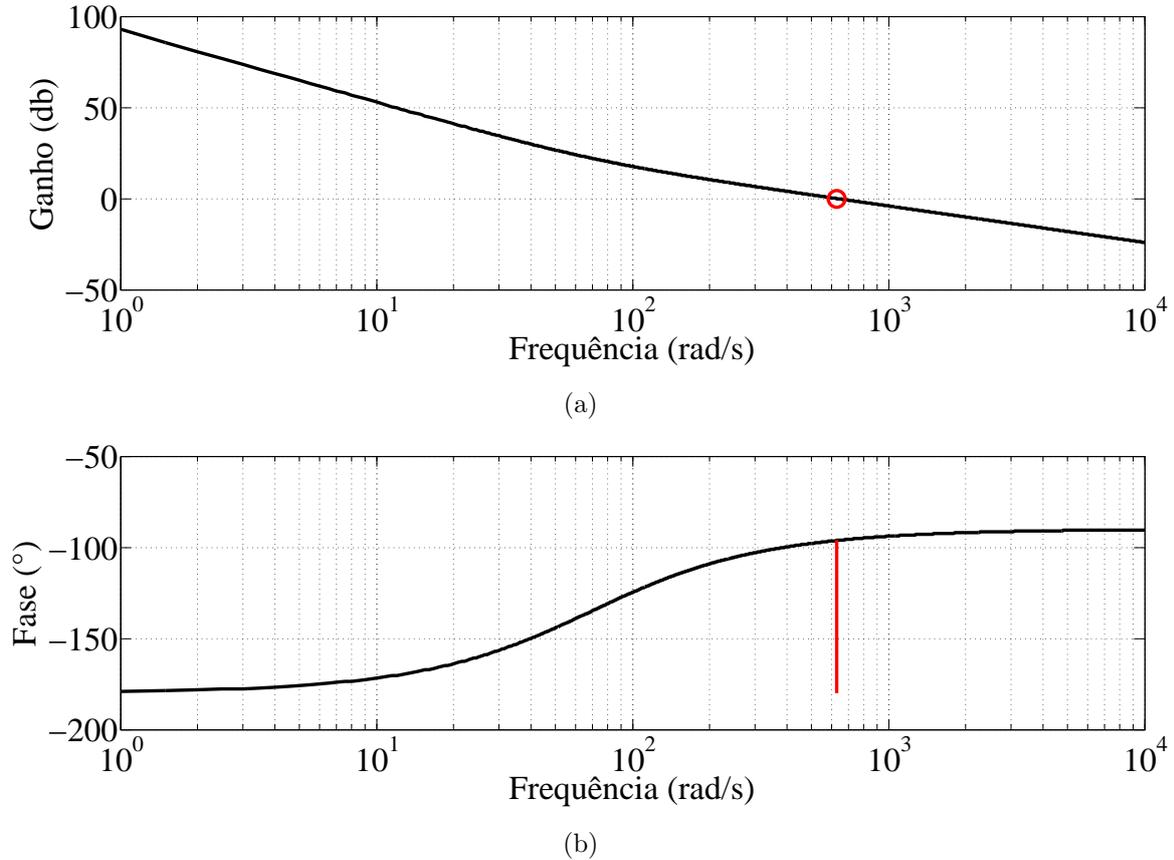


Figura 16: Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta do sistema de controle da tensão do barramento CC: (a) Ganho, (b) fase.

2.9.4 REGULADOR DO SISTEMA DE CONTROLE DA TENSÃO DO PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM

Na modelagem matemática apresentada na Seção 2.7 foi mostrado que o ganho do regulador da malha de controle da tensão do PAC é dado por:

$$K_{i,V_{pac}} = \frac{\omega_n}{\omega_0 L_s}. \quad (2.66)$$

Utilizando os dados apresentados na Seção 2.8, sabe-se que $\omega_0 = 377$ rad/s e $L_s = 7$ mH. Desta forma, escolhendo $\omega_n = 312,5$ rad/s e substituindo em (2.66) tem-se:

$$K_{i,V_{pac}} = 118,42 \left(\frac{A}{Vs} \right). \quad (2.67)$$

Como a função de transferência do regulador do sistema de controle da tensão do

PAC é um integrador e a função de transferência da planta é uma constante, o gráfico de fase é constante e igual a -90° e conseqüentemente a margem de fase da função de transferência de malha aberta também é igual a -90° na frequência em que o ganho é zero db (313 rad/s), como apresentado na Figura 17.

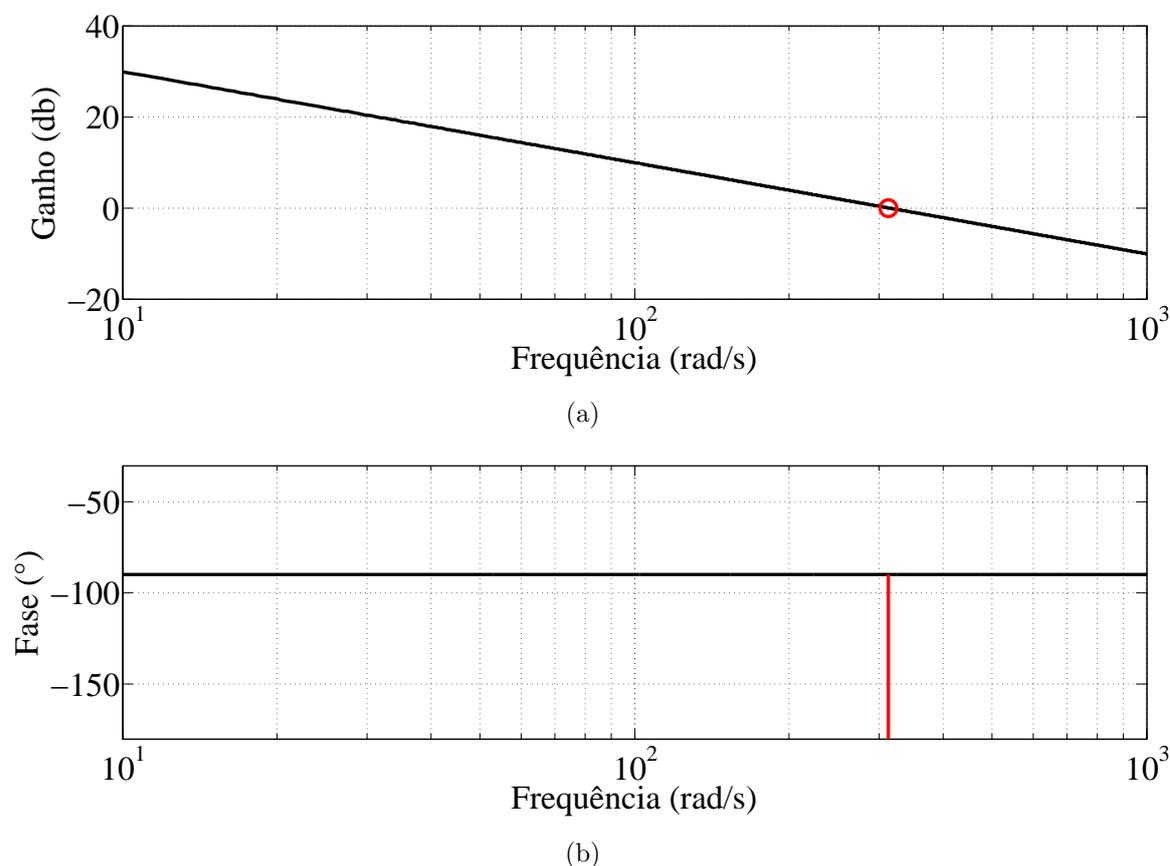


Figura 17: Diagrama de Bode da função de transferência de malha aberta do sistema de controle da tensão do ponto de acoplamento comum: (a) Ganho, (b) fase.

2.10 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DO DSTATCOM

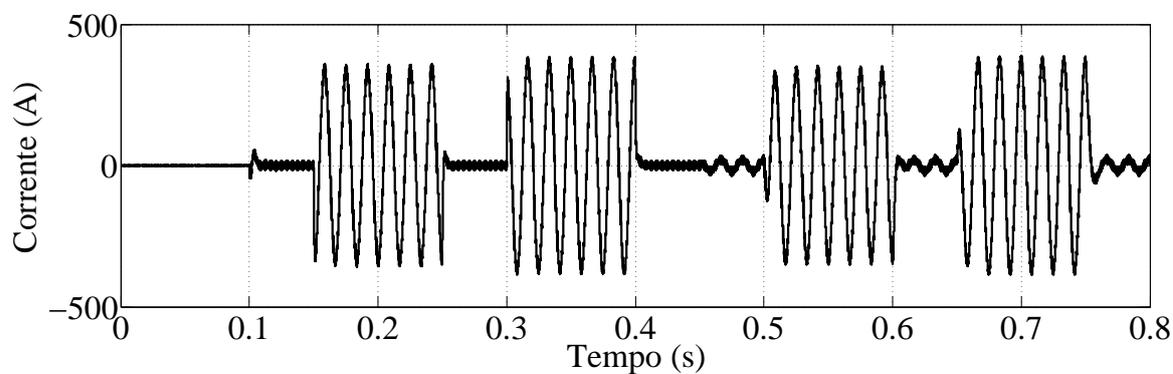
Nesta seção são apresentados os resultados de simulação do sistema de controle do DSTATCOM, ilustrado na Figura 6 e detalhado nas Seções 2.3, 2.5, 2.6 e 2.7. Nas Figuras 18 (a), (b), e (c) são mostradas as formas de onda da corrente da fase “a” do DSTATCOM, da potência reativa trocada com a rede e da corrente de quadratura, respectivamente. Nas Figuras 19 (a), (b) e (c) são mostrados o valor de pico da tensão de fase do ponto de acoplamento comum, a forma de onda da tensão do barramento CC e a forma de onda da frequência angular rastreada pelo circuito de sincronismo, respectivamente. Já nas Figuras 20 (a), (b) e (c) são mostrados os detalhes das formas de onda da corrente da fase “a” do conversor, da potência reativa trocada com a

rede e da frequência angular rastreada pelo PLL, respectivamente. Por fim, nas Figuras 21 (a) e (b) são mostrados os detalhes da forma de onda da corrente de quadratura e do valor de pico da tensão do PAC.

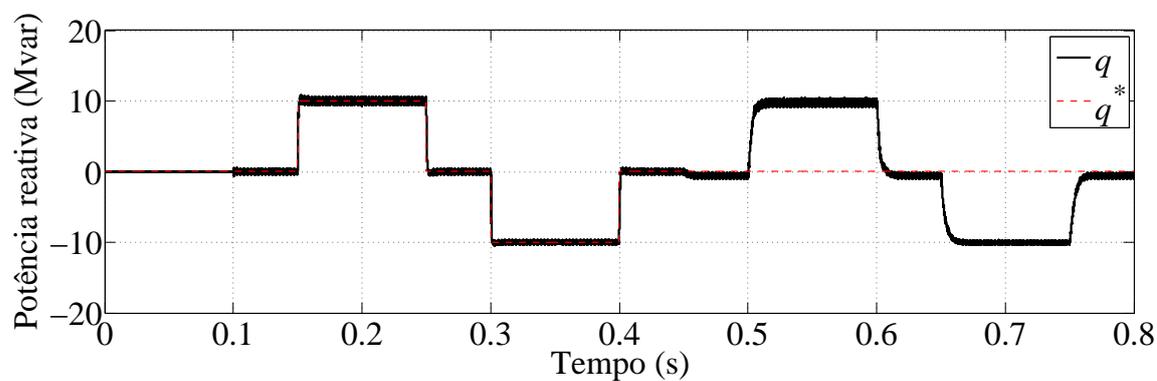
O DSTATCOM é conectado ao PAC em $t = 0,1$ s, logo após o PLL entrar em regime permanente. Entre $t = 0,15$ s e $t = 0,25$ s foi aplicado ao controlador de corrente do conversor um valor de referência para que a potência reativa no PAC fosse 10 Mvar. Em seguida, entre $t = 0,3$ s e $t = 0,4$ s, também foi aplicado um valor de referência de corrente, porém para que a potência reativa no PAC fosse -10 Mvar. Em $t = 0,45$ s, o sistema de controle da tensão do PAC foi ligado com a referência de tensão no valor nominal do sistema. Entre $t = 0,5$ s e $t = 0,6$ s, o valor de referência da tensão do PAC foi aumentada em 4,72%, o que necessita que o DSTATCOM compense um valor de potência reativa igual ao nominal, como mostrado na Figura 18 (b). Da mesma forma, entre $t = 0,65$ s e $t = 0,75$ s, o valor de referência da tensão do PAC foi reduzida em 5,22%. Na Figura 19 (b) pode-se notar que o sistema de controle da tensão do barramento CC manteve a mesma no valor de referência (50 kV) durante toda a simulação, com transitórios de aproximadamente 0,03 % do valor de referência. Devido aos capacitores do filtro de interface (C_f), na Figura 18 (b) observa-se que, entre $t = 0,45$ s e $t = 0,5$ s, o DSTATCOM absorve uma pequena quantidade de potência reativa para que o valor de pico da tensão do PAC fosse mantido no valor nominal.

2.11 CONCLUSÕES PARCIAIS

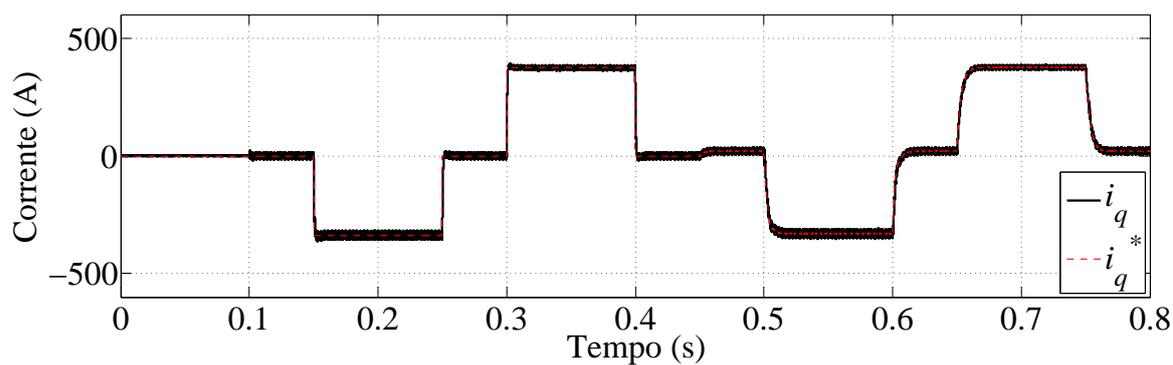
Neste capítulo foram apresentadas as modelagens matemáticas do lado de corrente alternada e do lado de corrente contínua do DSTATCOM. Além disso, foram dados os parâmetros de um DSTATCOM e de uma rede elétrica de distribuição para o devido projeto dos reguladores do sistema de controle do conversor. O DSTATCOM foi projetado para regular a tensão do barramento CC durante todo o tempo de operação, através do controle da corrente de eixo direto. Além disso, o compensador foi projetado para seguir a referência de potência reativa ou controlar a tensão do PAC, através do controle da corrente de eixo em quadratura. Foi mostrado que o SRF-PLL, que é de simples implementação, é suficiente para rastrear o ângulo e a frequência das tensões do PAC quando o sistema é simétrico e equilibrado. Resultados de simulação foram apresentados para validação das modelagens matemáticas e dos projetos dos reguladores do sistema de controle do compensador.



(a)



(b)



(c)

Figura 18: Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Forma de onda da corrente da fase “a”, (b) forma de onda da potência reativa trocada com a rede e (c) forma de onda da corrente de quadratura.

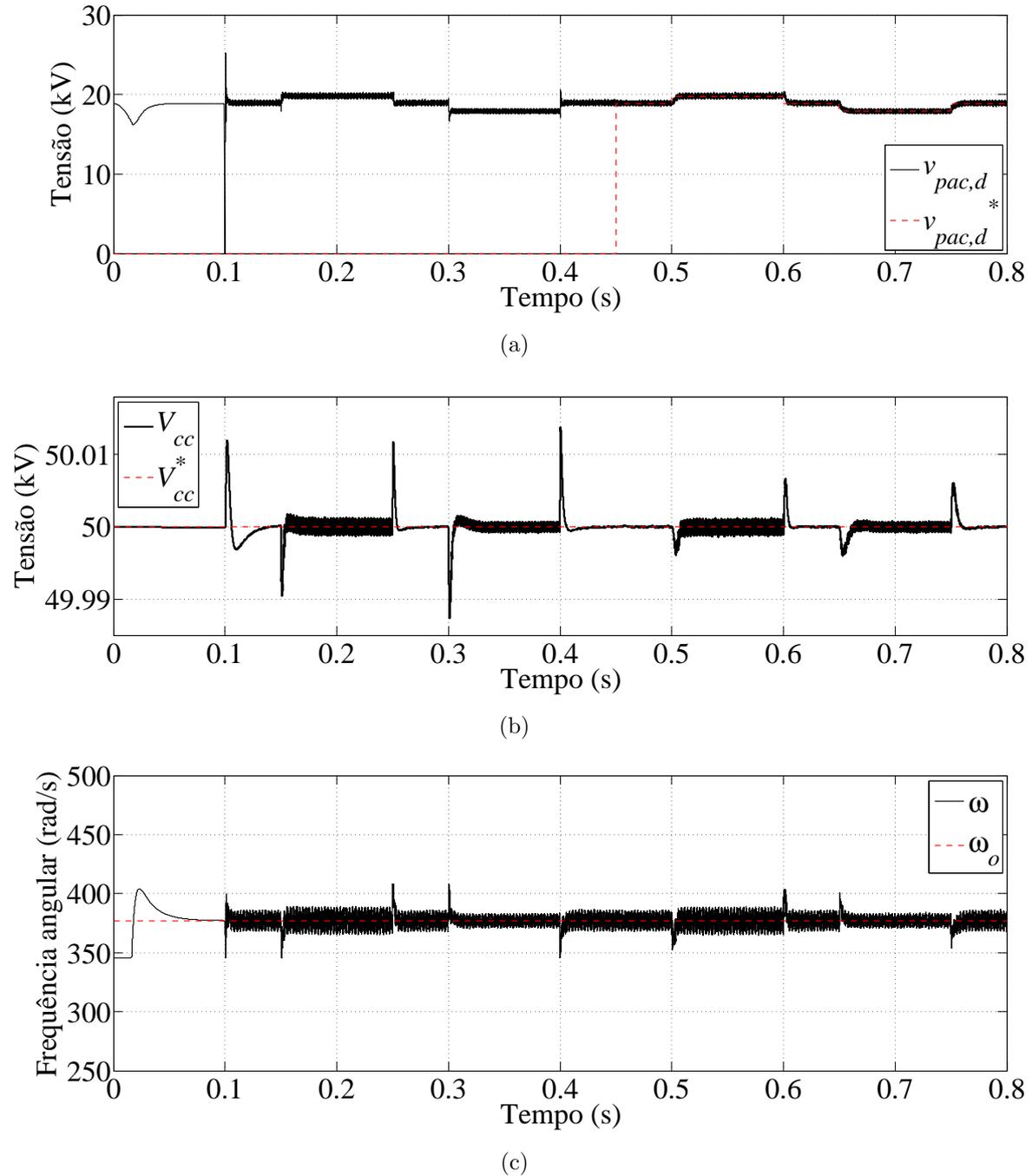
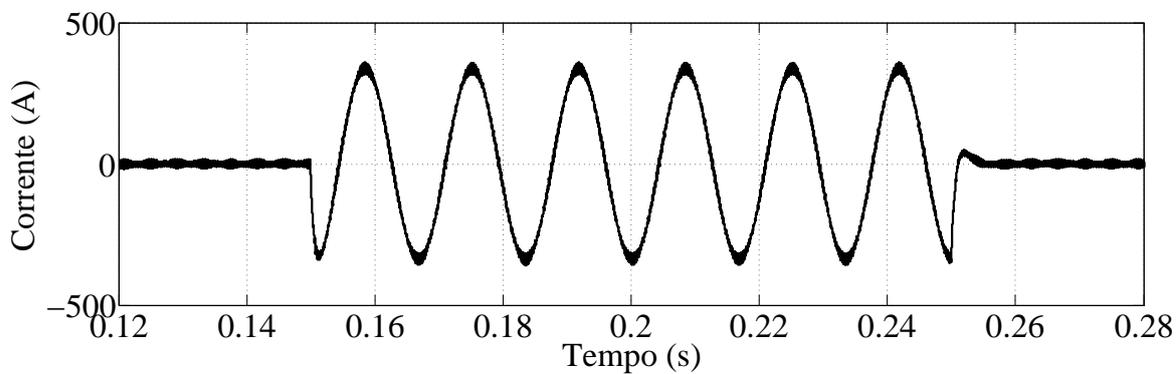
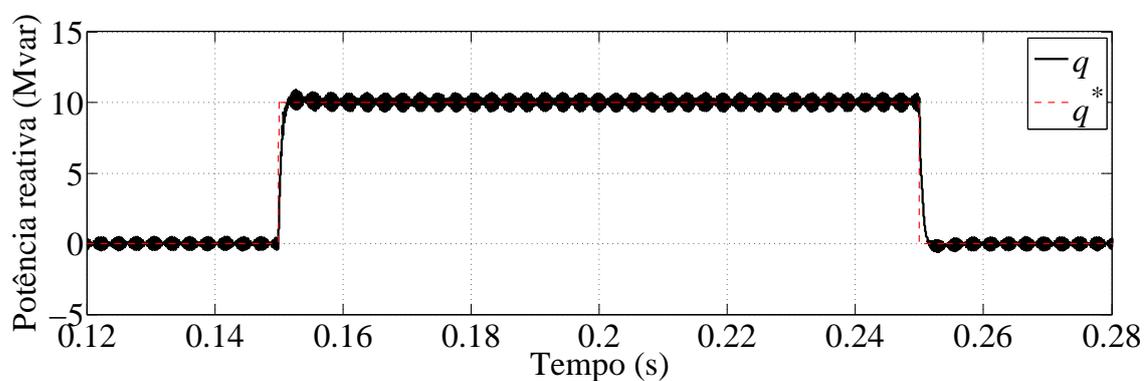


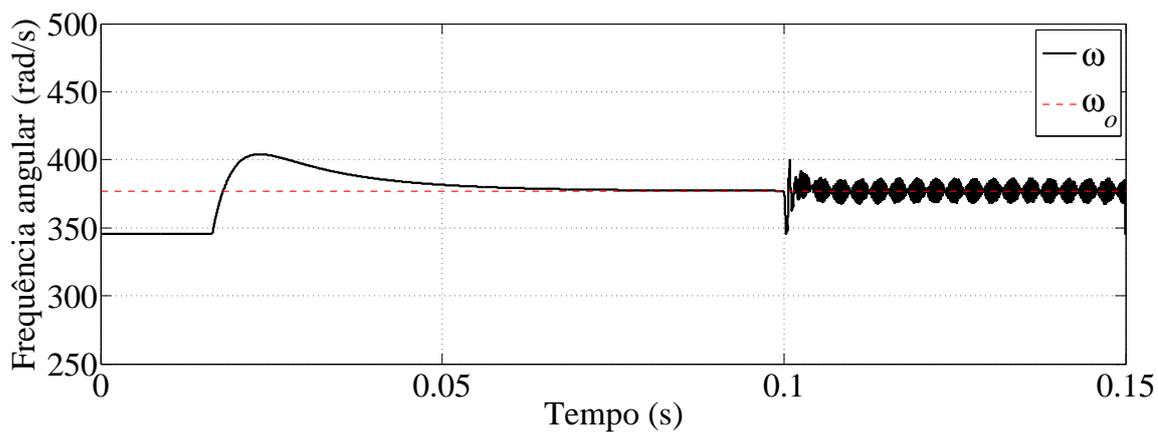
Figura 19: Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Valor de pico da tensão de fase do ponto de acoplamento comum, (b) forma de onda da tensão do barramento CC e (c) forma de onda da frequência angular rastreada pelo circuito de sincronismo.



(a)

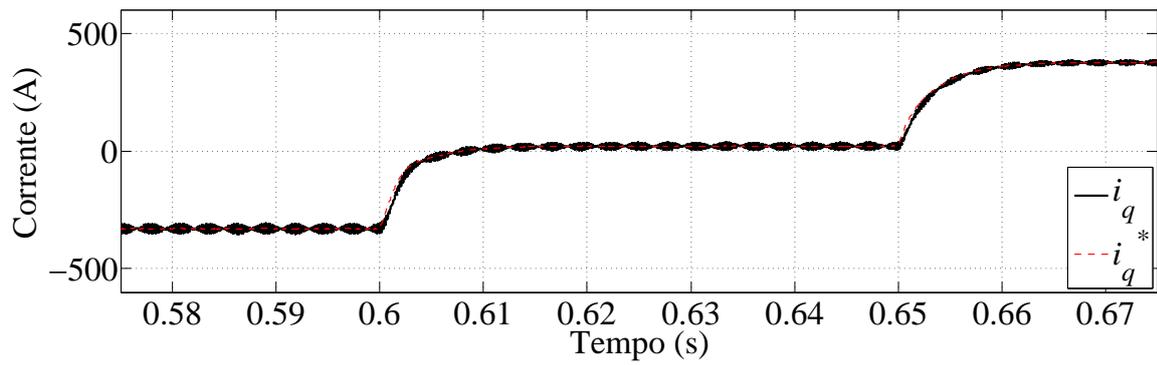


(b)

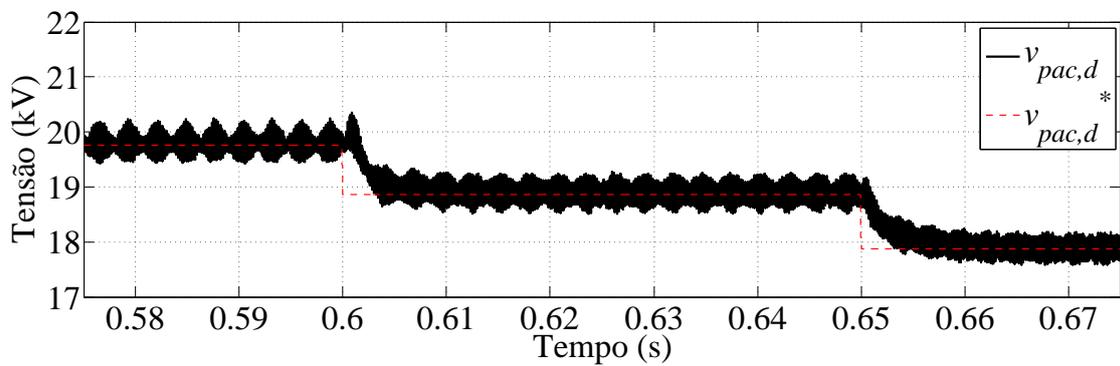


(c)

Figura 20: Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Detalhe da forma de onda da corrente da fase “a”, (b) detalhe da forma de onda da potência reativa trocada com a rede e (c) detalhe da forma de onda da frequência angular rastreada pelo circuito de sincronismo.



(a)



(b)

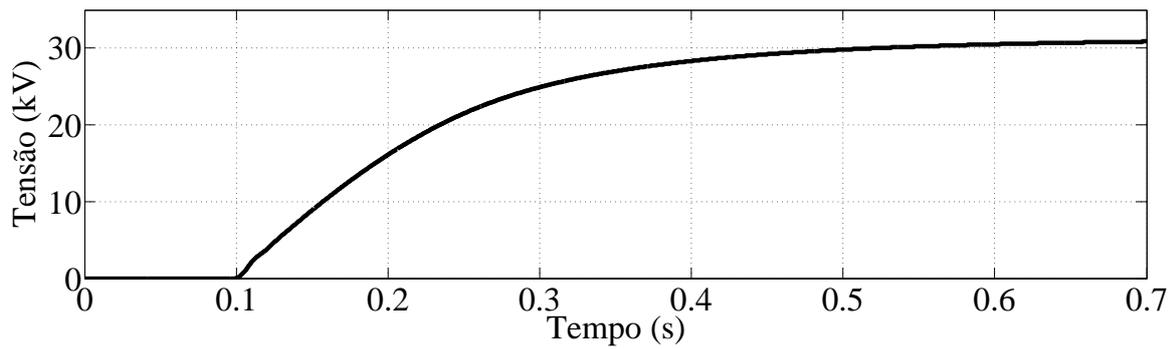
Figura 21: Resultados de simulação do DSTATCOM de 10 MVA conectado à rede de distribuição com tensão nominal de 23,1 kV: (a) Detalhe da forma de onda da corrente de quadratura, e (b) detalhe do valor de pico da tensão de fase do ponto de acoplamento comum.

3 PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO DO DSTATCOM

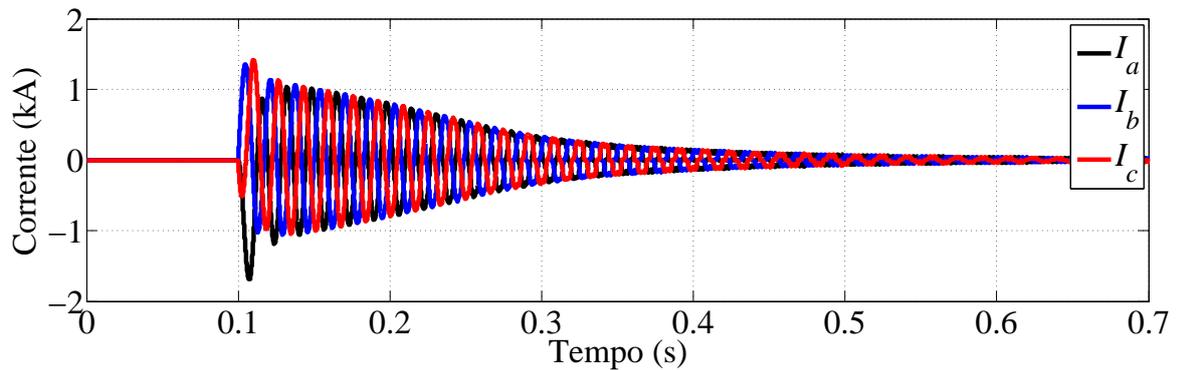
No Capítulo 2 foi apresentada a modelagem matemática do DSTATCOM e de seu sistema de controle. Os resultados de simulação apresentados mostraram que o projeto dos controladores permitiu regular as correntes sintetizadas nos terminais do compensador. Porém, nas simulações realizadas, o capacitor CC do DSTATCOM já estava pré-carregado desde o início da simulação, assim como é feito na maioria dos trabalhos encontrados na literatura. Deste modo, nesse capítulo são propostos dois circuitos e um método para realizar os processos síncronos de pré-energização e desenergização do conversor estático.

Com o objetivo de introduzir o problema abordado neste trabalho, foi feita uma simulação do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV quando o mesmo é conectado diretamente à rede elétrica com seu capacitor CC equivalente totalmente descarregado. Na Figura 22 são mostradas as formas de onda das correntes de linha e da tensão do barramento CC do DSTATCOM. Nota-se que a tensão do barramento CC atinge o valor de pico da tensão da rede elétrica em um intervalo de tempo muito pequeno, de aproximadamente 0,6 s. Já as correntes de linha do conversor alcançam valores muito maiores que sua corrente nominal (250 A).

Na Figura 23 é mostrada a forma de onda da tensão do barramento CC, quando o DSTATCOM está desconectado da rede elétrica e a energia do capacitor CC equivalente é dissipada nas resistências de equalização das tensões dos capacitores do barramento CC. O efeito dessas resistências de equalização foi modelado na Figura 6 pelo resistor R_p conectado em paralelo com o capacitor CC do DSTATCOM. A forma de onda da tensão CC mostrada na Figura 23 foi obtida para uma resistência equivalente de 1 k Ω . Pode-se notar que o processo natural de desenergização do conversor é muito demorado (cerca de 500 s), inviabilizando sua utilização quando for necessário desligar o DSTATCOM para realizar uma manutenção rápida ou até para retirada do equipamento de operação (HASLER, 2014).



(a)



(b)

Figura 22: Formas de onda quando o DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV é conectado à rede elétrica com seu capacitor CC equivalente descarregado: (a) Tensão do barramento CC e (b) correntes de linha.

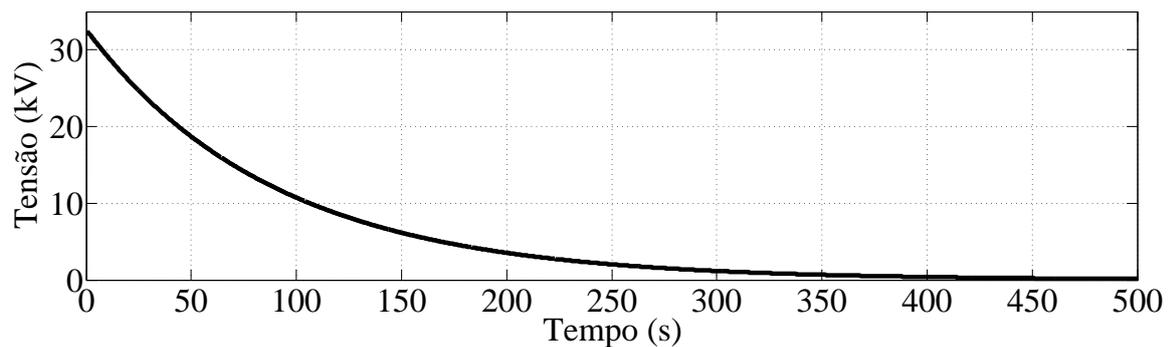


Figura 23: Forma de onda da tensão do barramento CC do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV durante o processo de desenergização natural.

3.1 O CIRCUITO DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Na Figura 24 é mostrada a topologia do DSTATCOM conectado a uma rede elétrica CA através de um filtro passivo de primeira ordem. Além dos seis IGBTs ($S_1 - S_6$) esta topologia possui um braço adicional formado por dois tiristores (T_1 e T_2).

Estão representados também os controladores do DSTATCOM e do circuito de pré-energização.

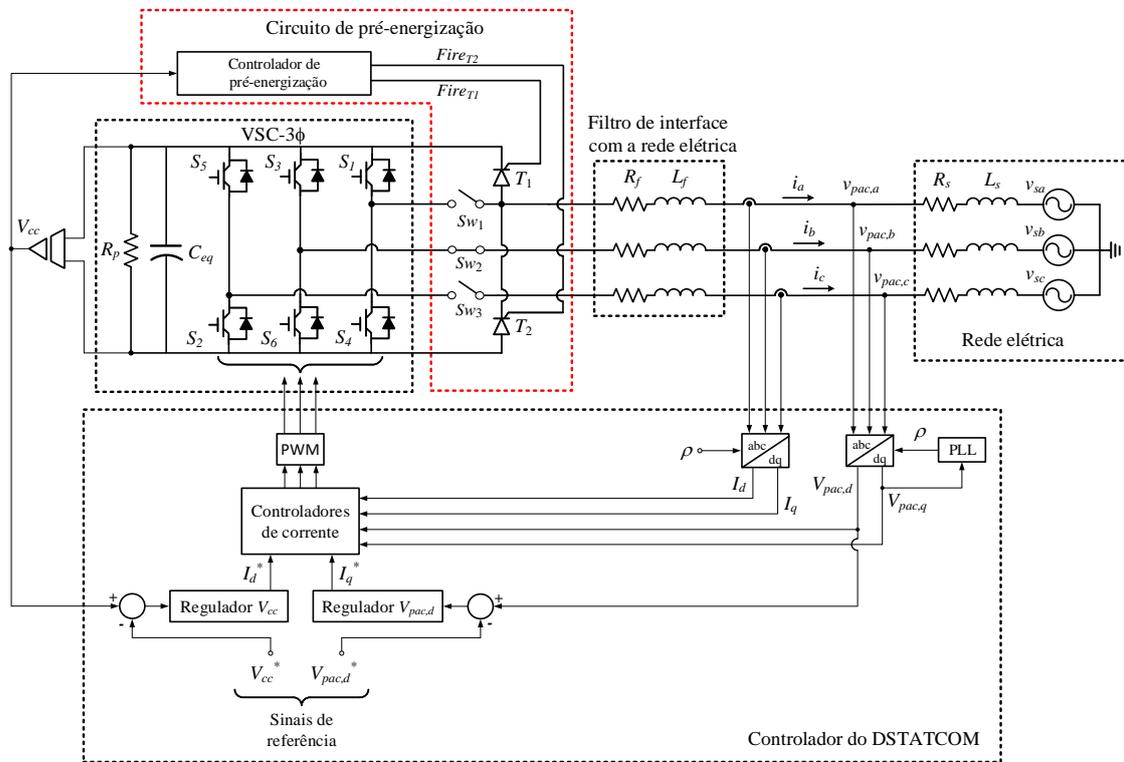


Figura 24: Topologia do circuito de pré-energização do DSTATCOM.

O procedimento de pré-energização do DSTATCOM é realizado bloqueando os pulsos de disparo dos IGBTs da Figura 24, mantendo os contatos Sw_1 e Sw_3 da chave mecânica abertos e o contato Sw_2 fechado. Os tiristores T_1 e T_2 são então disparados de maneira a controlar a corrente pelo capacitor CC. Quando a tensão do barramento CC atinge um valor próximo à tensão de pico da rede, o disparo dos tiristores é desligado, os contatos Sw_1 e Sw_3 são fechados e os controladores de corrente e tensão do DSTATCOM são habilitados para regular a tensão do barramento CC no valor da tensão de operação. A partir deste ponto o DSTATCOM está pronto para compensar potência reativa em seus terminais CA.

3.1.1 A ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO CIRCUITO DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Na Figura 25 é mostrado o circuito equivalente durante a pré-energização, com a indicação do sentido da corrente no semiciclo positivo da tensão de linha $v_{s,ab}(t)$. Os parâmetros $R = (R_s + R_f)$ e $L = (L_s + L_f)$ representam as resistência e indutância equivalentes por fase da rede e do filtro de interface, respectivamente. Além

disso, a resistência R_p do circuito da Figura 24 foi desprezada. Como os IGBTs do DSTATCOM estão bloqueados, o circuito da Figura 25 se comporta como um retificador semi-controlado (RASHID, 2010) onde a corrente pelo capacitor CC é controlada através do ângulo de disparo dos tiristores. Nas Figuras 26 (a) e (b) são mostradas as formas de onda da tensão da rede, da tensão CC e da corrente pelo circuito para um ângulo de disparo α genérico.

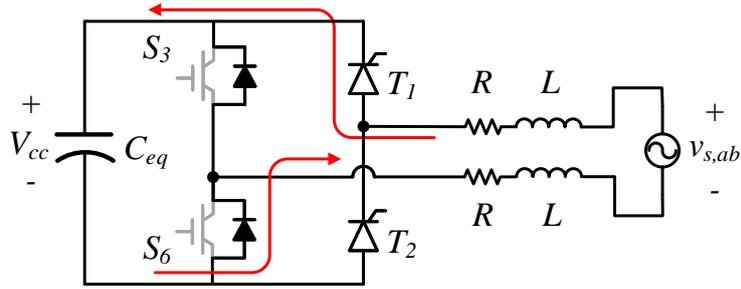


Figura 25: Topologia equivalente do circuito de pré-energização do DSTATCOM.

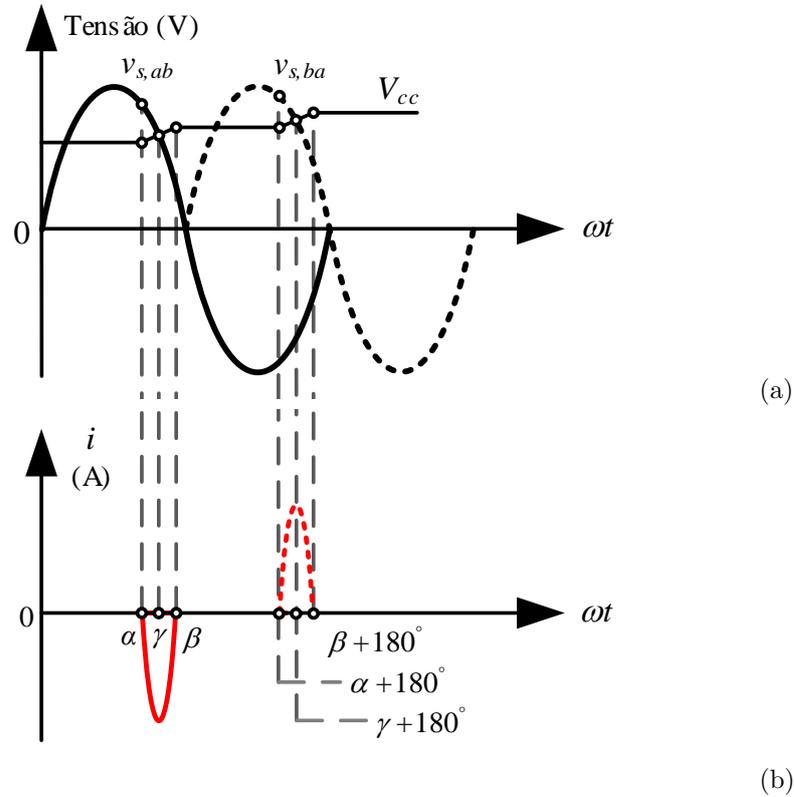


Figura 26: Formas de onda durante a pré-energização síncrona do DSTATCOM: (a) Tensão da rede e tensão CC e (b) corrente CA.

Considerando que C_{eq} está descarregado e ainda, que o tiristor T_1 é disparado com um ângulo α ligeiramente inferior à $\gamma = 180^\circ$, tem-se que a corrente fluirá pelo tiristor

T_1 e pelo diodo do interruptor S_6 , forçando a tensão sobre o capacitor C_{eq} aumentar. No instante $\omega_0 t = \beta$ a corrente pelo circuito se torna nula novamente e o tiristor T_1 fica bloqueado. Todo esse processo é repetido no semiciclo negativo da tensão $v_{s,ab}(t)$, porém, nesta condição, a corrente irá fluir pelo tiristor T_2 e pelo diodo do interruptor S_3 .

A cada disparo de T_1 e T_2 a tensão do barramento CC vai aumentando gradativamente e o ângulo α do retificador semi-controlado da Figura 25 deve ser reduzido.

O pico da corrente durante o processo de pré-energização síncrona do conversor pode ser maior ou menor, dependendo da diferença entre os ângulos α e γ . Quanto menor a diferença entre estes ângulos menor será a diferença entre a tensão do barramento CC e a tensão da rede elétrica e, conseqüentemente, menor será o pico da corrente pelo circuito.

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CORRENTE DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO

Considerando que o tiristor T_1 da Figura 25 é disparado no instante $\omega_0 t = \alpha$, pode-se escrever a seguinte equação integro-diferencial para a corrente que flui por T_1 , pelo diodo do interruptor S_6 e pelo capacitor C_{eq} do circuito:

$$2L \frac{di(t)}{dt} + 2Ri(t) + \frac{1}{C_{eq}} \int_0^t i(\lambda) d\lambda = [v_{s,ab}(t) - V_{cc}(\alpha^-/\omega_0)] U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right), \quad (3.1)$$

onde $v_{s,ab}(t) = \sqrt{2}V_L \sin(\omega_0 t)$, V_L é o valor eficaz da tensão de linha da rede em (V), ω_0 é a frequência angular fundamental em (rad/s), $U_{-1}(t - \alpha/\omega_0)$ é a função degrau unitário aplicada no instante $t_\alpha = (\alpha/\omega_0)$.

Aplicando a transformada de Laplace em (3.1), considerando $i(\alpha^-/\omega_0) = 0$ e $V_{cc}(\alpha^-/\omega_0) = V_{cc}$, chega-se à seguinte expressão no domínio da frequência:

$$\begin{aligned} \sqrt{2}V_L e^{-s(\frac{\alpha}{\omega_0})} \left(\frac{s \sin(\alpha) + \omega_0 \cos(\alpha)}{s^2 + \omega_0^2} \right) &= 2sLI(s) + \\ &+ 2RI(s) + \frac{1}{sC_{eq}} I(s) + \frac{V_{cc} e^{-s(\frac{\alpha}{\omega_0})}}{s}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Manipulando (3.2), desprezando o efeito da resistência série ($R_f + R_s \approx 0$) e isolando $I(s)$, tem-se que:

$$I(s) = \left(\frac{\sqrt{2}V_L}{2L} \right) \frac{e^{-s\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)} s (\omega_0 \cos \alpha + s \operatorname{sen} \alpha)}{(s^2 + \omega_0^2)(s^2 + \omega_r^2)} - \left(\frac{V_{cc}}{2L} \right) \frac{e^{-s\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)}}{s^2 + \omega_r^2}, \quad (3.3)$$

onde $\omega_r = 1/\sqrt{2LC_{eq}}$.

Aplicando a transformada inversa de Laplace em (3.3) tem-se que a corrente de pré-energização, no domínio do tempo, é dada por:

$$i(t) = \left\{ \frac{\sqrt{2}V_L\omega_0}{2L(\omega_r^2 - \omega_0^2)} \left[\left(\frac{\omega_r}{\omega_0} \right) \operatorname{sen}(\alpha) \operatorname{sen} \left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \cos(\alpha) \cos \left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) + \cos(\omega_0 t) \right] - \right. \\ \left. - \left(\frac{V_{cc}}{2L\omega_r} \right) \operatorname{sen} \left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \right\} U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right). \quad (3.4)$$

A expressão (3.4) é válida para $\alpha \leq \omega_0 t \leq \beta$. Na próxima seção é mostrado como a relação anterior pode ser usada para limitar a amplitude da corrente de carga do capacitor CC do DSTATCOM.

3.3 O CONTROLE DA CORRENTE DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO

O objetivo principal é fazer com que o pico da corrente do circuito de pré-energização tenha um valor constante e pré-determinado durante todo o processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM. Da Figura 26 (b) tem-se que o valor de pico da corrente de pré-energização acontece no instante $\omega_0 t = \gamma_e$, ou seja, quando o valor da tensão instantânea da rede é igual ao valor da tensão do barramento CC. Pode-se então estimar o valor de γ_e através de:

$$\gamma_e \approx \pi - \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{\sqrt{2}V_L} \right), \quad (3.5)$$

onde o subíndice ($_e$) foi adicionado à variável γ para indicar que esse ângulo é referente à energização do compensador.

O ângulo γ_e será 180° quando o capacitor CC estiver totalmente descarregado e igual a 90° quando o capacitor estiver carregado com a tensão de pico da rede CA. Desse modo, conhecendo-se o valor da tensão V_{cc} e do ângulo γ_e , pode-se resolver numericamente (3.4) de maneira a determinar o ângulo α_e tal que:

$$i(t_{\gamma_e}) = I_{m\acute{a}x}, \quad (3.6)$$

onde $t_{\gamma_e} = (\gamma_e/\omega_0)$ em (s) e $I_{m\acute{a}x}$ é o valor de pico desejado para a corrente de pré-energização, em (A).

Como trata-se da solução de uma equação não linear, o método de Newton-Raphson é uma alternativa conveniente para resolver (3.4) para α , devido à sua robustez e convergência quadrática (FERREIRA, 2013; RAUPP, 1991). Deste modo, foi desenvolvida uma rotina de programação implementando o método de Newton-Raphson no programa MATLAB. Como neste método de solução de equações não lineares é necessário se ter a expressão da derivada da equação a ser solucionada, (3.4) foi derivada parcialmente em relação a α . Como resultado, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial i(t, \alpha, V_{cc})}{\partial \alpha} = & \frac{-\sqrt{2}V_L}{L_t(\omega_r^2 - \omega_0^2)} \left[\cos(\omega_0 t) \delta \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) + \omega_0 \cos(\omega_r t) P_2 + \right. \\ & \left. + \omega_0 \sen(\omega_r t) P_3 - \omega_r \sen(\omega_r t) P_4 + \omega_r \cos(\omega_r t) P_5 \right] - \\ & - \frac{V_{cc}}{L_t \omega_r} [\sen(\omega_r t) P_6 - \cos(\omega_r t) P_7], \quad (3.7) \end{aligned}$$

onde:

$$\begin{aligned} P_2 = U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \left[-\sen(\alpha) \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) - \frac{\omega_r}{\omega_0} \cos(\alpha) \sen \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \right] - \\ - \delta \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \frac{\cos(\alpha)}{\omega_0} \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \quad (3.8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_3 = U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \left[-\sen(\alpha) \sen \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) + \frac{\omega_r}{\omega_0} \cos(\alpha) \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \right] - \\ - \delta \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \frac{\cos(\alpha)}{\omega_0} \sen \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \quad (3.9) \end{aligned}$$

$$P_4 = U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \left[\cos(\alpha) \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) - \frac{\omega_r}{\omega_0} \operatorname{sen}(\alpha) \operatorname{sen} \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \right] - \delta \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \frac{\operatorname{sen}(\alpha)}{\omega_0} \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \quad (3.10)$$

$$P_5 = U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \left[\cos(\alpha) \operatorname{sen} \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) + \frac{\omega_r}{\omega_0} \operatorname{sen}(\alpha) \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \right] - \delta \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \frac{\operatorname{sen}(\alpha)}{\omega_0} \operatorname{sen} \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \quad (3.11)$$

$$P_6 = -\frac{\omega_r}{\omega_0} U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) - \frac{1}{\omega_0} \delta \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \quad (3.12)$$

$$P_7 = \frac{\omega_r}{\omega_0} U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \cos \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) - \frac{1}{\omega_0} \delta \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{\omega_r \alpha}{\omega_0} \right) \quad (3.13)$$

O incremento, a atualização e o erro do método de Newton-Raphson, são dados respectivamente por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\alpha = \frac{\Delta i}{\left(\frac{\partial i}{\partial \lambda} \right)} \\ \alpha = \alpha_{ant} + \Delta\alpha \\ \Delta i = I_{m\acute{a}x} - i \end{array} \right. , \quad (3.14)$$

onde α_{ant} é o ângulo α da iteração anterior em (rad) e $\frac{\partial i}{\partial \lambda}$ é a derivada da corrente i em relação a α em (A/rad).

3.3.1 A ESCOLHA DA AMPLITUDE DA CORRENTE DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Normalmente as folhas de dados de capacitores CC informam dois valores de oscilação de corrente, permitidos para uma determinada frequência e temperatura. Deste modo, o valor de $I_{m\acute{a}x}$ deve ser adequadamente escolhido, visando a manutenção da vida útil dos capacitores do conversor estático.

Além disso, quanto menor for o valor de $I_{m\acute{a}x}$ escolhido, consegue-se solucionar (3.6), através do método de Newton-Raphson, para maiores valores de tensão do barramento CC do DSTATCOM. Ou seja, no final do processo de pré-energização a tensão do barramento CC atingirá um valor mais próximo do valor de pico da tensão da rede elétrica. A justificativa é que, no final da pré-energização, a diferença de tensão entre a rede elétrica e o capacitor C_{eq} pode não ser suficientemente grande para se ter o valor de $I_{m\acute{a}x}$ desejado.

Por outro lado, quanto menor for o valor de $I_{m\acute{a}x}$ mais demorado será o processo de pré-energização. Desta forma, como neste capítulo são apresentadas apenas simulações, o valor de $I_{m\acute{a}x}$ escolhido para energizar o DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV, modelado no Capítulo 2, foi 45 A.

3.3.2 A CURVA CARACTERÍSTICA DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO

Na Figura 27 é mostrada a curva característica que relaciona os ângulos obtidos quando aplica-se o método de Newton-Raphson sucessivamente em (3.6) para a tensão V_{cc} variando de zero até 30 kV, de 5 V em 5 V. O valor inicial do ângulo α , utilizado no método de Newton-Raphson, para $V_{cc} = 0$, pode ser 180° . Porém, para que a convergência fosse mais rápida, o valor inicial utilizado foi 160° . Para os próximos valores da tensão do barramento CC ($V_{cc} = 5, 10, 15 \dots$) o ângulo α_e utilizado no início de cada processo iterativo foi o ângulo obtido para a tensão do barramento CC anterior.

Para que se possa calcular o ângulo α_e , a partir da tensão do barramento CC medida, a curva da Figura 27 deve ser representada matematicamente, como mostrado na Seção 3.4 a seguir.

3.3.3 O DESEMPENHO DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Na Figura 28 é mostrado o gráfico com os valores de pico da corrente do circuito de pré-energização síncrona, encontrados durante a solução do método de Newton-Raphson, para cada valor de tensão do barramento CC do DSTATCOM. Como a tolerância escolhida do método de Newton-Raphson foi de 0,1 %, nota-se que os valores de corrente estão dentro da faixa esperada (44,955 A a 45,045 A).

É importante também ressaltar que quando a tensão do barramento CC se aproxima do valor de pico da tensão da rede o erro de corrente aumenta com uma taxa muito

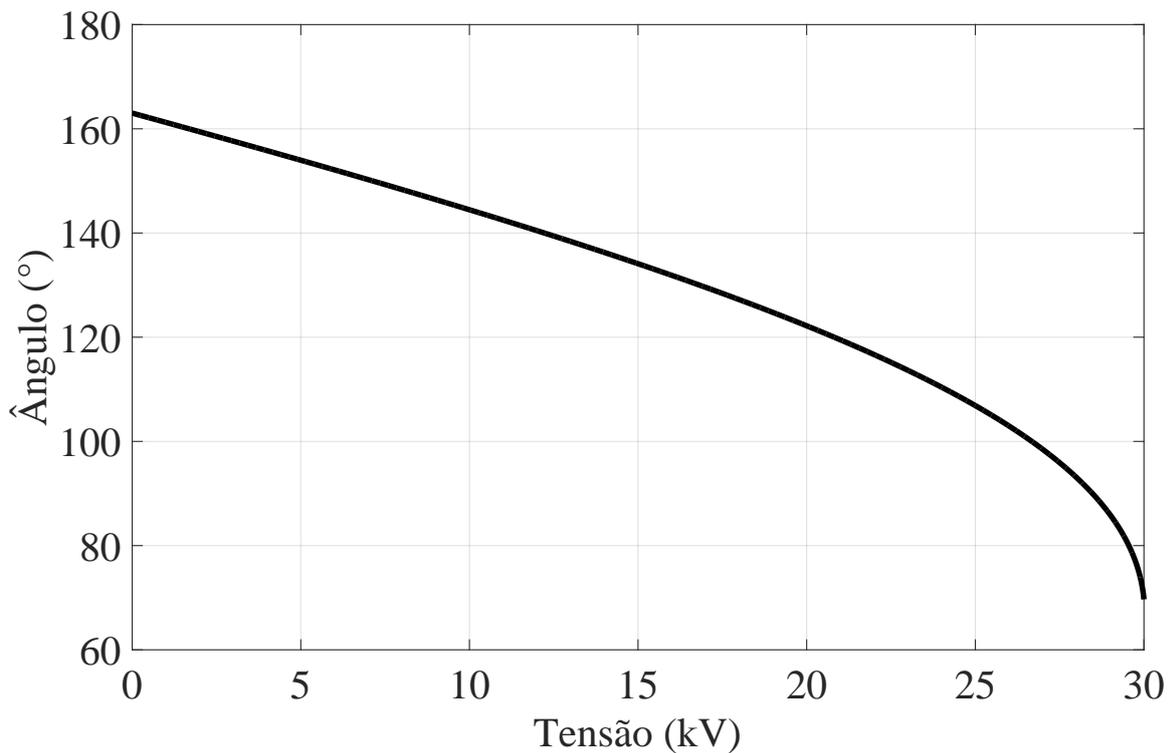


Figura 27: Característica V_{cc} x α para a pré-energização síncrona do DSTATCOM.

elevada, pois, aproxima-se do momento que não é mais possível obter o valor de corrente desejado. A partir da escolha de $I_{m\acute{a}x}$, pode-se então solucionar (3.6) para vários valores de V_{cc} até que se atinja um limite de iterações. Porém, neste trabalho, o valor máximo de V_{cc} e o valor de $I_{m\acute{a}x}$ foram ajustados manualmente até que fossem obtidos os valores inteiros 30 kV e 45 A, respectivamente.

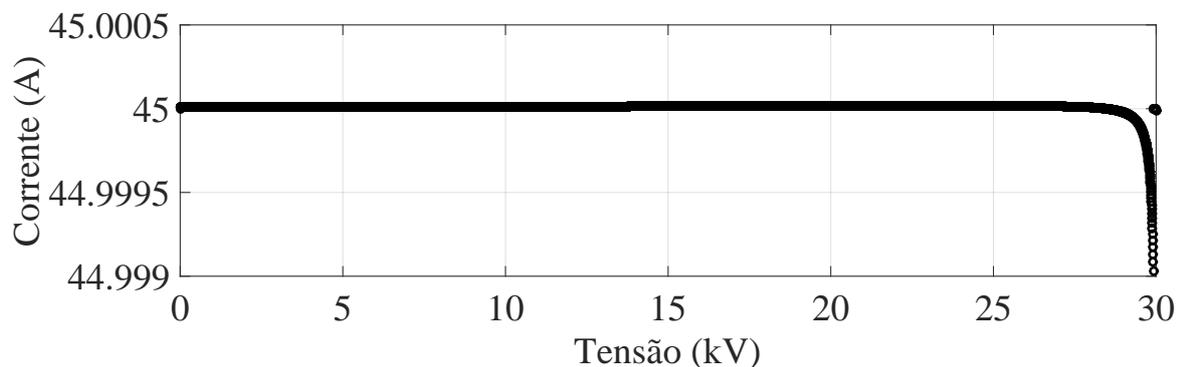


Figura 28: Valores de pico da corrente do circuito de pré-energização do DSTATCOM calculados durante a resolução do método de Newton-Raphson.

Além disso, também foram armazenados os números de iterações necessárias para solucionar (3.6) para cada valor de V_{cc} . Na Figura 29 foram plotados os números de iterações e as respectivas tensões do barramento CC. Pode-se observar que o maior

número de iterações foi para $V_{cc} = 0$, seguido dos últimos valores de tensão (3 e 2 iterações, respectivamente). Para todos os outros valores de V_{cc} foi necessária somente uma iteração, o que demonstra a eficiência do método de solução de equações não lineares utilizado.

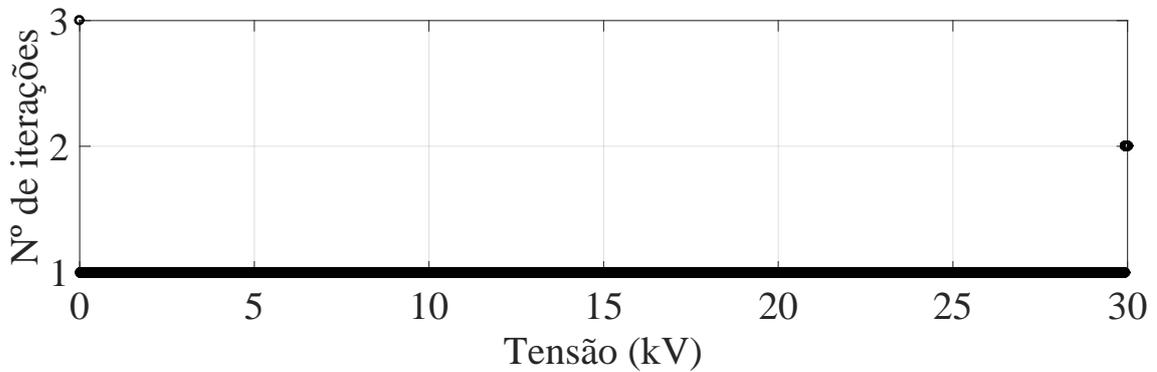


Figura 29: Número de iterações necessárias durante a resolução do método de Newton-Raphson.

3.4 A APROXIMAÇÃO LINEAR POR PARTES DA CARACTERÍSTICA DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO

Para que se possa implementar o controle da corrente do circuito da Figura 25, buscou-se uma forma de representar a característica $V_{cc} \times \alpha_e$ matematicamente.

Inicialmente pensou-se em realizar uma interpolação linear, utilizando as características (V_{cc}, α_e) , obtidas pela solução numérica de (3.4). Porém, esta alternativa demandou um elevado esforço computacional, já que os vetores de tensão e ângulo devem ser armazenados e percorridos por um *loop* a cada passo de simulação ou período de amostragem do DSP. Neste caso, a busca pelos valores inferior e superior ao valor de tensão CC medido foi feito em tempo real. Outra tentativa foi representar a característica $V_{cc} \times \alpha_e$ por meio de polinômios, porém, também foi demandado um razoável esforço computacional.

Como solução para reduzir o esforço computacional, os vetores com os valores das soluções de α_e e V_{cc} foram usados para ajustar os coeficientes de uma aproximação linear por partes (CHUA & LIN, 1975), de forma a representar a característica $V_{cc} \times \alpha_e$ matematicamente. Desta forma, pode-se processar rapidamente os cálculos necessários para encontrar o ângulo α_{PWL} para cada valor de V_{cc} medido em tempo real.

A forma canônica de uma aproximação linear por partes pode ser escrita como se segue:

$$\alpha_{PWL}(V_{cc}) = a + bV_{cc} + \sum_{k=1}^n C_k |V_{cc} - V_{cc,k}|, \quad (3.15)$$

onde V_{cc} é a tensão medida do barramento CC em (V); n é o número de pontos de quebra da aproximação linear por partes; a e b são os coeficientes independente e linear em ($^\circ$) e ($^\circ/V$), respectivamente; $V_{cc,k}$ e C_k são os pontos de quebra e os coeficientes genéricos em (V) e ($^\circ/V$), respectivamente; α_{PWL} é o ângulo da aproximação linear por partes em ($^\circ$) e k é um número inteiro.

Os coeficientes angulares (inclinações) dos segmentos de reta entre os pontos r e $(r+1)$ da aproximação PWL, para os cálculos dos coeficientes a , b e C_k , são encontrados da seguinte maneira:

$$m_r = \frac{\alpha_{(r+1)} - \alpha_r}{V_{cc,(r+1)} - V_{cc,r}}, \quad (3.16)$$

onde $\{r \in \mathbb{Z}_+ | 0 \leq r \leq n\}$.

Os coeficientes a , b e C_k da aproximação linear por partes são calculados respectivamente por:

$$\begin{cases} a = \alpha_0 - \sum_{k=1}^n C_k |V_{cc,k}| \\ b = \left(\frac{m_0 + m_n}{2} \right) \\ C_k = \left(\frac{m_k + m_{(k-1)}}{2} \right) \end{cases}, \quad (3.17)$$

onde α_0 é a solução numérica para $V_{cc} = 0$ e m_0 e m_n são a primeira e a última inclinações da aproximação linear por partes, respectivamente.

Para demonstrar a aproximação PWL, foram escolhidos dois pontos de quebra para linearizar a curva da Figura 27. Deste modo, na Figura 30 é mostrada a aproximação PWL sobreposta na característica V_{cc} x α_e e na Tabela 4 são dados os valores dos pontos de quebra. Os valores dos coeficientes da aproximação linear por partes são apresentados no Apêndice B.

Porém, na prática necessita-se de mais pontos de quebra, de forma que a aproximação PWL represente melhor a característica V_{cc} x α_e mostrada na Figura 27. Na Figura 31 é mostrada a aproximação PWL, em que foram utilizados 11 pontos de que-

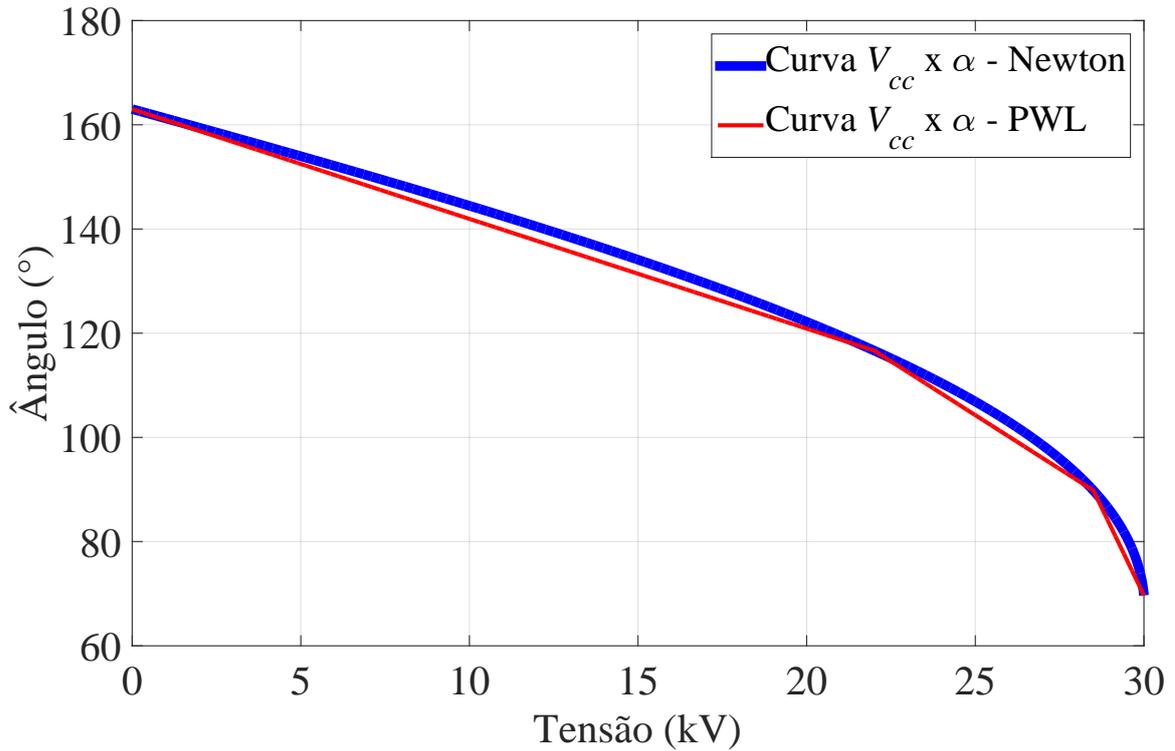


Figura 30: Aproximação PWL com dois pontos de quebra sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_e$.

Tabela 4: Pontos de quebra da aproximação PWL com dois pontos de quebra.

Número do ponto de quebra	Valor da Tensão (kV)
1	22
2	28,5

bra, sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_e$. Na Tabela 5 são dados os valores dos pontos de quebra e os valores dos coeficientes são dados no Apêndice B.

Tanto a solução de (3.4) quanto a linearização por partes da característica $V_{cc} \times \alpha_e$ são realizadas *offline*, ou seja, não são feitas em tempo real. Desta forma, para cada valor de V_{cc} medido, deve-se apenas substituir este valor de tensão em (3.15), de maneira a encontrar o ângulo α_{PWL} que garanta que o valor de pico da corrente de pré-energização seja igual a $I_{máx}$ durante todo o processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM.

3.4.1 O CONTROLADOR DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO DO DSTATCOM

Na Figura 32 é mostrado o diagrama de blocos detalhado do controlador de pré-energização do DSTATCOM. A tensão do barramento CC é medida e, depois de

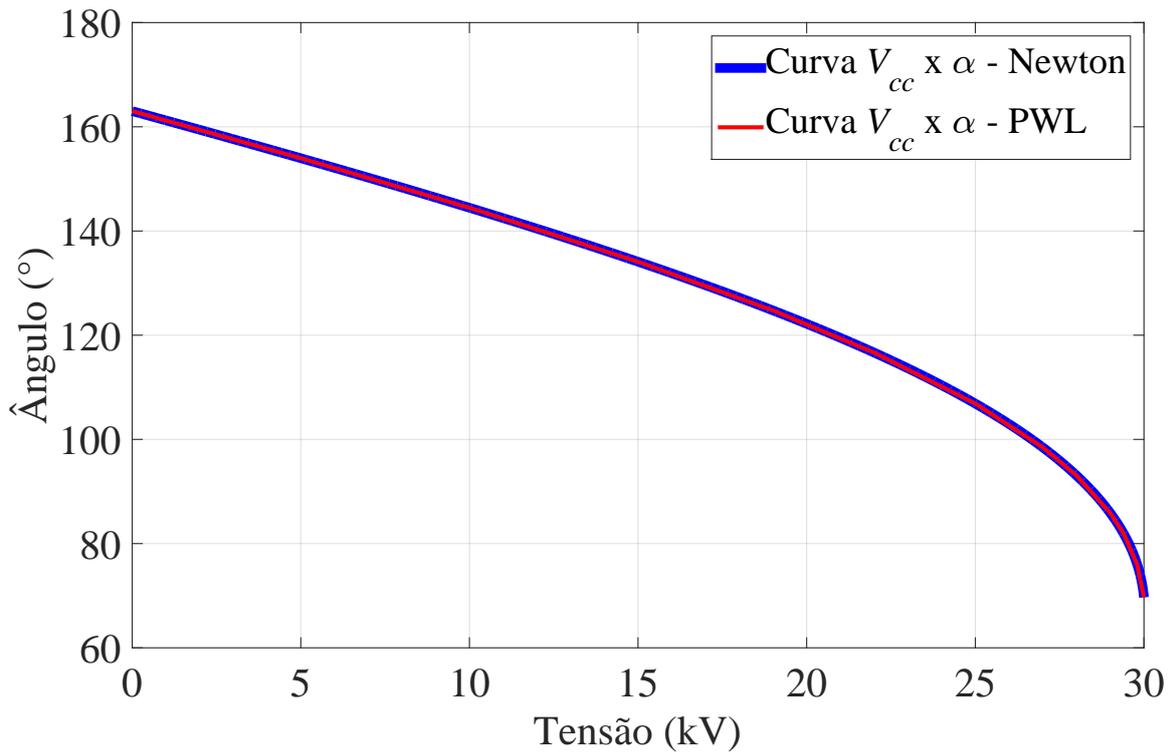


Figura 31: Aproximação PWL, sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_e$, utilizada no processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM.

Tabela 5: Pontos de quebra da aproximação PWL da característica de pré-energização do DSTATCOM.

Número do ponto de quebra	Valor da Tensão (kV)
1	5
2	10
3	15
4	19
5	22
6	25
7	27
8	28
9	29
10	29,4
11	29,8

passar por um limitador, é processada pelo bloco PWL_e que fornece o sinal do ângulo α_e utilizando (3.15).

Após passar por um limitador o ângulo α_e é usado pelo bloco do controlador de energização C_e . Os limites inferiores e superiores dos limitadores de tensão e ângulo

são (0 V e 30 kV) e (0° e 180°), respectivamente. Um circuito de sincronismo é usado para rastrear o ângulo ρ da tensão $v_{pac,a}(t)$ aplicada nos terminais do DSTATCOM. Sabendo-se que a tensão de linha é defasada da tensão de fase em 30° , o ângulo ρ_{ab} da tensão $v_{pac,ab}(t)$ é obtido somando 30° ao ângulo ρ . Por fim, o ângulo resultante é enviado ao controlador C_e para gerar os sinais de disparo $Fire_{T1}$ e $Fire_{T2}$ dos tiristores.

Na Figura 33 é apresentado o fluxograma com a lógica do controlador C_e . Neste fluxograma, os níveis lógicos 0 (zero) e 1 (um) dos sinais $Fire_{T1}$ e $Fire_{T2}$ são usados para representar os estados de bloqueio e condução dos respectivos interruptores. A cada passo de simulação ou período de amostragem de um DSP os ângulos ρ_{ab} e α_e são lidos pelo controlador C_e . Tendo em mente as formas de onda da Figura 26, tem-se que, na primeira passagem pelo semiciclo positivo da tensão $v_{s,ab}$, nenhum tiristor é disparado para ($0 \leq \rho_{ab} < \alpha_e$). Após o primeiro ciclo completo da senóide, a condição ($\rho_{ab} \geq \alpha_{e\pi}$) já ocorreu e o tiristor T_2 já foi disparado. Desta forma, o sinal $Fire_{T2}$ ficará no nível lógico 1 para ($\alpha_{e\pi} \leq \rho_{ab} \leq 180^\circ$) e se manterá no nível lógico 1 para ($0 \leq \rho_{ab} < \alpha_e$). Para ($\alpha_e \leq \rho_{ab} < \alpha_{e\pi}$) o sinal $Fire_{T1}$ estará no nível lógico 1. Porém, após o disparo de T_1 , a tensão CC se torna maior que a tensão CA e o tiristor T_1 é disparado apenas uma vez para ($\alpha_e \leq \rho_{ab} < \alpha_{e\pi}$).

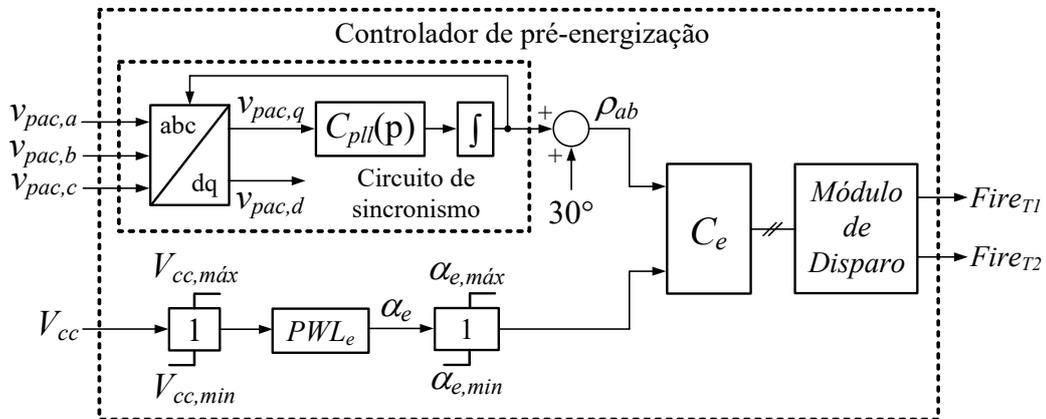


Figura 32: Diagrama de blocos do controlador de pré-energização do DSTATCOM.

3.5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO DO DSTATCOM

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação do processo de pré-energização síncrona do compensador estático. O sistema da Figura 24 foi modelado no programa PSIM a fim de demonstrar o processo de pré-energização proposto para o DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV. Os parâmetros da rede, do compensador e dos controladores do

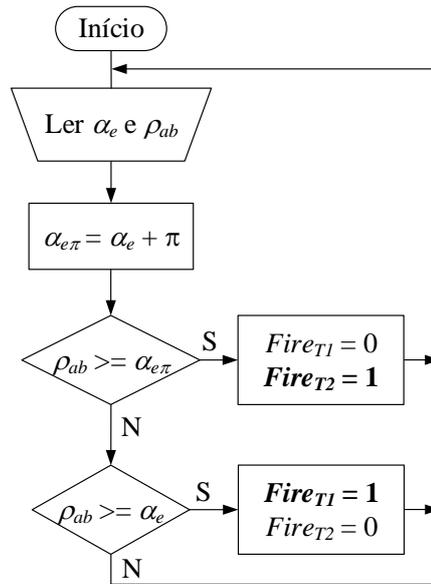


Figura 33: Fluxograma do controlador de energização C_e .

DSTATCOM são os mesmos daqueles indicados no Capítulo 2.

Nas Figuras 34 (a), (b) e (c) são mostradas as formas de onda do ângulo de disparo dos tiristores calculado pelo controlador de pré-energização, da corrente da fase “a” e da tensão do barramento CC do DSTATCOM, respectivamente. Inicialmente o contato Sw_2 é fechado enquanto os contatos Sw_1 e Sw_3 são mantidos abertos. O capacitor CC é energizado com uma corrente controlada cujo valor de pico não ultrapassa $I_{máx} = 45$ A. Como o valor médio da corrente de pré-energização é mantido constante durante esse período, a tensão CC sobre o capacitor do compensador cresce linearmente.

Para uma melhor visualização da dinâmica do processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM, nas Figuras 35 (a), (b), (c) e (d) são mostradas, em detalhes (19,95 a 20,05 s), as formas de onda do ângulo de disparo dos tiristores, da tensão do barramento CC, da corrente da fase “a” e da tensão de linha da rede elétrica, respectivamente. Nota-se que a cada disparo dos tiristores ocorre um pulso de corrente na frequência da rede e, conseqüentemente, a tensão do barramento CC é aumentada.

3.6 O CIRCUITO DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Na Seção 3.5 foram apresentados os resultados de simulação do processo de pré-energização síncrona, utilizando a topologia de circuito que inclui um braço de tiristores

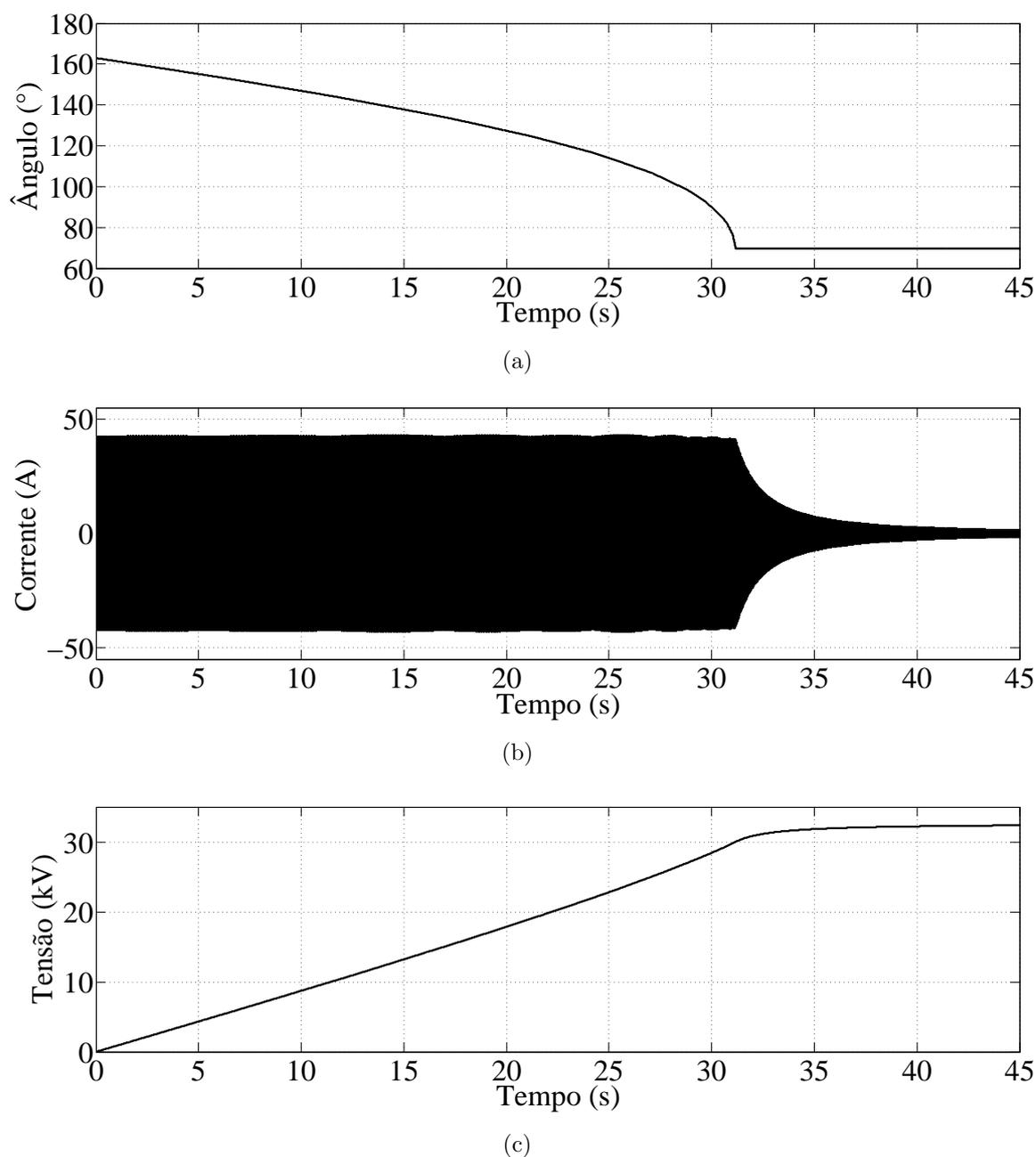


Figura 34: Formas de onda durante o processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV: (a) Ângulo de disparo dos tiristores, (b) corrente da fase “a” e (c) tensão do barramento CC.

no VSC. Porém, nas aplicações práticas é importante também descarregar totalmente o capacitor do DSTATCOM para realizar uma rápida manutenção ou retirar o compensador de operação (HASLER, 2014). Como a topologia do circuito da Figura 24 não é capaz de desenergizar o conversor, na Figura 36 é mostrada uma topologia de circuito capaz de realizar os processos de pré-energização e desenergização. Porém, nesta topologia são adicionados quatro tiristores na configuração original do VSC e, conseqüentemente, o custo aumentaria. Na Figura 37 é apresentada uma outra topo-

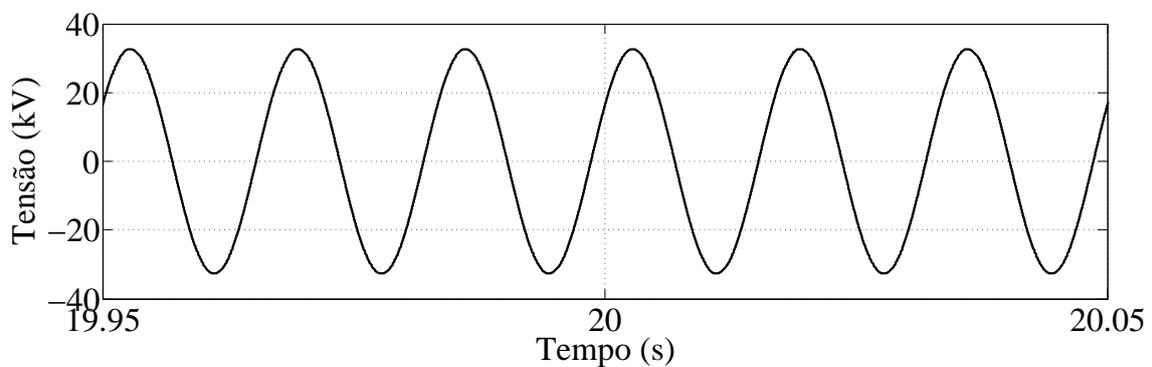
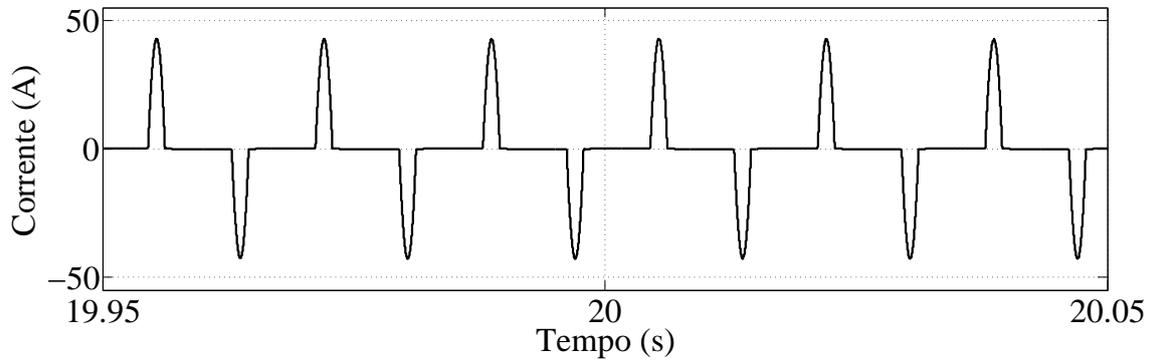
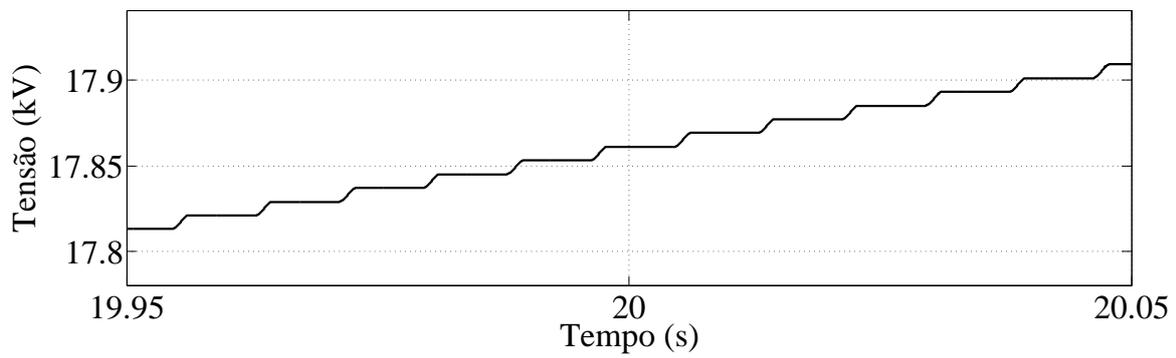
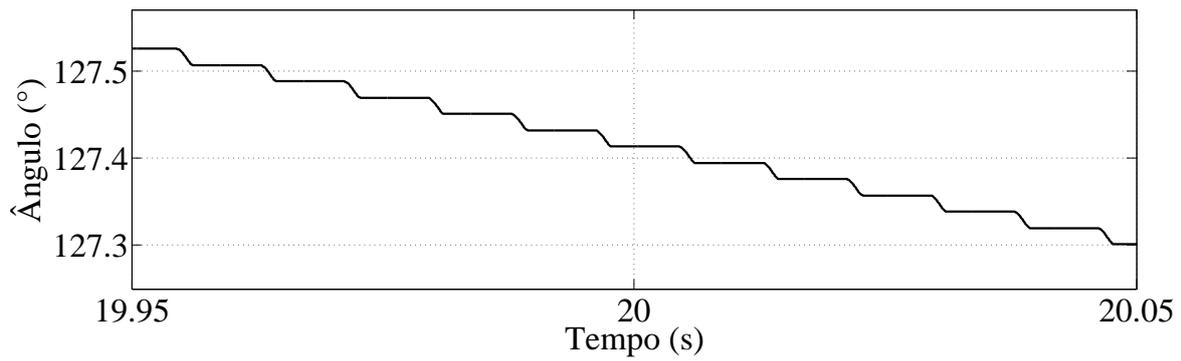


Figura 35: Detalhes das formas de onda durante o processo de pré-energização síncrona do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV: (a) Ângulo de disparo dos tiristores, (b) tensão do barramento CC, (c) corrente da fase “a” e (d) tensão de linha da rede elétrica ($v_{s,ab}$).

logia, capaz de realizar os processos de pré-energização e desenergização do conversor adicionando apenas dois tiristores na configuração original do VSC. Os tiristores T_1 e T_2 são agora conectados em antiparalelo numa configuração de um gradador (RASHID, 2010).

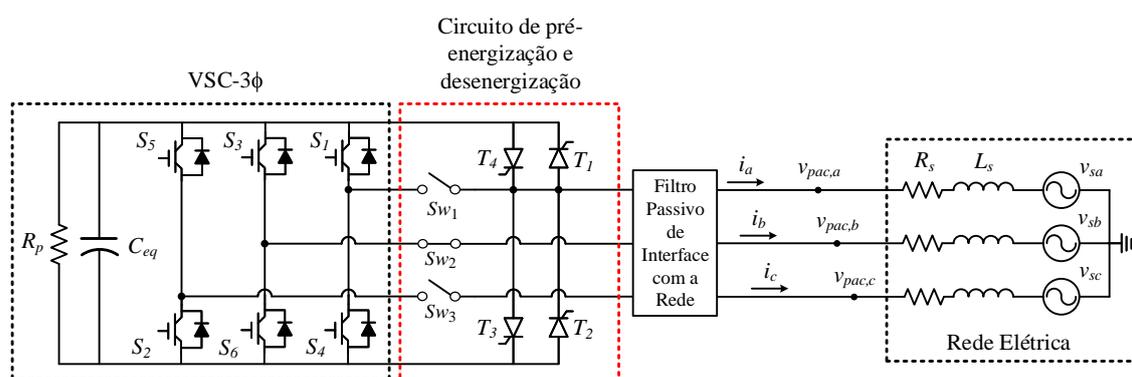


Figura 36: Topologia do circuito de pré-energização e desenergização usando dois braços de tiristores no VSC.

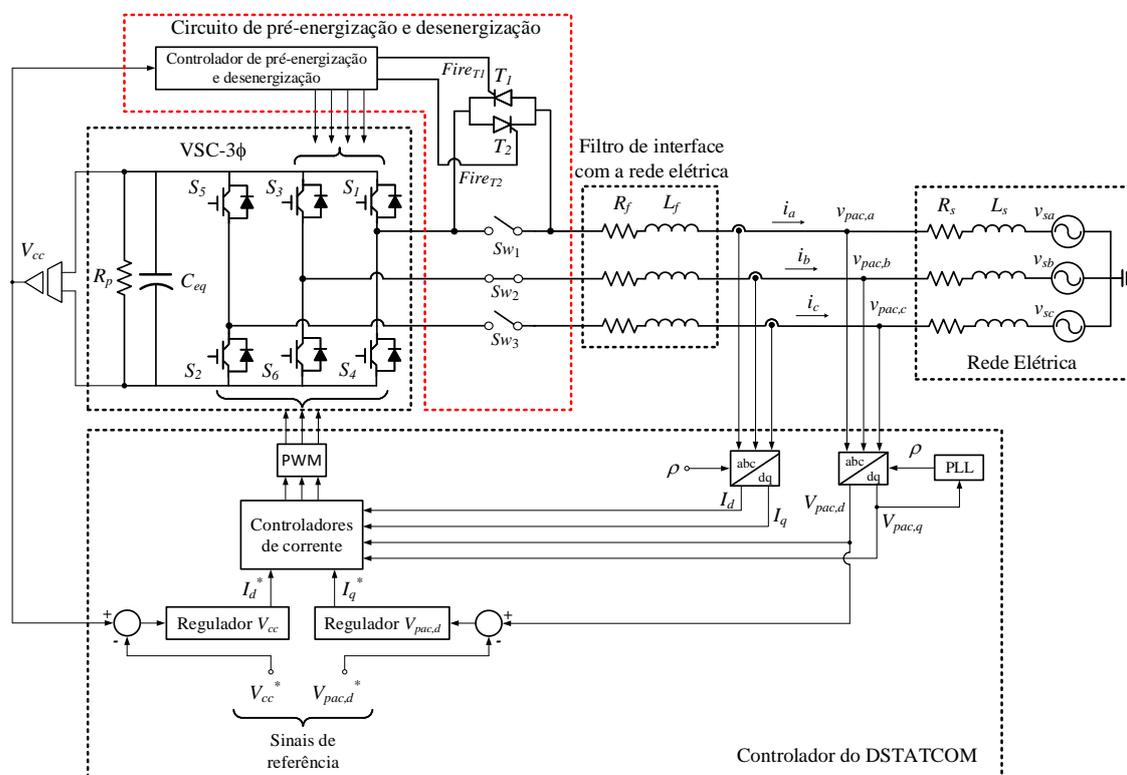


Figura 37: Topologia do circuito de pré-energização e desenergização do DSTATCOM.

3.6.1 A ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO CIRCUITO DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Durante a pré-energização, os contatos Sw_1 e Sw_3 devem ser mantidos abertos e o contato Sw_2 fechado. O ângulo de disparo dos tiristores é variado de acordo com a característica V_{cc} x α_e mostrada na Figura 27. Na Figura 38 (a) é mostrado o circuito equivalente do DSTATCOM durante o processo de pré-energização e o sentido da corrente de carga do capacitor CC para $v_{s,ab} \geq 0$. Esse circuito se comporta como um retificador a diodos de onda completa cuja tensão de entrada é controlada pelos tiristores T_1 e T_2 .

Já durante a desenergização, além dos tiristores T_1 e T_2 , os interruptores ($S_1 - S_6$) e ($S_3 - S_4$) devem ser acionados em sincronismo com os semiciclos positivo e negativo da tensão de alimentação. Na Figura 38 (b) é mostrado o circuito equivalente do DSTATCOM durante o processo de desenergização e o sentido da corrente de descarga do capacitor CC para $v_{s,ab} \geq 0$. Nas Figuras 39 (a) e (b) são mostradas as formas de onda da tensão CC do capacitor, da tensão CA da rede e da corrente de descarga, respectivamente.

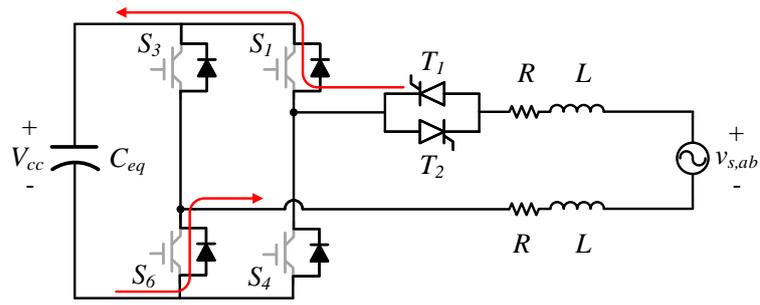
Durante a desenergização os tiristores T_1 e T_2 devem ser disparados com um ângulo $\alpha < 90^\circ$. Nessa região a tensão V_{cc} será maior que a tensão $v_{s,ab}(t)$ e a corrente $i(t)$ irá fluir do capacitor para a rede CA, conforme indicado na Figura 38 (b). Os interruptores ($S_1 - S_6$) devem ser mantidos fechados enquanto a corrente pelo circuito é positiva. Já os interruptores ($S_3 - S_4$) devem ser disparados juntamente com T_1 . Depois do disparo, ocorrerá o bloqueio natural dos tiristores em $\omega_0 t = \beta$ e os IGBTs poderão ser comutados com corrente nula.

3.6.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CORRENTE DE DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

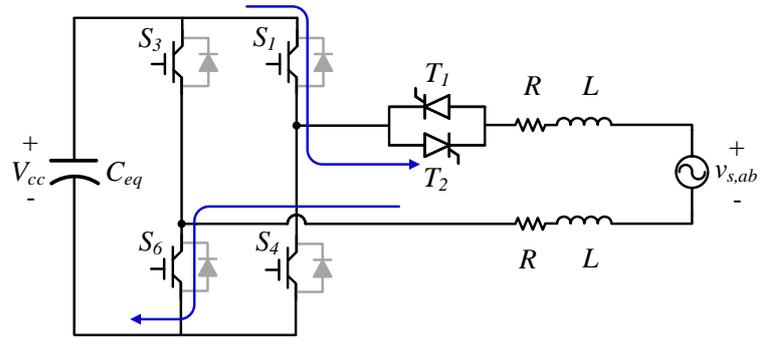
Tendo em mente o circuito equivalente da Figura 38 (b) pode-se escrever a seguinte relação para a corrente de desenergização do DSTATCOM:

$$2L \frac{di(t)}{dt} + 2Ri(t) + \frac{1}{C_{eq}} \int_0^t i(\lambda) d\lambda = [V_{cc}(\alpha^- / \omega_0) - v_{s,ab}(t)] U_{-1} \left(t - \frac{\alpha}{\omega_0} \right). \quad (3.18)$$

Utilizando a mesma metodologia apresentada na Seção 3.2 e desprezando o efeito da resistência série, a solução de (3.18) é dada por:



(a)



(b)

Figura 38: (a) Topologia equivalente do circuito de pré-energização do DSTATCOM, (b) topologia equivalente do circuito de desenergização do DSTATCOM.

$$\begin{aligned}
 i(t) = & \left\{ \frac{\sqrt{2}V_L\omega_0}{2L(\omega_r^2 - \omega_0^2)} \left[\cos(\alpha) \cos\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega_0}\right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \cos(\omega_0 t) - \left(\frac{\omega_r}{\omega_0}\right) \sin(\alpha) \sin\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega_0}\right) \right] + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{V_{cc}}{2L\omega_r}\right) \sin\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega_0}\right) \right\} U_{-1}\left(t - \frac{\alpha}{\omega_0}\right), \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

sendo $\omega_r = 1/\sqrt{2LC_{eq}}$.

Como no caso anterior, a expressão analítica da corrente pelo circuito é válida somente para $\alpha \leq \omega_0 t \leq \beta$.

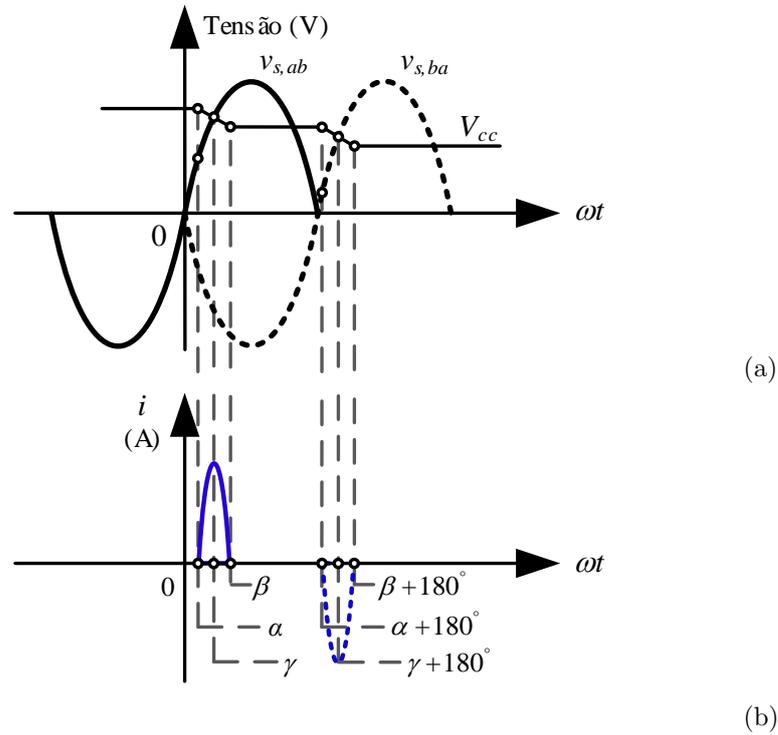


Figura 39: Formas de onda durante o processo de desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) tensão da rede e tensão CC e (b) corrente CA.

3.6.3 O CONTROLE DA CORRENTE DE DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Da Figura 39 (b), tem-se que o valor de pico da corrente de desenergização acontece no instante $\omega_0 t = \gamma_d$. Esse ângulo pode ser então estimado por:

$$\gamma_d \approx \text{sen}^{-1} \left(\frac{V_{cc}}{\sqrt{2}V_L} \right), \quad (3.20)$$

onde o subíndice (d) foi adicionado à variável γ para indicar que esse ângulo é referente a desenergização do compensador.

Novamente, conhecendo o valor da tensão V_{cc} , pode-se utilizar (3.19) para calcular o ângulo α_d de maneira que o pico da corrente de desenergização $i(t_{\gamma_d})$ seja $I_{máx}$.

3.6.4 A CURVA CARACTERÍSTICA DE DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Na Figura 40 são mostrados os ângulos obtidos quando aplica-se o método de Newton-Raphson sucessivamente em (3.19), para V_{cc} variando de 30 kV até zero, de

5 V em 5 V. Esses ângulos (α_d) foram calculados de maneira que o valor de pico da corrente dada por (3.19) seja 45 A, assim como na pré-energização do DSTATCOM.

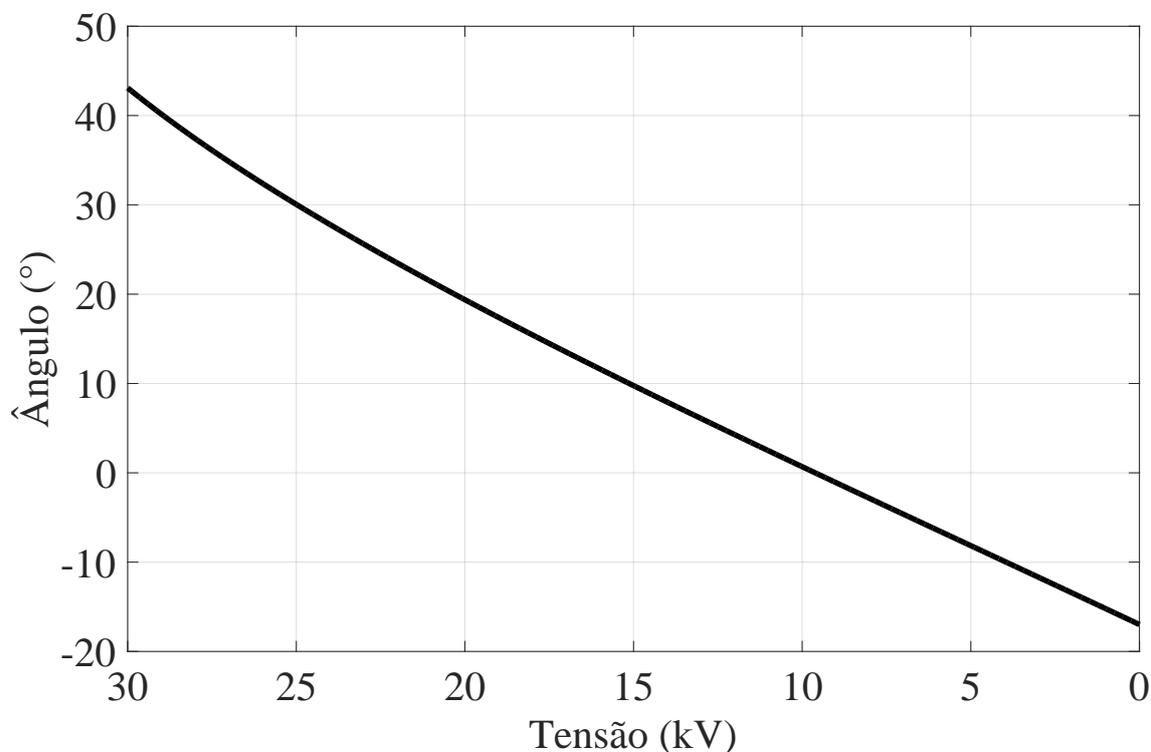


Figura 40: Característica V_{cc} x α_d para a desenergização do DSTATCOM.

3.6.5 A APROXIMAÇÃO LINEAR POR PARTES DA CARACTERÍSTICA DE DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

O método de linearização por partes também foi aplicado na característica V_{cc} x α_d da Figura 40. Na Figura 41 é mostrada a aproximação PWL sobreposta na característica V_{cc} x α_d . Na Tabela 6 são dados os valores dos pontos de quebra da aproximação linear por partes. Os valores dos coeficientes desta aproximação PWL são dados no Apêndice B.

3.6.6 O CONTROLADOR DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA DO DSTATCOM

Na Figura 42 é mostrado o diagrama de blocos detalhado do controlador de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM. Durante o processo de pré-energização a tensão do barramento CC é medida e, depois de passar por um limitador, é processada pelo bloco PWL_e de forma a fornecer o sinal do ângulo α_e . Já durante a desenergização síncrona, o sinal de tensão é processado por PWL_d de forma a fornecer

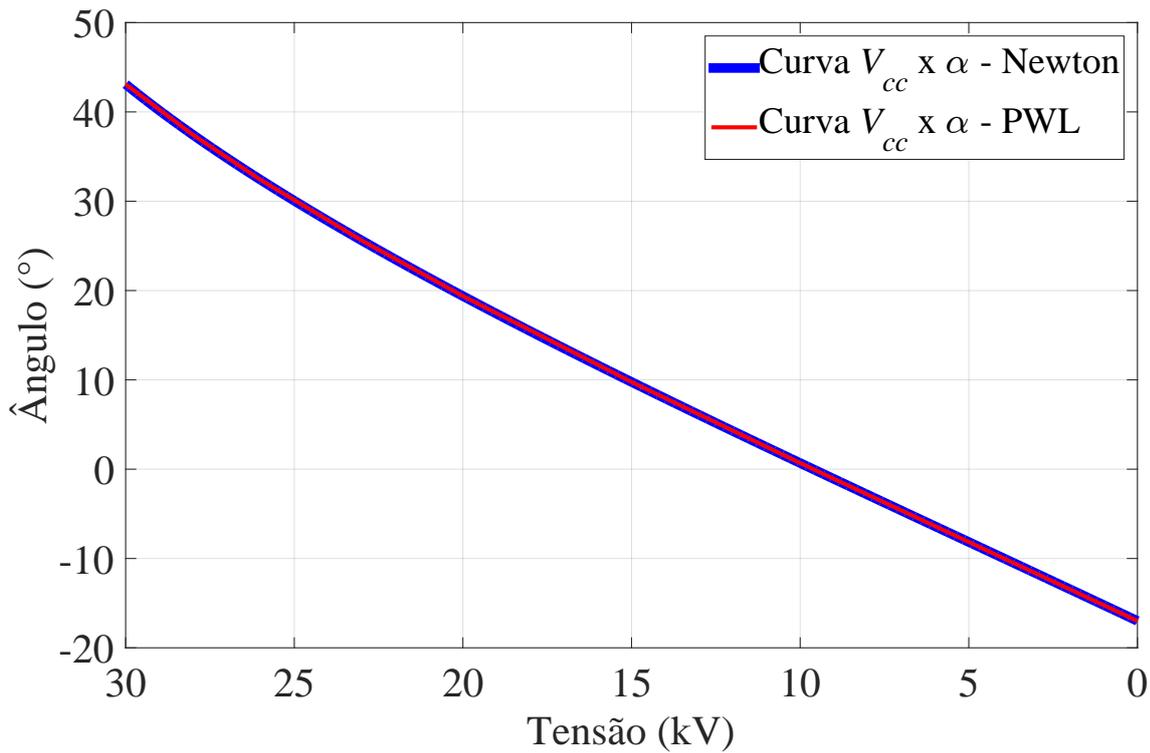


Figura 41: Aproximação PWL sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_d$ para a desenergização síncrona do DSTATCOM.

Tabela 6: Pontos de quebra da aproximação PWL da característica de desenergização síncrona do DSTATCOM.

Número do ponto de quebra	Valor da Tensão (kV)
1	10
2	15
3	20
4	23
5	26
6	28

α_d . Os blocos PWL_e e PWL_d fornecem os ângulos α_e e α_d a partir das representações matemáticas das características $V_{cc} \times \alpha$ das Figuras 31 e 41, respectivamente.

Após passar por limitadores os ângulos α_e e α_d são usados pelos blocos dos controladores de energização C_e e de desenergização C_d , respectivamente. Os limites inferior e superior do limitador do ângulo α_d são -90° e 90° , respectivamente. Um circuito de sincronismo é usado para rastrear o ângulo ρ_{ab} da tensão $v_{pac,ab}(t)$ aplicada nos terminais do DSTATCOM. Este ângulo é enviado aos controladores C_e e C_d para gerar os sinais de disparo ($Disp_{S1} - Disp_{S6}$) e ($Disp_{S3} - Disp_{S4}$) dos interruptores ($S_1 - S_6$) e

($S_3 - S_4$), e os sinais de disparo $Fire_{T1}$ e $Fire_{T2}$ dos tiristores, respectivamente. Uma chave seletora é usada para determinar se o capacitor será energizado ou desenergizado. Além disso, os blocos PWL_e e C_e são habilitados somente durante a pré-energização e os blocos PWL_d e C_d durante a desenergização síncrona.

Nas Figuras 33 e 43 são apresentados os fluxogramas com as lógicas dos controladores C_e e C_d , respectivamente. Nestes fluxogramas, os níveis lógicos 0 (zero) e 1 (um) dos sinais $Disp_{S1}$, $Disp_{S3}$, $Disp_{S4}$, $Disp_{S6}$, $Fire_{T1}$ e $Fire_{T2}$ são usados para representar os estados de bloqueio e condução dos respectivos interruptores. A lógica do fluxograma do controlador de desenergização C_d é similar à explicada para a pré-energização. Os ângulos α_d , solucionados através do método de Newton-Raphson podem ser negativos, como mostrado na curva característica de desenergização da Figura 40. Desta forma, para a condição ($\alpha_d < 0$) do fluxograma da Figura 43 o ângulo α_d é ajustado para valores entre 0 e 2π rad.

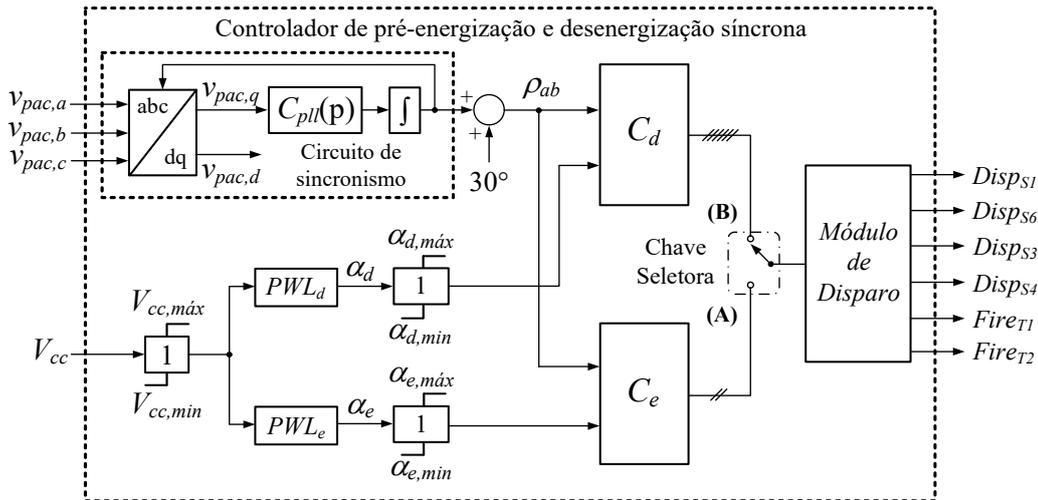


Figura 42: Diagrama de blocos do controlador de pré-energização e desenergização do DSTATCOM.

3.6.7 A DESENERGIZAÇÃO NATURAL DO CAPACITOR CC DO DSTATCOM

A malha de controle de corrente do DSTATCOM, projetada no Capítulo 2, é utilizada para reduzir a tensão do barramento CC até um valor próximo à tensão de pico da rede elétrica. Porém, como mencionado na Subseção 3.3.1, só é possível realizar o processo de desenergização síncrona, com uma corrente de 45 A, para $V_{cc} \leq 30$ kV. Este valor de tensão é atingido devido da dissipação da energia dos capacitores do barramento CC em suas resistências de equalização. A faixa de tensão que ocorre esta

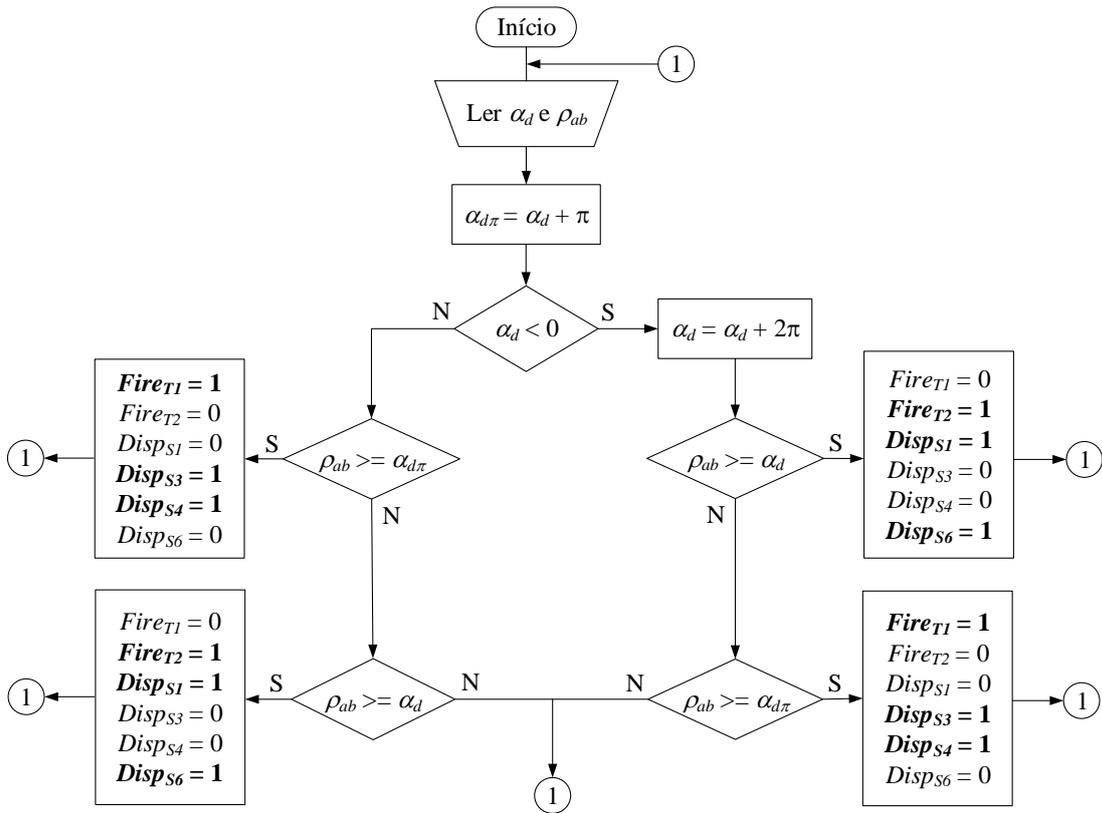


Figura 43: Fluxograma do controlador de desenergização C_d .

dissipação de energia ($\sqrt{2}$ 23,1 kV a 30 kV) é pequena se comparada com a tensão de operação do barramento CC (50 kV), o que não compromete o tempo total do processo de desenergização.

3.7 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA DO DSTATCOM

Na Seção 3.6 foi apresentado um circuito capaz de realizar tanto o processo de pré-energização quanto o processo de desenergização síncrona do DSTATCOM. Desta forma, o sistema da Figura 37 foi modelado no programa PSIM para demonstrar os processos síncronos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV. Os parâmetros da rede, do compensador e dos controladores do DSTATCOM são os mesmos daqueles indicados no Capítulo 2.

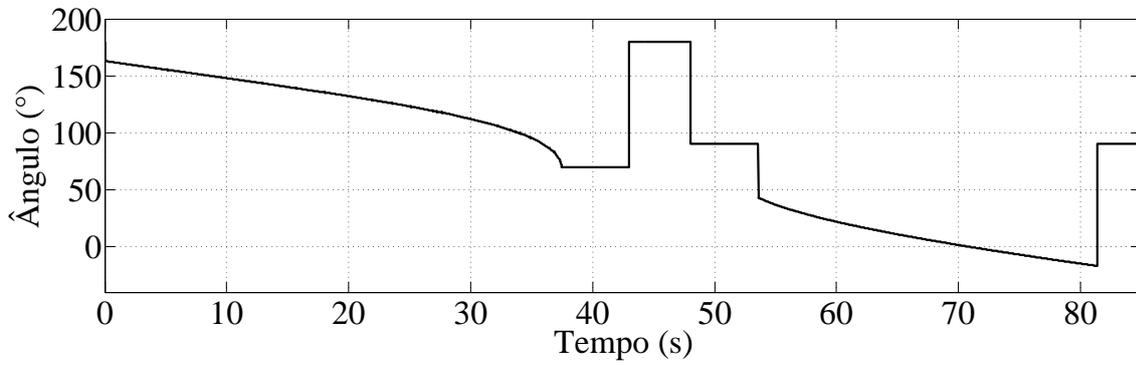
Nas Figuras 44 (a), (b) e (c) são mostradas, respectivamente, as formas de onda do ângulo α , da corrente da fase “a”, e da tensão do barramento CC do compensador. Inicialmente o DSTATCOM é conectado à rede CA com os contatos Sw_1 e Sw_3 abertos

e o contato Sw_2 fechado. Neste instante o controlador de pré-energização é habilitado. Quando a tensão do barramento CC atinge o valor de 30 kV ($t \approx 36$ s) o valor de pico da corrente começa a decair, o ângulo α é mantido constante e a tensão do barramento CC começa a se estabilizar.

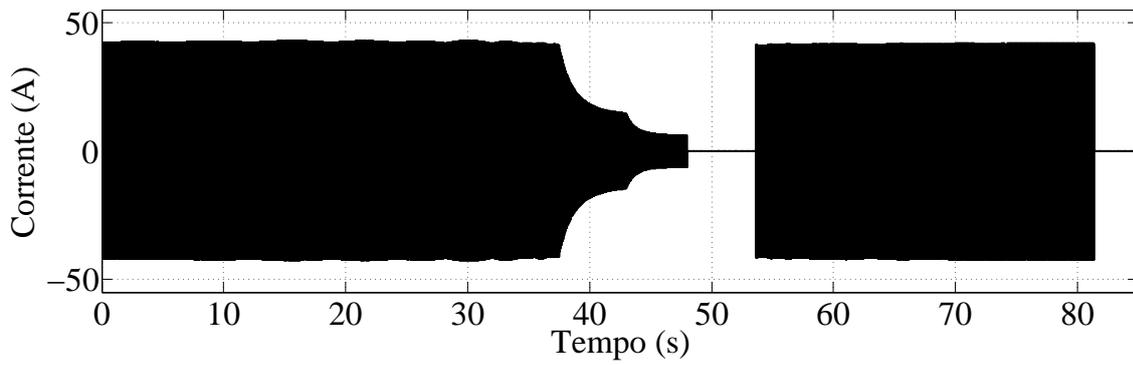
Na Figura 45 é mostrada a forma de onda da corrente da fase “a” do conversor em torno de $t = 43$ s. Antes de $t = 43$ s a corrente ainda estava sendo controlada pelo regulador do processo de pré-energização síncrona, apesar da tensão do barramento CC já estar ultrapassando o limite superior do seu limitador. A partir de $t = 43$ s o ângulo α é fixado em 180° , o controlador de pré-energização bloqueia o disparo dos tiristores T_1 e T_2 e os contatos Sw_1 e Sw_3 da chave mecânica são fechados. Neste instante, há uma mudança na topologia do circuito da Figura 37 e, conseqüentemente, a forma de onda da corrente da fase “a” do conversor é alterada. Com esta mudança de topologia, o DSTATCOM passa a funcionar como um retificador trifásico, em que C_{eq} continua sendo carregado através dos diodos dos IGBTs até que a tensão do barramento CC se iguale ao valor de pico da tensão da rede elétrica.

Em $t = 48$ s os contatos Sw_1 e Sw_3 são abertos, para que ocorra a descarga natural do capacitor do compensador. Quando $V_{cc} \leq 30$ kV ($t = 54$ s), o controlador de desenergização síncrona é habilitado. Na Figura 44 (c) pode-se notar que a taxa de variação da tensão do barramento CC é muito maior durante o processo de desenergização síncrona do que quando a energia contida em C_{eq} é dissipada nos resistores do barramento CC. Esta é a vantagem do processo de desenergização síncrona, além de se poder escolher o valor de pico da corrente durante este processo. Por fim, quando a tensão do barramento CC se torna nula ($t \approx 81$ s), o controlador de desenergização síncrona é desligado e o ângulo α é fixado em 90° .

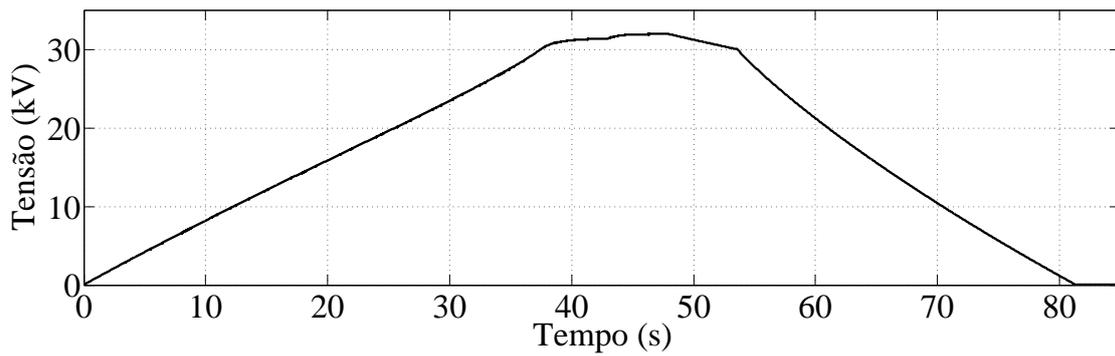
Para uma melhor visualização da dinâmica do processo de desenergização síncrona do DSTATCOM, nas Figuras 46 (a), (b), (c) e (d) são mostrados os detalhes (59,95 a 60,05 s) das formas de onda do ângulo α , da tensão do barramento CC, da corrente da fase “a” e da tensão de linha da rede CA ($v_{s,ab}$). Nas Figuras 46 (a), (b) e (c) pode-se notar que a cada disparo dos interruptores ocorre um pulso de corrente na frequência da rede e, conseqüentemente, C_{eq} é descarregado.



(a)



(b)



(c)

Figura 44: Formas de onda durante os processos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM: (a) Ângulo α , (b) corrente da fase “a” e (c) tensão do barramento CC.

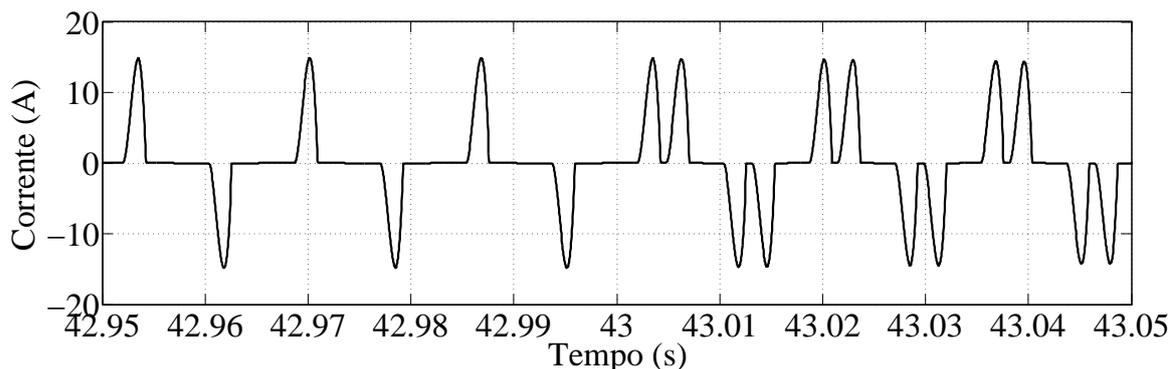


Figura 45: Forma de onda da corrente da fase “a” do DSTATCOM quando os contatos Sw_1 e Sw_3 da chave mecânica são fechados.

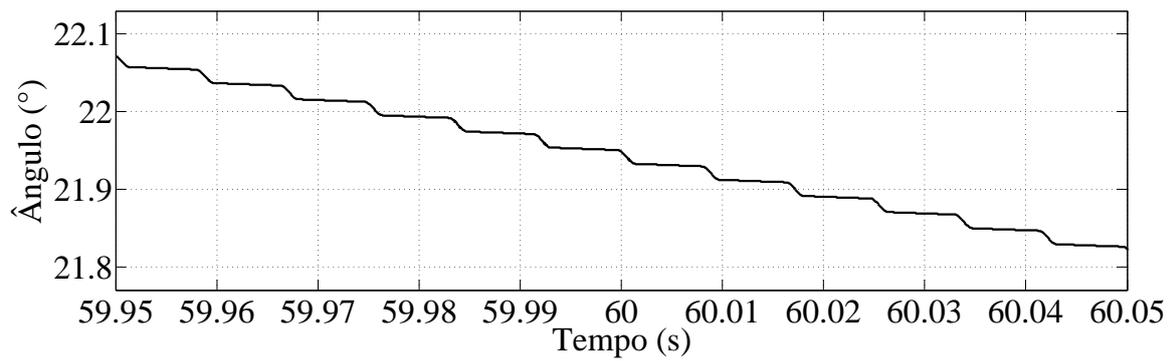
3.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CUSTO DAS TOPOLOGIAS PROPOSTAS

No lugar de cada tiristor, representados por T_1 e T_2 nas Figuras 24 e 37, pode-se utilizar uma válvula formada por vários tiristores conectados em série de forma que a tensão seja dividida entre os tiristores. Desta forma, as topologias dos circuitos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM se tornam mais atrativas ainda do ponto de vista econômico. Na Figura 47 é ilustrado um divisor de tensão formado pelos tiristores.

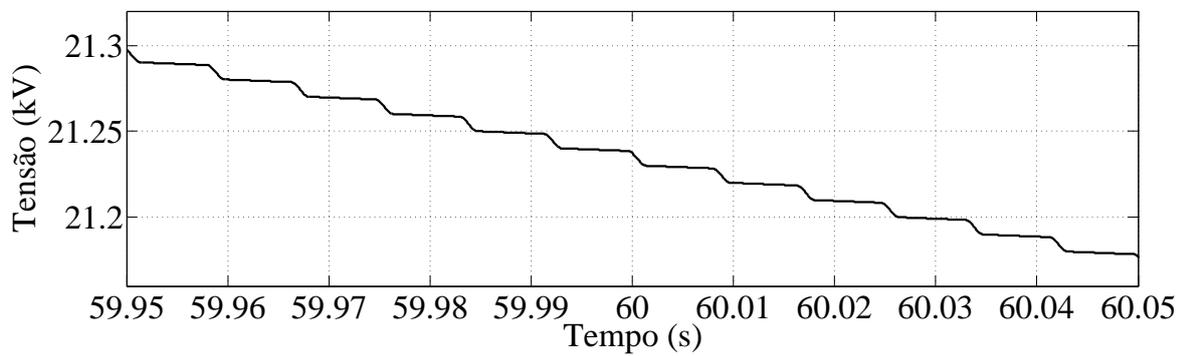
Em todas as topologias dos circuitos apresentados neste trabalho foram utilizados dois tiristores para realizar os processos síncronos de pré-energização e desenergização do conversor. Se apenas um tiristor fosse utilizado, existiria um valor CC na corrente terminal do conversor que, dependendo de sua potência nominal, poderia causar perdas no sistema, saturação de transformadores e até mesmo frenagem de cargas motrizes eletricamente próximas ao PAC (HART, 2011). Desta forma, apesar de aumentar o custo dos circuitos propostos e do fato de que apenas um tiristor já é capaz de realizar os processos de pré-energização e desenergização, dois tiristores são utilizados de forma a permitir uma corrente alternada nos terminais do conversor e reduzir os tempos dos processos devido à bidirecionalidade da corrente.

3.9 CONCLUSÕES PARCIAIS

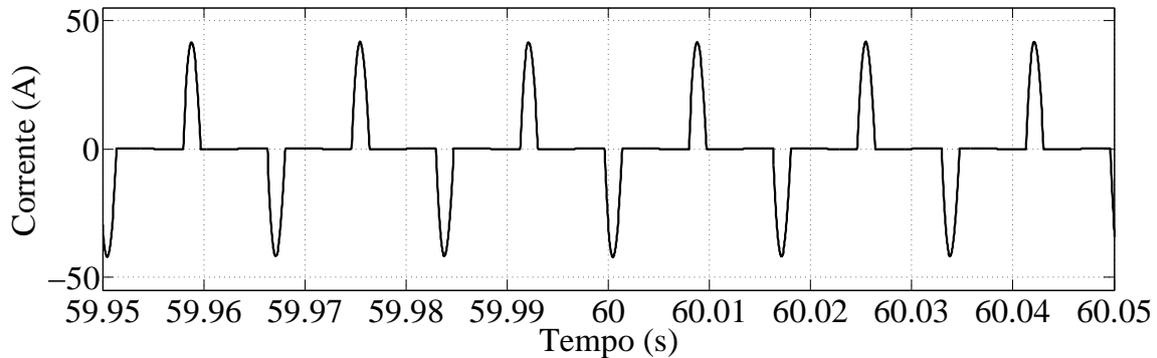
Neste capítulo foram propostas algumas topologias de circuito para realizar os processos síncronos de pré-energização e desenergização de um DSTATCOM. O modelo matemático da equação que descreve a dinâmica da corrente pelo circuito equivalente



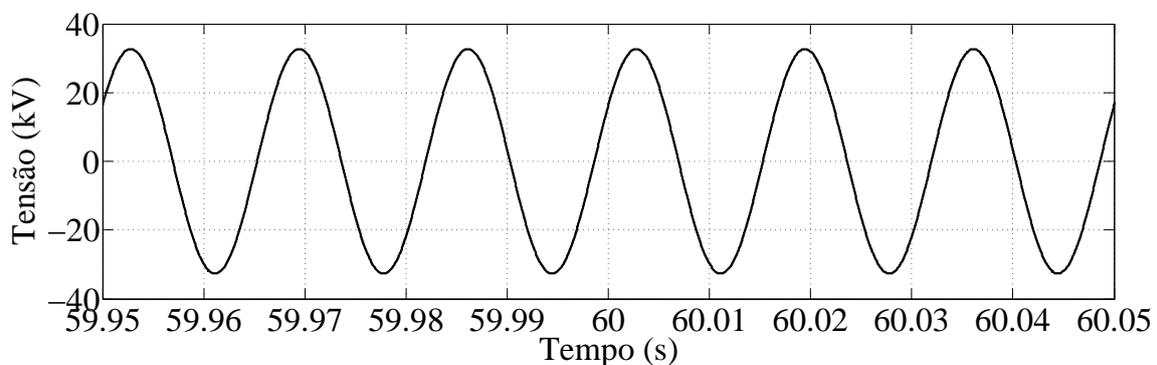
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 46: Detalhes das formas de onda durante o processo de desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) Ângulo α , (b) tensão do barramento CC, (c) corrente da fase "a" e (d) tensão de linha da rede CA ($v_{s,ab}$).

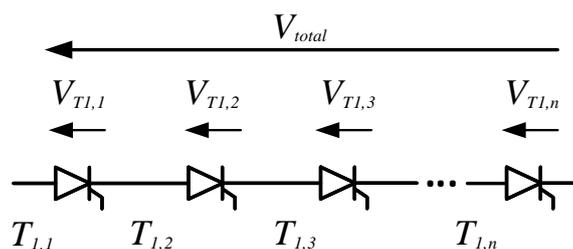


Figura 47: Válvula formada por vários tiristores conectados em série.

foi apresentado e, devido à sua não linearidade, o método de Newton-Raphson foi usado para solucionar a equação de forma a se obter os ângulos de disparo dos interruptores que garantam uma corrente de pico constante e pré-determinada. A eficiência do método de Newton-Raphson foi constatada na Figura 29. Uma aproximação PWL da característica $V_{cc} \times \alpha$ foi feita para que fosse possível realizar os cálculos necessários ao acionamento dos interruptores com um baixo esforço computacional. Nas Figuras 23 e 44 os tempos para realizar o processo de desenergização do DSTATCOM são aproximadamente 500 s e 35 s, respectivamente. Esta diferença de tempo, demonstra que o processo de desenergização síncrona é muito mais rápido do que o processo de desenergização natural do capacitor CC do DSTATCOM. Resultados de simulação dos processos síncronos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV, modelado no Capítulo 2, foram apresentados para validação da metodologia proposta.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nos Capítulos 2 e 3 foram apresentadas simulações digitais de um DSTATCOM de 10 MVA conectado a uma rede elétrica cuja tensão nominal de linha é 23,1 kV. Porém, para obtenção de resultados experimentais dos processos de energização e desenergização, é utilizado um DSTATCOM de pequena escala, com potência e tensão nominais de 3,8 kVA e 220 V, respectivamente. Resultados de simulação também são apresentados para comparação com os resultados obtidos em laboratório.

4.1 PARÂMETROS DO SISTEMA DE PEQUENA ESCALA

Nesta seção são dados os parâmetros do sistema teste utilizado para realizar as simulações e as práticas experimentais em laboratório. Nas Tabelas 7, 8, 9 e 10 são dados os parâmetros da rede de distribuição, do filtro de interface, do DSTATCOM e dos controladores de corrente e tensão CC do compensador estático, respectivamente.

Tabela 7: Parâmetros da rede de distribuição do sistema de pequena escala.

Grandeza	Valor
Tensão de linha eficaz (V_s)	220 V
Frequência fundamental (f_s)	60 Hz

Tabela 8: Parâmetros do filtro de interface do DSTATCOM de pequena escala.

Grandeza	Valor
Resistência (R_f)	0,33 Ω
Indutância (L_f)	1,25 mH

4.1.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A CAPACIDADE DO BANCO DE CAPACITORES DO DSTATCOM DE PEQUENA ESCALA

Durante o projeto do controlador de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM deve-se levar em consideração a capacidade do banco de capacitores do

Tabela 9: Parâmetros do DSTATCOM de pequena escala.

Grandeza	Valor
Tensão nominal	220 V
Potência nominal	3,8 kVA
Frequência de comutação (f_c)	20 kHz
Capacitância equivalente (C_{eq})	4700 μ F
Resistência de condução dos IGBTs (R_{IGBT})	13 m Ω

Tabela 10: Ganhos dos controladores do DSTATCOM de pequena escala.

Controlador	Ganho	Valor
Corrente	Proporcional	12,5 V/A
	Integral	3430 V/(A.s)
Tensão CC	Proporcional	11,6 mA/V ²
	Integral	3,87 A/(V ² .s)

barramento CC, visando a manutenção da sua vida útil. Para tanto, a informação mais relevante contida na folha de dados é a oscilação de corrente no capacitor, permitida em uma determinada temperatura e frequência. Para o modelo de capacitor CC do conversor utilizado em laboratório neste trabalho, a oscilação de corrente nominal é de 9,8 A em uma temperatura de 85°C e frequência de 120 Hz. Além disso, a oscilação de corrente máxima é de 15,68 A, a 40°C/120 Hz (EPCOS/TDK, 2014). Porém, o banco de capacitores do DSTATCOM utilizado neste trabalho tem quatro capacitores com as características mencionadas, em uma associação série-paralelo mostrada na Figura 48. Consequentemente, as capacidades de corrente do barramento CC são dobradas. Considerando a oscilação de corrente de 9,8 A e a associação dos capacitores do barramento CC do conversor, o valor de pico da corrente de pré-energização e desenergização deve ser menor que 19,6 A.

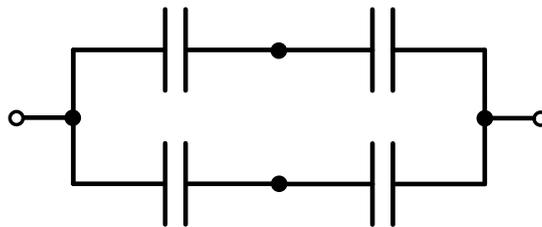


Figura 48: Topologia do banco de capacitores do conversor de 3,8 kVA/220 V.

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO

O circuito e a estratégia de energização/desenergização proposta neste trabalho foram incorporados no modelo digital do DSTATCOM e num protótipo de pequena escala. Na Figura 49 é mostrada a fotografia do protótipo utilizado para obter os resultados experimentais no laboratório. Todos os algoritmos de controle (controladores de corrente, tensão e energização/desenergização) do DSTATCOM foram implementados em um DSP TMS320F28335 da *Texas Instruments*.

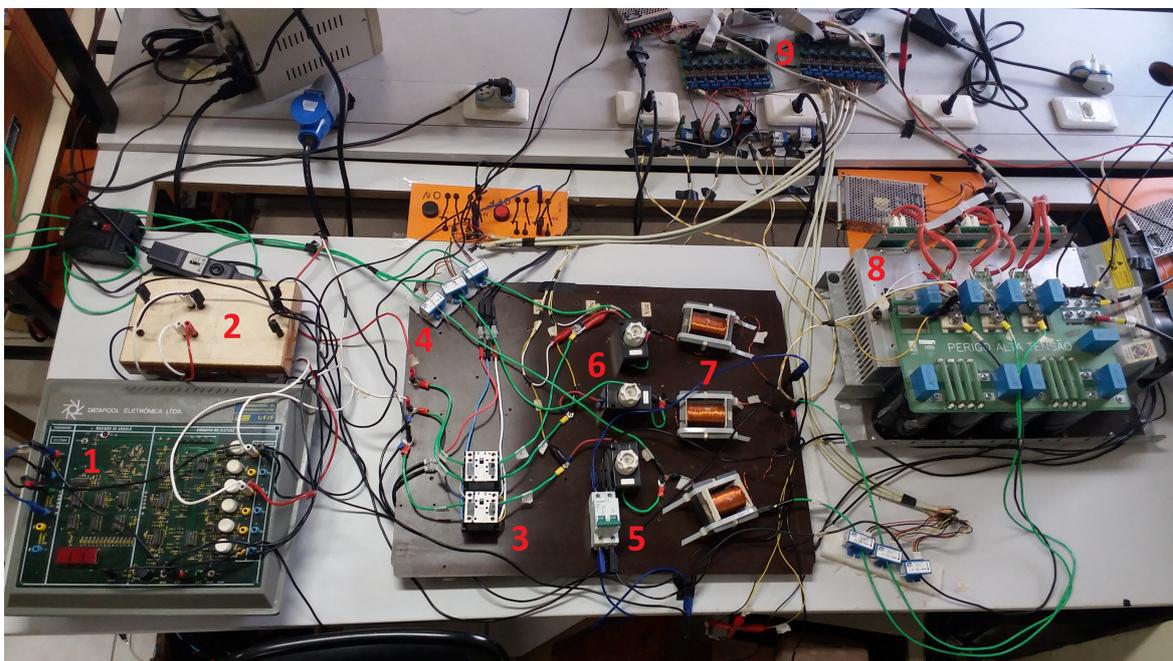


Figura 49: Foto da bancada de trabalho: 1 - Módulo de disparo dos tiristores, 2 - tiristores, 3 - sensores de tensão, 4 - sensores de corrente, 5 - disjuntor, 6 - fusíveis, 7 - filtros passivos, 8 - conversor eletrônico, 9 - placas de condicionamento de sinais.

4.2.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ENERGIZAÇÃO DO DSTATCOM

Na Figura 24 é mostrada a topologia do sistema utilizado para realizar o processo de pré-energização do DSTATCOM. Os valores dos coeficientes e dos pontos de quebra da aproximação PWL para a pré-energização do DSTATCOM, com uma corrente com valor de pico de 5 A, são dados no Apêndice B. Nas Figuras 50 (a) e (b) são mostradas as formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” do DSTATCOM, respectivamente. Inicialmente o DSTATCOM da Figura 24 é conectado à rede CA com os contatos Sw_1 e Sw_3 abertos e o contato Sw_2 fechado.

Em $t = 2,2$ s o bloco controlador de pré-energização da Figura 32 é habilitado. A tensão do barramento CC é usada pelo bloco PWL_e para gerar o ângulo de disparo dos tiristores de maneira que o valor de pico da corrente de pré-energização seja 5 A. Como o valor médio da corrente de carga é mantido praticamente constante, a tensão CC sobre o capacitor cresce linearmente durante esse período. Na Figura 51 é mostrado um detalhe da forma de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a”, durante a pré-energização.

Em $t = 8,6$ s a tensão CC do DSTATCOM atinge o valor de pico da tensão CA da rede. O controlador de pré-energização do compensador bloqueia o disparo dos tiristores T_1 e T_2 e os contatos Sw_1 e Sw_3 são fechados. Neste instante não se observa nenhuma sobrecorrente drenada pelo compensador.

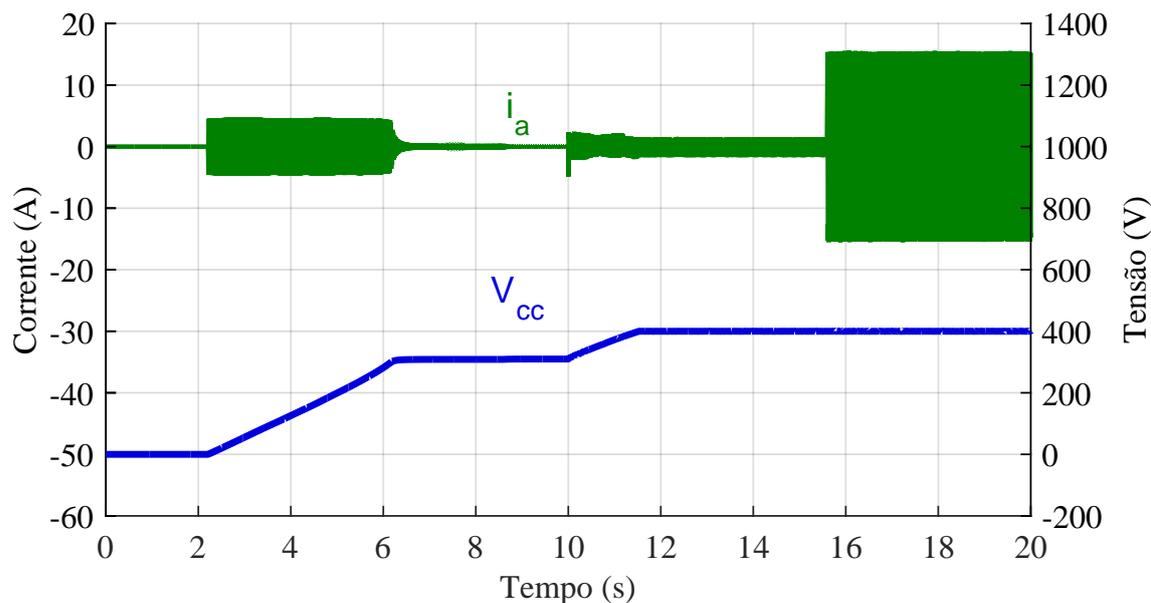
Em $t = 10$ s os controladores de tensão e de corrente do DSTATCOM são habilitados. A corrente de referência I_d^* é usada então para carregar o capacitor até a tensão CC de 400 V. Finalmente, em $t = 15,6$ s a corrente de referência I_q^* é variada em degrau de zero para -14 A. O DSTATCOM então começa a compensar potência reativa em seus terminais (3,8 kvar).

4.2.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS DE ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO DO DSTATCOM

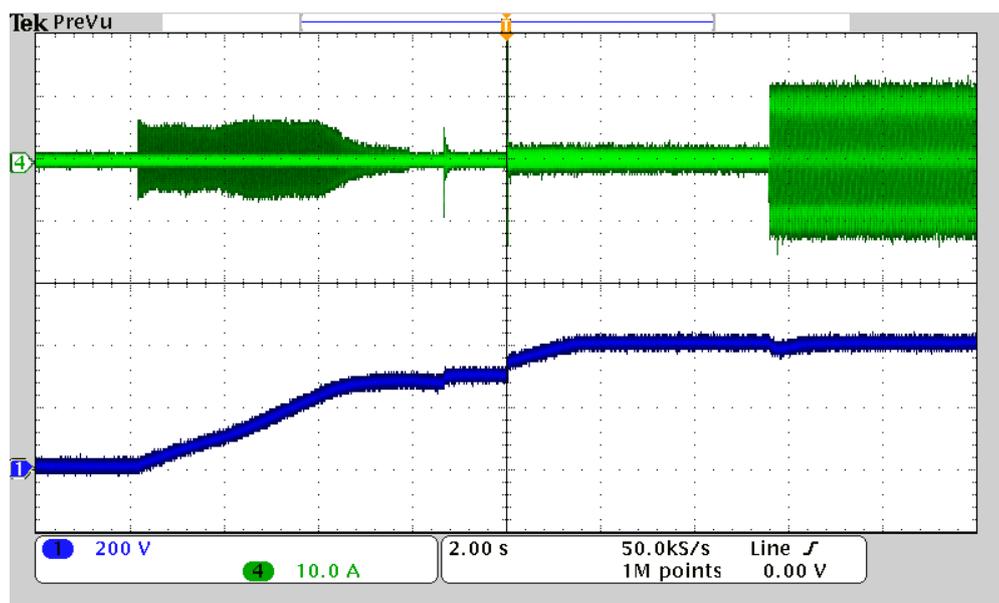
Na Figura 37 é mostrada a topologia do sistema utilizado para realizar os processos síncronos de pré-energização e desenergização do DSTATCOM. Os valores dos coeficientes e dos pontos de quebra das aproximações PWL para a pré-energização e a desenergização do DSTATCOM, com uma corrente com valor de pico de 10 A, são dados no Apêndice B. Nas Figuras 52 (a) e (b) são mostradas as formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” do DSTATCOM, respectivamente. Inicialmente, o DSTATCOM da Figura 37 é conectado à rede CA com os contatos Sw_1 e Sw_3 abertos e o contato Sw_2 fechado.

Em $t = 8,5$ s o bloco controlador de energização/desenergização da Figura 42 é habilitado. A tensão do barramento CC é usada pelo bloco PWL_e para gerar o ângulo de disparo dos tiristores de maneira que o valor de pico da corrente de pré-energização seja 10 A. Na Figura 53 é mostrado um detalhe da forma de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a”, durante a pré-energização.

Em $t = 11$ s a tensão CC do DSTATCOM atinge o valor de pico da tensão CA da rede. O controlador de pré-energização do compensador bloqueia o disparo dos



(a)

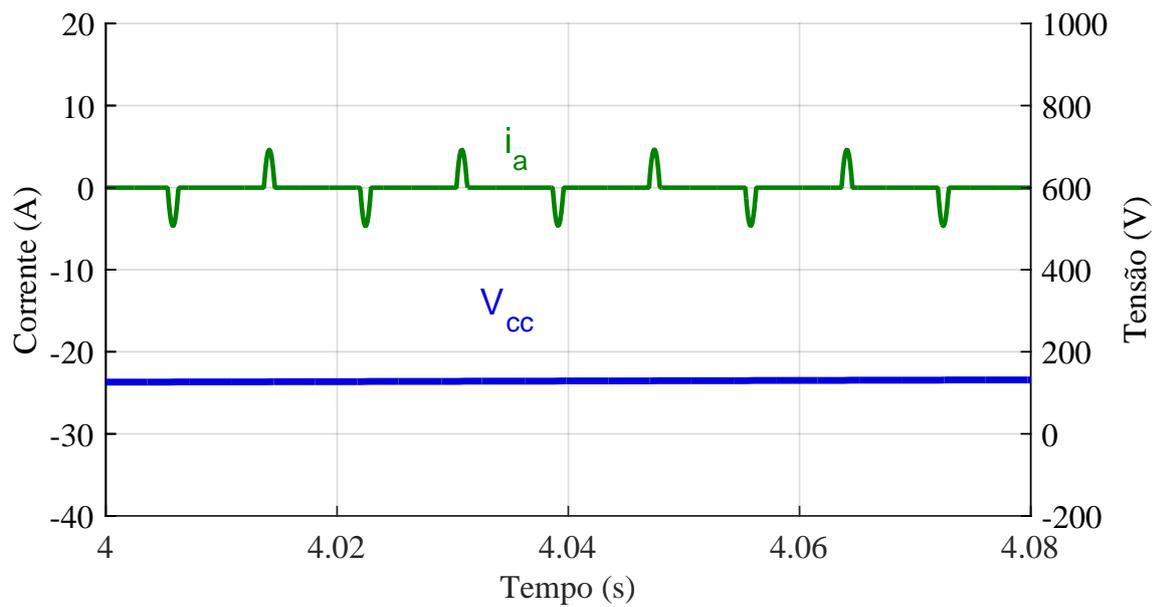


(b)

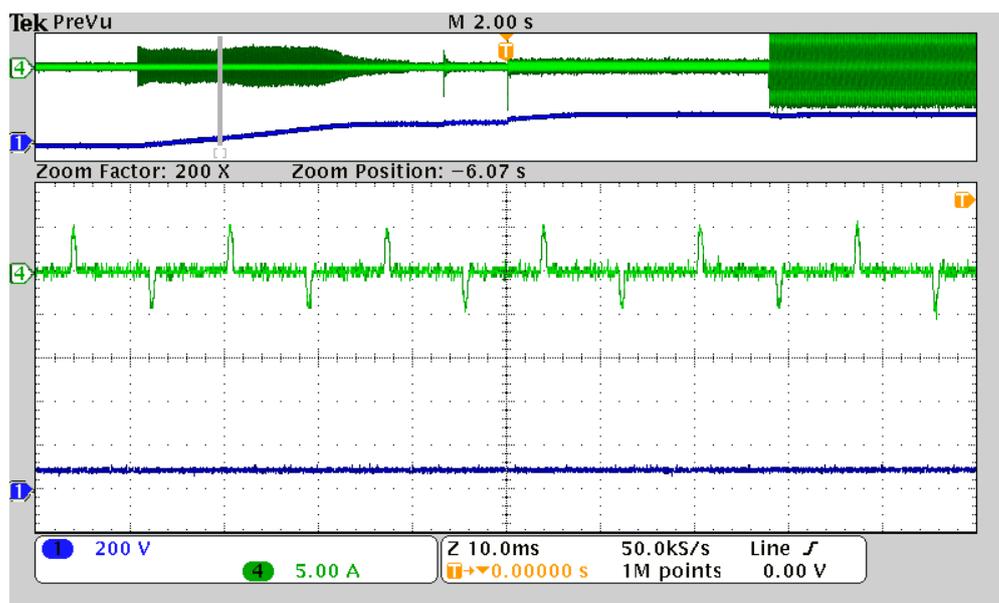
Figura 50: Formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a energização do DSTATCOM e a compensação de potência reativa: (a) Simulação, (b) experimental.

tiristores T_1 e T_2 e os contatos Sw_1 e Sw_3 são fechados. Neste instante não se observa nenhuma sobrecorrente drenada pelo compensador.

Em $t = 12,5$ s os controladores de tensão e de corrente do DSTATCOM são habilitados. A corrente de referência I_d^* é usada então para carregar o capacitor até a tensão CC de 400 V. Em $t = 14,5$ s a corrente de referência I_q^* é variada em degrau de zero para -14 A. O DSTATCOM então começa a compensar potência reativa em



(a)



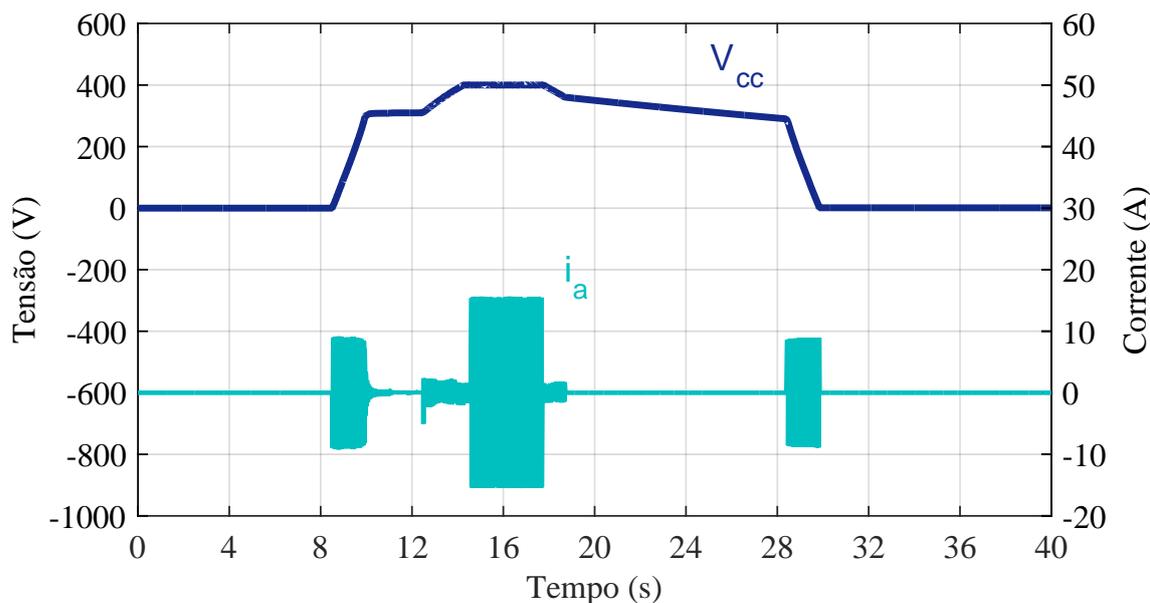
(b)

Figura 51: Detalhes das formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a pré-energização do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.

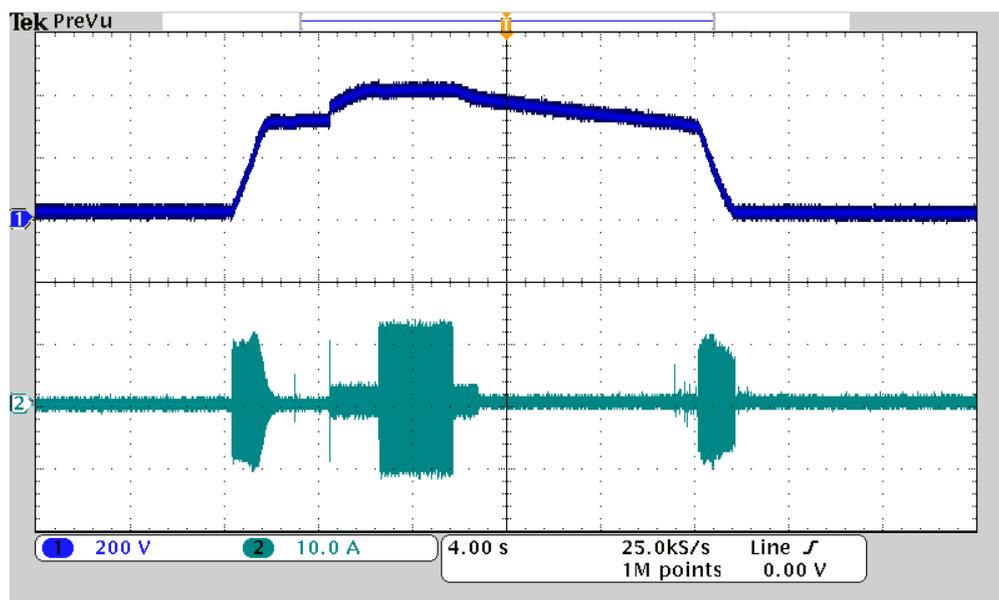
seus terminais (3,8 kvar) até o instante $t = 17,6$ s, quando o sinal de referência I_q^* é novamente variado em degrau para zero.

Em $t = 17,7$ s a corrente I_d do compensador é então controlada de maneira a realizar a redução da tensão do barramento CC. De $t = 18,6$ s a $t = 28,5$ s observa-se uma descarga natural do capacitor do compensador, logo após a abertura dos contatos S_{w1} e S_{w3} .

Finalmente em $t = 28,6$ s o controlador de desenergização síncrona é habilitado. O bloco PWL_d gera o ângulo de disparo dos interruptores de maneira que o valor de pico da corrente de desenergização seja 10 A. A tensão CC sobre o capacitor decresce linearmente até atingir o zero durante esse período. Na Figura 54 é mostrado um detalhe da forma de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a”, durante a desenergização síncrona.

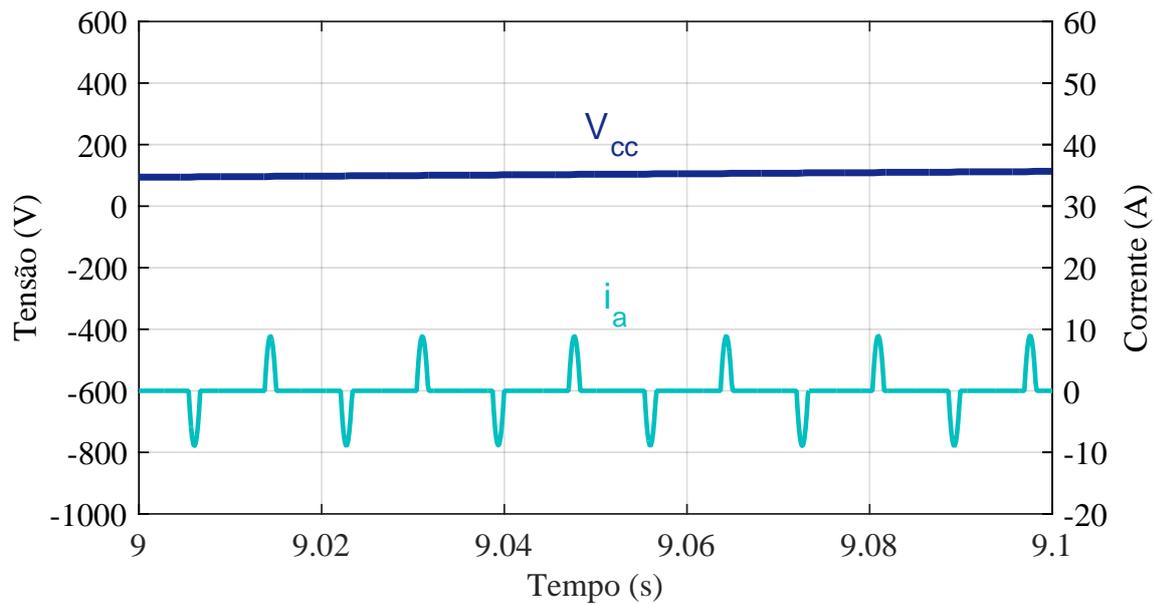


(a)

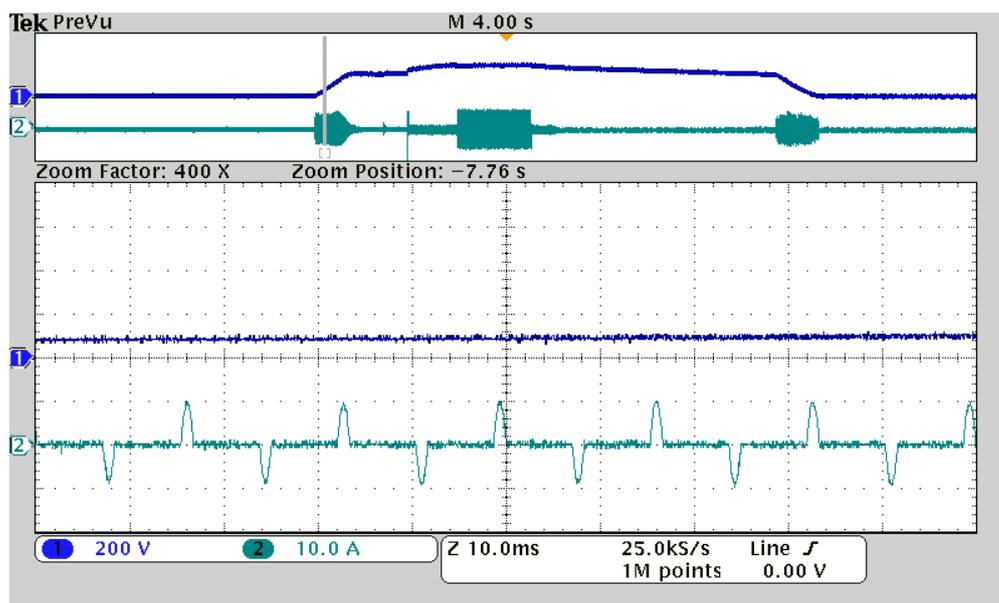


(b)

Figura 52: Formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a energização, a compensação de potência reativa e a desenergização do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.



(a)

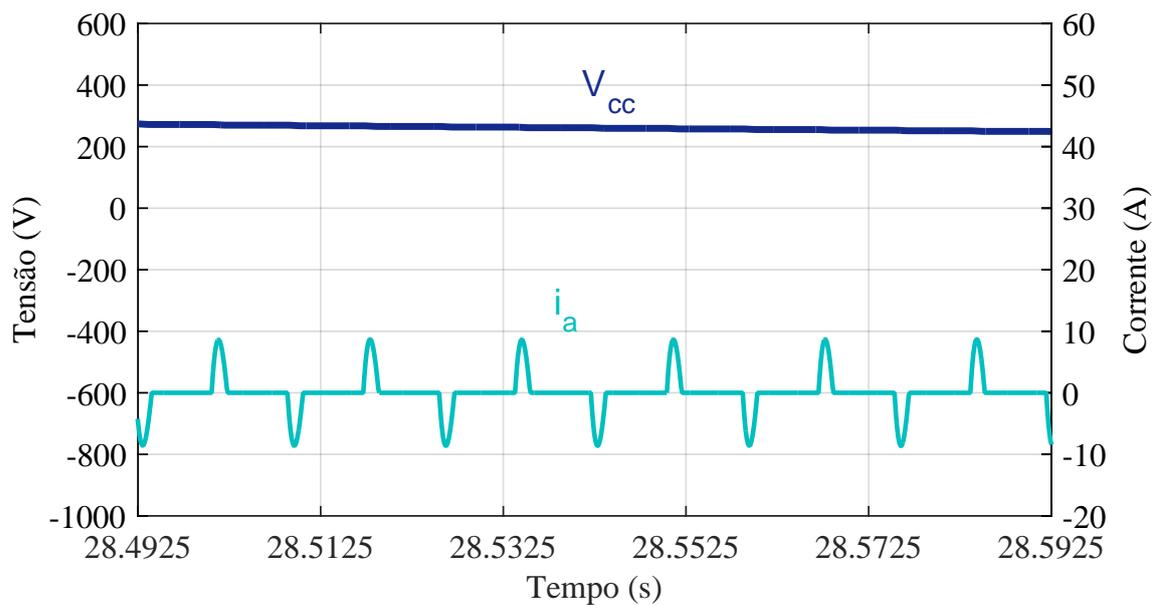


(b)

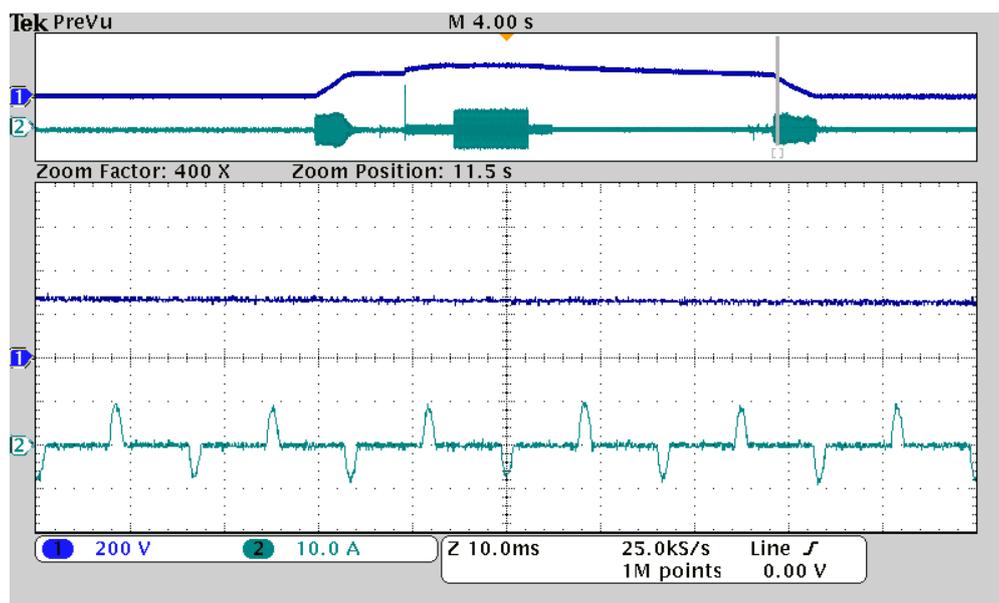
Figura 53: Detalhes das formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a pré-energização do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.

4.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação e experimentais de um DSTATCOM com potência nominal de 3,8 kvar conectado à uma rede elétrica com tensão nominal de 220 V. O controle do DSTATCOM foi realizado de acordo com a modelagem matemática apresentada no Capítulo 2 e os processos síncronos de pré-energização e desenergização foram feitos utilizando os circuitos propostos e as



(a)



(b)

Figura 54: Detalhes das formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” durante a desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) Simulação, (b) experimental.

estratégias apresentadas no Capítulo 3. Os resultados de simulação e experimentais foram comparados para validação da metodologia proposta.

5 CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposta uma estratégia para energizar/desenergizar um compensador estático síncrono para distribuição. Foram investigados dois circuitos distintos, o primeiro baseado em uma topologia de um retificador semi-controlado e o segundo baseado em um gradador. A corrente de energização/desenergização pelo capacitor CC equivalente do compensador foi limitada, em ambos os casos, sem a necessidade de utilizar resistores, indutores ou transformadores adicionais. A modelagem matemática dos circuitos de energização/desenergização propostos permitiu desenvolver uma metodologia para regular a corrente pelo circuito a partir do controle do ângulo de disparo dos tiristores. As estratégias propostas foram validadas através de modelos digitais implementados no programa PSIM. Como a corrente de carga e de descarga foram controladas, a tensão no barramento CC do compensador estático variou linearmente com o tempo. Com objetivo de aumentar a eficiência do procedimento e reduzir o esforço computacional, as relações não lineares entre a tensão CC e o ângulo de disparo dos tiristores foram aproximadas por uma função linear por partes. Os resultados de simulação e experimentais apresentaram comportamento semelhantes, não tendo sido observada nenhuma corrente elevada durante o processo. Como os tiristores são considerados dispositivos semicondutores robustos, esta estratégia é muito interessante em aplicações de alta potência. O método proposto neste trabalho pode ser utilizado para energizar/desenergizar qualquer conversor eletrônico de potência conectado à rede elétrica, inclusive conversores multiníveis. Como os processos de energização e desenergização de conversores fonte de tensão não são muito mencionados na literatura, este trabalho representa uma contribuição ao tema.

5.1 RESULTADOS COMPLEMENTARES DESTE TRABALHO

Como resultados complementares dessa pesquisa foram depositadas duas patentes e submetido um artigo para um periódico na área:

- [1] “Controlador e Método de Energização de Conversor Fonte de Tensão Conectado à Rede Elétrica”, depósito de patente N^o BR 1020170024610. Inventores: Samuel Neves Duarte, Pedro Gomes Barbosa e Gabriel Fogli.
- [2] “Controlador e Método de Desenergização de Conversor Fonte de Tensão Conectado à Rede Elétrica”, depósito de patente N^o BR 1020170044084. Inventores: Samuel Neves Duarte, Pedro Gomes Barbosa e Gabriel Fogli.
- [3] DUARTE, S. N.; FOGLI, G. A.; ALMEIDA, P. M.; BARBOSA, P. G.: “Estratégias de Energização e Desenergização de um Compensador Estático Síncrono para Distribuição”. Artigo submetido a Revista Eletrônica de Potência.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros propõe-se:

- Testar a metodologia proposta em conversores de maior potência e conectados em redes elétricas com níveis de tensão mais elevados;
- Fazer uma análise de sensibilidade com relação ao impacto da variação de parâmetros do sistema na robustez da metodologia de controle das correntes de pré-energização e desenergização síncrona;
- Investigar os processos de energização e desenergização de conversores modulares multiníveis;
- Estudar metodologias para energizar/desenergizar um sistema VSC-HVDC usado para integração de fazendas eólicas *offshore*;
- Analisar a ocorrência de faltas no elo CC de um sistema VSC-HVDC.

REFERÊNCIAS

- AKAGI, H. Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC). *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 26, n. 11, p. 3119–3130, 2011.
- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. : John Wiley & Sons, 2007.
- ALMEIDA, P. M. de. *Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.
- ALMEIDA, P. M. de et al. Projeto dos controladores de um conversor VSC usado para conectar um sistema de geração fotovoltaica à rede elétrica. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*. 2012.
- CAVALIERE, C. et al. Aplicação do STATCOM na distribuição: Regulação de tensão e controle de fator de potência. *V SBQEE (Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica)*, 2003.
- CHAVES, F. S. *Avaliação técnica do desempenho da compensação reativa shunt capacitiva aplicada à expansão de sistemas elétricos*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal De Minas Gerais, 2007.
- CHUA, L. O.; LIN, P. Y. *Computer-aided analysis of electronic circuits: Algorithms and computational techniques*. : Prentice Hall Professional Technical Reference, 1975.
- DUARTE, S. N.; OLIVEIRA, J. G. de; BARBOSA, P. G. Projeto e simulação dos controladores de um sistema de geração eólica conectado à rede de distribuição. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*. 2016.
- EPCOS/TDK. *Aluminum Electrolytic Capacitors Data Sheet B43875*. 2014.
- FERREIRA, E. M. d. S. *Algoritmos para o problema de equilíbrio aplicados ao problema de equilíbrio de NASH*. Tese (Tese de Doutorado), 2013.
- HAN, C. *Power system dynamic voltage management with advanced STATCOM and energy storage system*. Tese (Ph.D. Thesis) — North Carolina State University, 2006.
- HAN, C. et al. An ETO thyristor and modular H-bridge PWM converter-based 4.5 MVA STATCOM: 480 V/500 A transformerless grid-connected experimentation. In: IEEE. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*. 2006. v. 2, p. 1039–1044.

- HAN, C. et al. System integration and demonstration of a 4.5 MVA STATCOM based on emitter turn-off (ETO) thyristor and cascade multilevel converter. In: IEEE. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005*. 2005. p. 6–pp.
- HART, D. W. *Power electronics*. : Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- HASLER, J. P. *Methods for de-energizing a chain-link converter, controller, computer programs and computer program products*. : Google Patents, jun. 24 2014. US Patent 8,760,120.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. : Wiley-IEEE Press, 2000.
- LARSSON, T.; THORVALDSSON, B.; AKESSON, B. *Device for energizing a voltage-source converter*. : Google Patents, jan. 8 2002. US Patent 6,337,802.
- MALINOWSKI, M. et al. A survey on cascaded multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 57, n. 7, p. 2197–2206, 2010.
- MANOLAROU, M.; KOSTAKIS, G.; MANIAS, S. Inrush current limiting technique for low-voltage synchronous DC/DC converters. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, IET, v. 152, n. 5, p. 1179–1183, 2005.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M. *Power electronics: Converters, applications, and design*. : John Wiley & Sons, 2007.
- PETRY, C. A. Metodologia de projeto de retificadores com filtro capacitivo. *Revista Ilha Digital*, v. 3, p. 77–85, 2012.
- PINTO, R. L. *Aplicação de um sistema especialista fuzzy para redução de manobras de dispositivos shunts chaveados automaticamente por um compensador estático*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- RASHID, M. H. *Power electronics handbook: devices, circuits and applications*. : Academic press, 2010.
- RAUPP, F. M. P. *Um algoritmo de minimização usando um método de região de confiança com formato elipsoidal para problemas de programação não linear com variáveis canalizadas*. Tese (Tese de Doutorado), 1991.
- RIBEIRO, R. L. et al. Enhanced power quality compensation of shunt active power filters without harmonic detection schemes. *Revista Eletrônica de Potência*, Eletrônica de Potência, v. 19, n. 4, p. 332–342, 2014.
- ROCHA, A. C.; ARAÚJO, A. E. A. de; NOVAIS, M. dos S. Manobra de bancos de capacitores – resultados práticos da aplicação de técnicas de mitigação de transitórios. In: *V SBQEE (Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica)*. 2003.
- RODRIGUEZ, J.; LAI, J.-S.; PENG, F. Z. Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 49, n. 4, p. 724–738, 2002.

SCHAUDER, C. et al. AEP UPFC project: Installation, commissioning and operation of the ± 160 MVA STATCOM (phase i). *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 1530–1535, 1998.

SHARKH, S. M. et al. *Power electronic converters for microgrids*. : John Wiley & Sons, 2014.

SINGH, B.; JAYAPRAKASH, P.; KOTHARI, D. A T-connected transformer and three-leg VSC based DSTATCOM for power quality improvement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 23, n. 6, p. 2710–2718, 2008.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. : John Wiley & Sons, 2011.

WATANABE, E. H. et al. Tecnologia FACTS-tutorial. *SBA Controle & Automação*, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. *Voltage-sourced converters in power systems: Modeling, control, and applications*. : John Wiley & Sons, 2010.

APÊNDICE A – TRANSFORMADA DE PARK

Considerando o conjunto de tensões trifásicas, equilibradas e simétricas do PAC, tem-se:

$$\begin{cases} v_{pac,a} = \hat{V}_{pac} \cos(\omega_0 t + \theta_0) \\ v_{pac,b} = \hat{V}_{pac} \cos\left(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{pac,c} = \hat{V}_{pac} \cos\left(\omega_0 t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Utilizando a transformada de Park com invariância em amplitude, as tensões de eixo direto e quadratura são calculadas por (AKAGI; WATANABE & AREDES, 2007; AKAGI, 2011):

$$\begin{bmatrix} v_{pac,d} \\ v_{pac,q} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\rho) & \cos\left(\rho - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\rho + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\rho) & -\sin\left(\rho - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\rho + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pac,a} \\ v_{pac,b} \\ v_{pac,c} \end{bmatrix}, \quad (\text{A.2})$$

onde ρ é o ângulo do sistema de coordenadas síncrono dq .

Substituindo (A.1) em (A.2), as tensões de eixo direto e quadratura podem ser reescritas por:

$$\begin{cases} v_{pac,d} = \hat{V}_{pac} \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \\ v_{pac,q} = \hat{V}_{pac} \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Na Figura (55) são ilustrados os sistemas de coordenadas abc e dq , onde ω_0 e ω são as frequências angulares dos sistemas de coordenadas abc e dq , respectivamente.

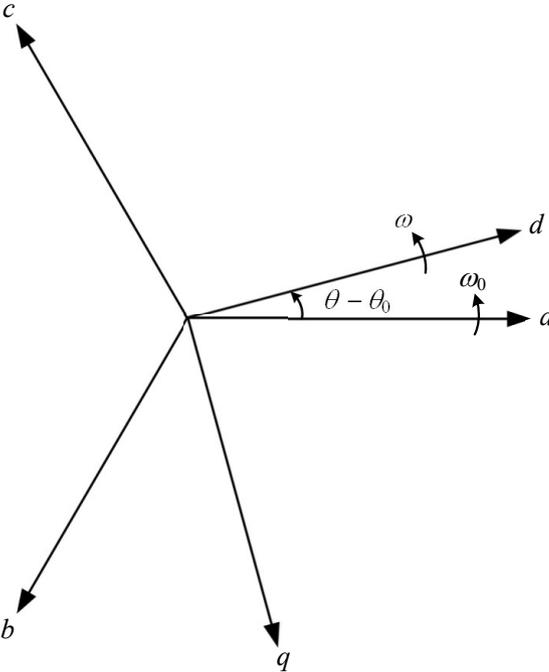


Figura 55: Sistemas de coordenadas abc e dq .

APÊNDICE B – APROXIMAÇÃO PWL

B.1 CARACTERÍSTICAS DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA DO DSTATCOM DE 10 MVA/23,1 KV

Na Tabela 11 são dados os valores dos coeficientes da aproximação PWL, com dois pontos de quebra, da característica de pré-energização do DSTATCOM. Já nas Tabelas 12 e 13 são dados os valores dos coeficientes das aproximações PWL, com onze e seis pontos de quebra, das características de pré-energização e desenergização do DSTATCOM, respectivamente. Estas aproximações PWL foram obtidas para características V_{cc} x α que garantem uma corrente com valor de pico de 45 A.

Tabela 11: Coeficientes da aproximação PWL, com dois pontos de quebra, para a pré-energização do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV.

Coeficiente	Valor
a	317,7367721418844 °
b	-0,007766517109003 °/V
C_1	-0,001011298887810 °/V
C_2	-0,004648290052194 °/V

B.2 CARACTERÍSTICAS DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA DO DSTATCOM DE 3,8 KVA/220 V

B.2.1 PRÉ-ENERGIZAÇÃO COM $I_{MÁX} = 5$ A

Na Tabela 14 são dados os valores dos pontos de quebra e dos coeficientes da aproximação PWL da característica de pré-energização do DSTATCOM. Na Figura 56 são mostradas as curvas real e aproximada referentes ao processo de pré-energização do conversor estático. Estas aproximações PWL foram obtidas para características V_{cc} x α que garantem uma corrente com valor de pico de 5 A.

Tabela 12: Coeficientes da aproximação PWL para a pré-energização do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV.

Coeficiente	Valor
a	590,0585204766579 °
b	-0,016694577438612 °/V
C_1	-0,000046784149988 °/V
C_2	-0,000085004455615 °/V
C_3	-0,000133088138892 °/V
C_4	-0,000179429068304 °/V
C_5	-0,000282760062646 °/V
C_6	-0,000470405550530 °/V
C_7	-0,000592829645089 °/V
C_8	-0,000896220549452 °/V
C_9	-0,001409174911608 °/V
C_{10}	-0,002376734177144 °/V
C_{11}	-0,008413881123391 °/V

Tabela 13: Coeficientes da aproximação PWL para a desenergização síncrona do DSTATCOM de 10 MVA/23,1 kV.

Coeficiente	Valor
a	-29,505086580640043 °
b	0,002302353230730 °/V
C_1	0,000024085225742212 °/V
C_2	0,000053857642847487 °/V
C_3	0,000076006700815719 °/V
C_4	0,000094733077059090 °/V
C_5	0,000123250485930555 °/V
C_6	0,000163028220501118 °/V

B.2.2 PRÉ-ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA COM $I_{MÁX} = 10 \text{ A}$

Nas Tabelas 15 e 16 são dados os valores dos pontos de quebra e dos coeficientes das aproximações PWL das características de pré-energização e desenergização do DSTATCOM, respectivamente. Nas Figuras 57 (a) e (b) são mostradas as curvas reais e aproximadas referentes aos processos síncronos de pré-energização e desenergização do conversor estático, respectivamente. Estas aproximações PWL foram obtidas para características V_{cc} x α que garantem uma corrente com valor de pico de 10 A.

Tabela 14: Coeficientes da aproximação PWL para a pré-energização do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V ($I_{máx} = 5$ A).

Pontos de quebra			Coeficientes	
k	$V_{cc,k}$ (V)	α_k (°)	Grandeza	Valor
Inicial	0	169,99	b	-1,4946891985 °/V
1	100	150,86	C_1	-0,0100407682 °/V
2	150	140,28	C_2	-0,0151181372 °/V
3	200	128,20	C_3	-0,0206909570 °/V
4	225	121,12	C_4	-0,0259597384 °/V
5	250	112,75	C_5	-0,0373086165 °/V
6	265	106,61	C_6	-0,0579758923 °/V
7	280	98,72	C_7	-0,0768430369 °/V
8	285	95,33	C_8	-0,0803506538 °/V
9	290	91,13	C_9	-0,1479571448 °/V
10	294	86,58	C_{10}	-0,2357138590 °/V
11	296	83,37	C_{11}	-0,5953798789 °/V
Final	298	77,77	a	540,78988438 °

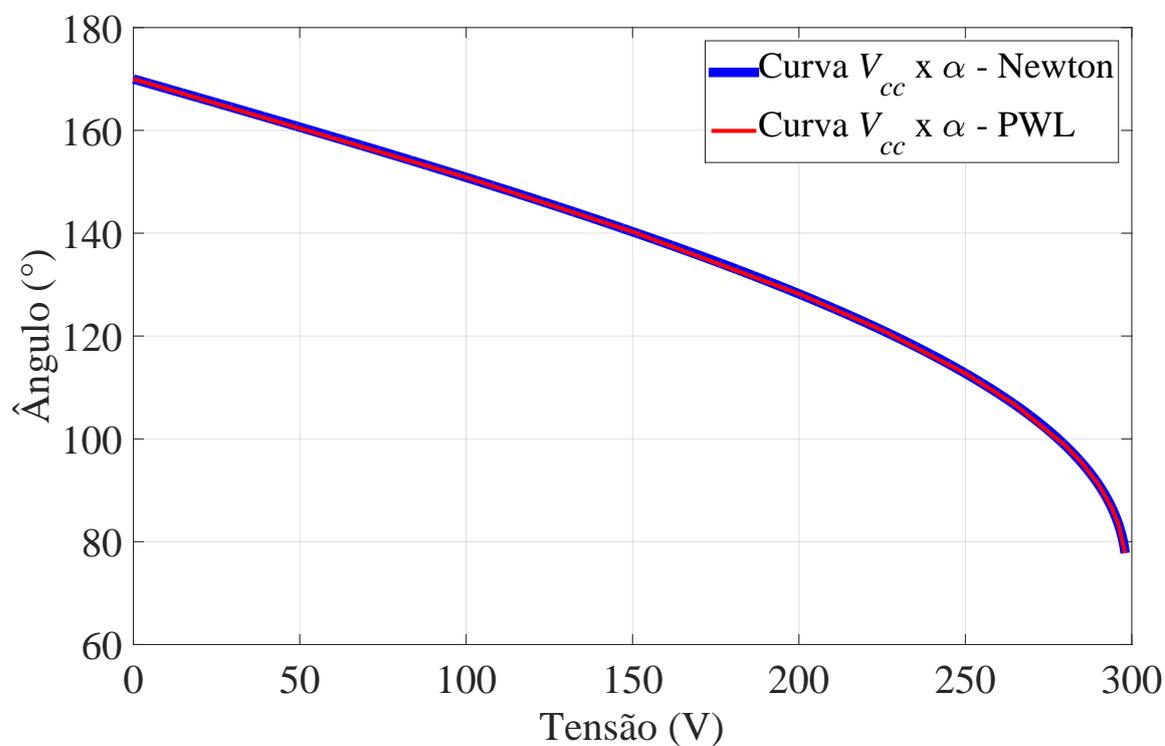


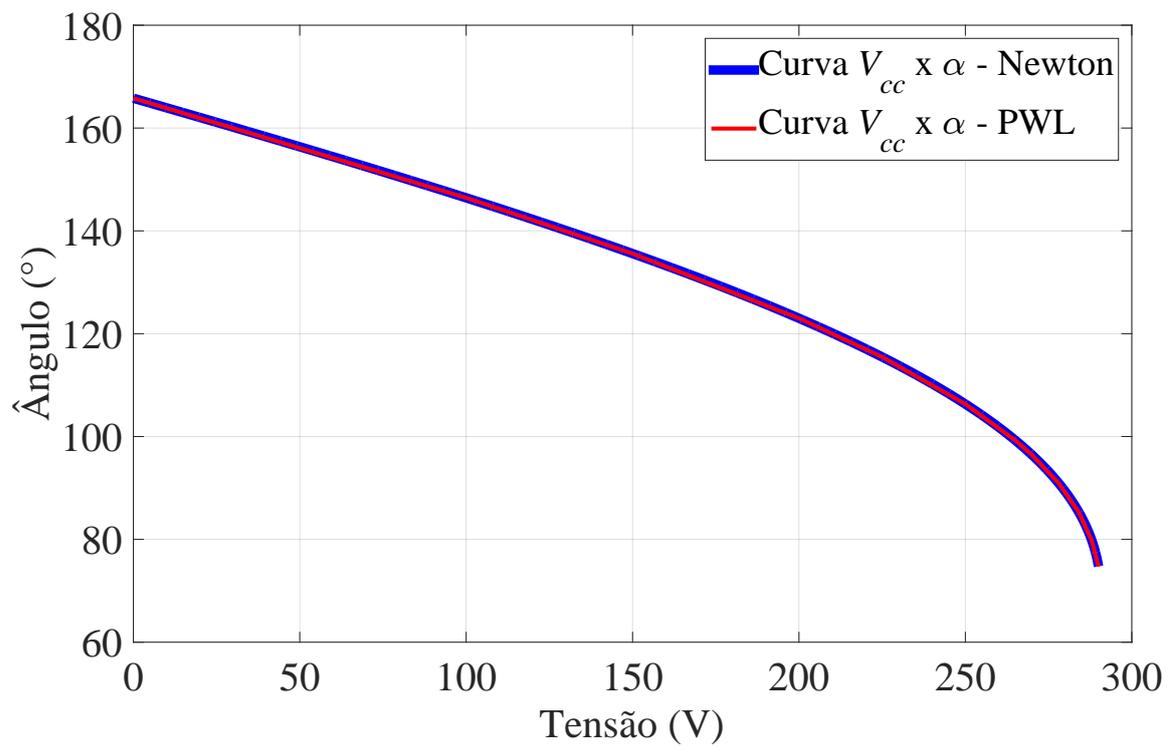
Figura 56: Aproximação PWL sobreposta na característica $V_{cc} \times \alpha_e$ ($I_{máx} = 5$ A).

Tabela 15: Coeficientes da aproximação PWL para a pré-energização do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V ($I_{máx} = 10$ A).

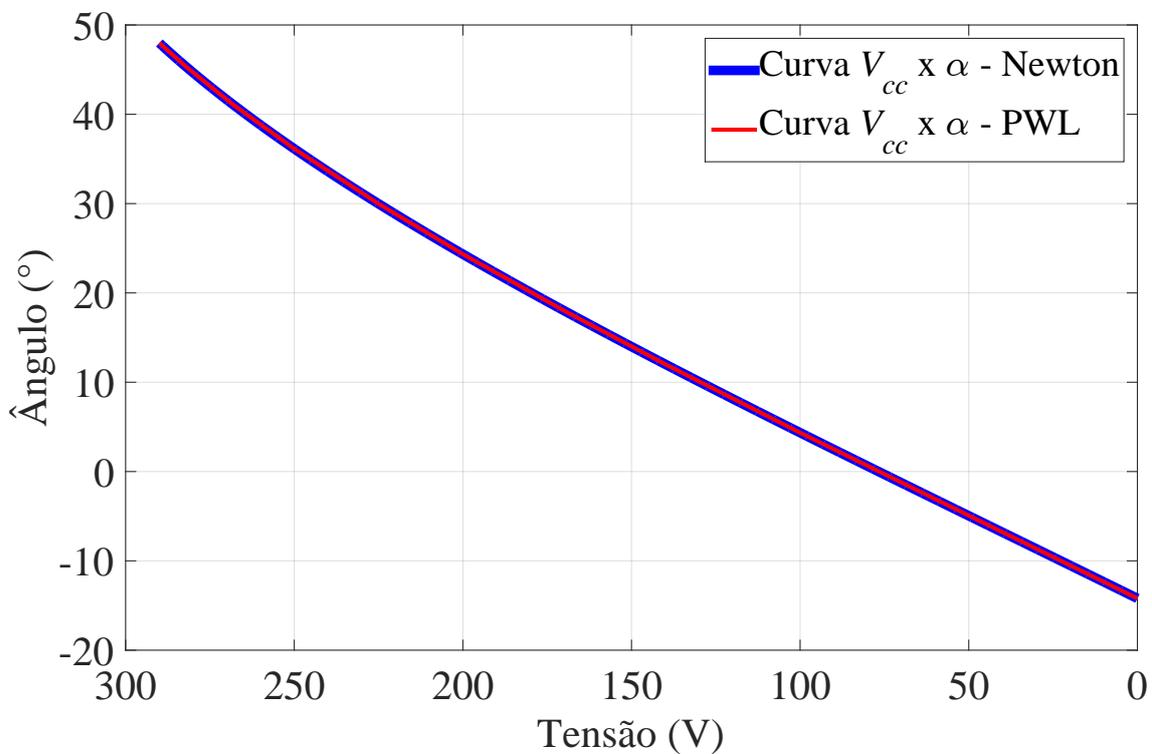
Pontos de quebra			Coeficientes	
k	$V_{cc,k}$ (V)	α_k (°)	Grandeza	Valor
Inicial	0	165,79	b	-1,3515975093 °/V
1	100	146,43	C_1	-0,0115820331 °/V
2	150	135,58	C_2	-0,0174506237 °/V
3	200	123,00	C_3	-0,0246203517 °/V
4	225	115,47	C_4	-0,0327530364 °/V
5	250	106,31	C_5	-0,0514447356 °/V
6	265	99,27	C_6	-0,0486501542 °/V
7	270	96,43	C_7	-0,0584521548 °/V
8	278	90,97	C_8	-0,1228378067 °/V
9	284	85,39	C_9	-0,2385467176 °/V
10	288	79,76	C_{10}	-0,5515709826 °/V
Final	290	74,74	a	484,14928072 °

Tabela 16: Coeficientes da aproximação PWL para a desenergização síncrona do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V ($I_{máx} = 10$ A).

Pontos de quebra			Coeficientes	
k	$V_{cc,k}$ (V)	α_k (°)	Grandeza	Valor
Inicial	290	47,98	b	0,2603519202 °/V
1	282	45,30	C_1	0,0030424563 °/V
2	268	41,05	C_2	0,0040801834 °/V
3	250	36,13	C_3	0,0055028908 °/V
4	225	29,98	C_4	0,0074642444 °/V
5	200	24,34	C_5	0,0102453137 °/V
6	170	18,01	C_6	0,0133755719 °/V
7	140	12,02	C_7	0,0153956608 °/V
8	100	4,35	C_8	0,0156836159 °/V
Final	0	-14,20	a	-31,70592591 °



(a)



(b)

Figura 57: Aproximações PWL sobrepostas nas características $V_{cc} \times \alpha$ ($I_{máx} = 10$ A): (a) Pré-energização síncrona e (b) desenergização síncrona.