

MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM STATCOM PARA OS REGIMES
PERMANENTE E DINÂMICO

Daniel Galiano de Menezes Pimentel

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

Aprovada por:

Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D.Eng.

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

Prof. Sergio Gomes Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2006

PIMENTEL, DANIEL GALIANO DE MENEZES

Modelagem Matemática de Um STATCOM para
os Regimes Permanente e Dinâmico [Rio de
Janeiro] 2006

IX, 79 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2006)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. STATCOM

2. Modelagem Matemática

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Agradecimentos

Sempre a Deus por todas as bênçãos que recebi na vida.

A minha esposa e meus pais, por terem me dado amor, apoio constante, carinho, e sempre fizeram de tudo para que eu não me desviasse dos estudos.

Ao Professor Watanabe pela paciência, pelas ótimas conversas, pela motivação, pela constante alegria e pelo admirável gosto pela engenharia, com certeza todas essas características o fazem o melhor orientador que um aluno pode ter.

Ao pessoal do Laboratório de Eletrônica de Potência, pelo convívio excelente e pela força.

Aos amigos da Petrobras Rodrigo, Gilber e Jaime, pelo apoio imprescindível na fase final na minha dissertação.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida, permitindo que eu me dedicasse somente aos estudos na fase inicial da minha pesquisa.

Daniel Galiano de M. Pimentel

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

MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM STATCOM PARA OS REGIMES
PERMANENTE E DINÂMICO

Daniel Galiano de Menezes Pimentel

Junho/2006

Orientador: Edson Hirokazu Watanabe

Programa: Engenharia Elétrica

Este Trabalho apresenta uma modelagem matemática de um STATCOM multipulso para estudos em regime permanente e dinâmico.

A modelagem matemática para o regime permanente permite o dimensionamento de um STATCOM para uma dada aplicação. Foi apresentado como a tensão no ponto de conexão comum varia, conforme há variação de potência ativa e reativa da carga conectada no ponto de conexão comum, bem como a sensibilidade desta tensão em relação a alguns parâmetros. Foi mostrada também a atuação do STATCOM para controle de tensão no ponto de conexão comum em regime permanente.

A modelagem matemática para o regime dinâmico permite, através dos parâmetros básicos da rede estudada (reatâncias série no lado CA, capacitor do lado CC do conversor, resistência série do lado CA), calcular a frequência de ressonância do sistema com um STATCOM conectado. Esse modelo foi validado através de simulações no domínio do tempo em comparação com simulações no domínio da frequência.

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

MATHEMATICAL MODEL OF A STATCOM FOR STEADY AND DYNAMIC STATES

Daniel Galiano de Menezes Pimentel

June/2006

Advisor: Edson Hirokazu Watanabe

Department: Electrical Engineering

This work presents a mathematical model of a multi-pulse STATCOM for studies in steady and dynamic states.

The mathematical model in steady state allows the specification of the STATCOM for a given application. It was shown how the voltage at the point of common coupling varies according to the variation of the active and reactive power of the load connected at this point, as well as the sensibility of the voltage in the point of common coupling related to some parameters. The performance of the STATCOM for voltage control was shown for steady state.

The mathematical model for dynamic state allows to, though the basic parameters of the studied system (series inductance and resistance of the AC side, capacitor of the DC side of the converter), calculate the resonant frequency of the system with the STATCOM connected. This model was validated through simulations in time domain in comparison with simulations in frequency domain.

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	5
1.3. OBJETIVOS	6
1.4. LINHAS GERAIS DA DISSERTAÇÃO	6
CAPÍTULO 2 - STATCOM QUASI 24-PULSOS	8
2.1 TIPOS DE CONVERSORES	8
2.1.1 CONVERSOR MULTI-PULSO	8
2.1.2 CONVERSOR MULTI-NÍVEL	9
2.1.3 CONVERSOR PWM	11
2.2 STATCOM QUASI 24-PULSOS	12
2.3 CONCLUSÕES PARCIAIS	18
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE	19
3.1 VARIAÇÃO DE TENSÃO NO PCC (PONTO DE CONEXÃO COMUM)	19
3.1.1 PERFIL DE TENSÃO NO PCC EM REGIME PERMANENTE	19
3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE V_{PCC}	27
3.3 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL EM REGIME PERMANENTE DO ESTUDO	29
3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS	31
CAPÍTULO 4 - MODELO EM REGIME DINÂMICO	32
4.1 TRANSFORMADA DE PARK	32
4.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DO STATCOM E SUAS EQUAÇÕES	36
4.3 MODELO DO STATCOM EM ESPAÇO DE ESTADOS	42
4.3.1 ANÁLISE PARAMÉTRICA	45
4.4 VALIDAÇÃO: SIMULAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA VERSUS DOMÍNIO DO TEMPO	47
4.4.1 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DO STATCOM	48
4.4.2 OBTENÇÃO DOS DIAGRAMAS DE BODE	49
4.4.2.1 OBTENÇÃO DOS DIAGRAMAS DE BODE COM VARIAÇÃO PARAMÉTRICA	50
4.4.3 CONFRONTO DAS SIMULAÇÕES	54
4.5 CONCLUSÕES PARCIAIS	58
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES FINAIS	60
5.1 CONCLUSÕES	60
5.2 TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS:	63
APÊNDICE A	67
APÊNDICE B	70
APÊNDICE C	75

APÉNDICE D.....	78
APÉNDICE E.....	79

Índice de Figuras

Figura 1 – Diagrama unifilar do STATCOM	3
Figura 2 - Diagrama simplificado do STATCOM (V_S) e da rede CA (V_R)	3
Figura 3 – Diagramas fasoriais de tensões e correntes.....	4
Figura 4 – Conversor do tipo ponte trifásicas de 6 pulsos	9
Figura 5 – Exemplo de forma de onda de 12 pulsos ou 6 níveis.	9
Figura 6 – Conversor de 5 níveis	10
Figura 7 – Conversor alternativo de três níveis.....	11
Figura 8 – (a) STATCOM 12 pulsos; (b) STATCOM quasi-24 pulsos	13
Figura 9 – (a) Tensão de saída no STATCOM quasi-24 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo.....	14
Figura 10 - Esquema do STATCOM quasi-24 pulsos	15
Figura 11 – Tensões fase-neutro de saída do STATCOM quasi 24 pulsos.....	16
Figura 12 – Diagrama unifilar do esquema montado em laboratório.	16
Figura 13 – Formas de onda das tensões na fonte e no PCC e corrente na fonte sem a conexão do STATCOM	17
Figura 14 – Formas de onda das tensões na fonte e no PCC e corrente na fonte com a conexão do STATCOM	18
Figura 15 – Sistema elétrico simples.....	20
Figura 16 - Sistema elétrico simples com a carga representada pelas suas partes ativa e reativa.....	20
Figura 17 – diagrama fasorial do sistema apresentado na Figura 16.	21
Figura 18 – Conexão do STATCOM ao sistema.....	22
Figura 19 – Diagrama fasorial das tensões e correntes do sistema elétrico com o STATCOM.....	22
Figura 20 – Tensão no PCC em função das correntes ativa I_{at} e reativa I_{rl}	23
Figura 21 – Valores de correntes ativa e reativa para cada curva V_{PCC} constante.	24
Figura 22 – Valores de corrente ativa e V_{PCC} para cada curva I_{rl} constante.	25
Figura 23 – Valores de corrente reativa e V_{PCC} para cada reta I_{at} constante.	25
Figura 24 – Tensão na fonte em função da corrente reativa para diferentes valores de V_{PCC}	26
Figura 25 – Valores de corrente reativa e tensão no PCC para cada reta V_f constante	27
Figura 26 – Conexão do STATCOM no PCC sem as cargas.	29
Figura 27 – Confronto do resultado analítico com o experimental para regulação em regime permanente.	31
Figura 28 – Eixo de coordenadas d-q em relação às coordenadas abc.....	33
Figura 29 – Representação do vetor v_R no eixo d-q.....	34
Figura 30 – Decomposição da corrente i_R nas coordenadas d-q.	35
Figura 31 – Circuito equivalente do STATCOM.....	36
Figura 32 – Variação da frequência em função da variação da indutância CA do STATCOM	45
Figura 33 – Variação da frequência em função da variação da constante de tempo do capacitor CC do STATCOM.	47
Figura 34 – Diagrama de Bode da função de transferência $\Delta I_q(s)/ \Delta \delta(s)$	49
Figura 35 – Diagrama de Bode da função de transferência $\Delta V_{CC}(s)/ \Delta \delta(s)$	50
Figura 36 – Diagrama de Bode para variação de R_p	51

Figura 37 - Diagrama de Bode para variação de R_{ST}	52
Figura 38 – Lugar das raízes da função de transferência $\Delta I_q(s)/ \Delta \delta(s)$ para variação de R_{ST}	53
Figura 39 - Diagrama de Bode para variação de L_{ST}	53
Figura 40 – Diagrama de Bode para variação de C.....	54
Figura 41 – Corrente i_q simulada no PSCAD (cinza) e através da função de transferência (preto) para $f_\delta = 5$ Hz e $R_{ST} = 0$	55
Figura 42 – Corrente i_q simulada no domínio do tempo (cinza) e através da função de transferência (preto) para $f_\delta = 5$ Hz e $R_{ST} = 30$ m Ω	56
Figura 43 – Corrente i_q simulada no domínio do tempo (cinza) e através da função de transferência (preto) para $f_\delta = 5$ Hz e $R_{ST} = 30$ m Ω	56
Figura 44 – Tensão v_{CC} simulada no domínio do tempo (preto) e através da função de transferência (cinza) para $f_\delta = 5$ Hz e $R_{ST} = 30$ m Ω	57
Figura 45 – Corrente i_q simulada no domínio do tempo para $f_\delta = 63,9$ Hz.....	58
Figura 46 – TCR e TSC compondo o SVC.....	68
Figura 47 – (a) TSSC; (b) TCSC.....	68
Figura 48 – STATCOM.....	68
Figura 49 – SSSC.....	69
Figura 50 – UPFC.....	69
Figura 51 – IPFC.....	69
Figura 52 – Forma de onda de tensão nas chaves do conversor.....	70
Figura 53 – (a) Tensão de saída no STATCOM 6 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo.....	71
Figura 54 – (a) Tensão de saída no STATCOM 12 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo.....	72
Figura 55 – STATCOM 24 pulsos.....	73
Figura 56 – (a) Tensão de saída no STATCOM 24 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo.....	74
Figura 57 - Diagrama de blocos do controle baseado na tensão CC.....	79

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, controle e estabilidade de tensão vem se tornando cada vez mais um fator limitante no planejamento e operação de sistemas de potência. Juntamente com este fator, uma variedade de considerações, sendo as principais os custos e os impactos ambientais ou os custos devido aos impactos ambientais, tem restringido a construção de novas linhas de transmissão. Isto tem refletido na necessidade de maximizar o uso de sistemas de transmissão existentes. Em regime permanente, tensões nos barramentos devem ser controladas dentro de limites pré-estabelecidos. Um controle satisfatório de potência reativa e, conseqüentemente de tensão, permite a obtenção de importantes benefícios na operação de sistemas de potência como a redução de sobre-tensões e sub-tensões, utilização eficiente da capacidade de transmissão da linha e o aumento das margens de estabilidade. O controle de tensão pode ser realizado por diferentes tipos de controle e técnicas de operação. Algumas soluções tecnológicas podem envolver uma compensação série ou paralela de potência reativa em pontos estratégicos dos sistemas de potência. Quando ocorre uma perturbação, variações na tensão do sistema são sentidas pelos equipamentos e a restauração para os valores nominais ou anteriores à perturbação depende da resposta dinâmica dos sistemas de excitação e dos dispositivos de controle empregados.

Nas últimas duas décadas, a disponibilidade comercial de chaves autocomutadas, como por exemplo, os IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), os GTOs (*Gate Turn-Off Thyristor*) [1,2] e os IGCTs (*Integrated Gate Commutated Thyristor*) permitiram o desenvolvimento de fontes de potência reativa controláveis [3]. Estas fontes oferecem vantagens adicionais consideráveis sobre as tecnologias anteriores em termos de redução de espaço físico e desempenho. Estas chaves autocomutadas permitiram o desenvolvimento de equipamentos para compensação paralela reativa baseado em conversores fonte de tensão - VSC (*Voltage Source Converter*). Este conversor foi usado para criar um equipamento de compensação flexível paralela reativa batizado de *STATic Synchronous COMPensator*

(STATCOM), devido à sua similaridade operacional com o Compensador Síncrono Rotativo, mas totalmente estático e sem partes mecânicas rotativas.

Com o advento dos conceitos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), equipamentos baseados em eletrônica de potência, como o STATCOM, SSSC, UPFC, etc, estão se tornando cada vez mais importantes para controlar e otimizar o desempenho dos sistemas de potência. Maiores detalhes sobre esses equipamentos podem ser obtidos no Apêndice A e nas referências [4-8, 24]. O uso de conversores fonte de tensão tem sido amplamente aceito e utilizado como a nova geração de controladores de potência reativa em substituição aos compensadores convencionais de potência reativa, como o Capacitor Chaveado a Tiristor – TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*) e o Reator Controlado a Tiristor – TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) ou a combinação deles, o SVC (*Static Var Compensator*).

A característica ideal de operação do STATCOM em regime permanente é similar ao Compensador Síncrono Rotativo, entretanto ele emprega dispositivos de potência em estado sólido. O controle destes dispositivos de estado sólido permite uma rápida controlabilidade da tensão do sistema, tanto em magnitude quanto em ângulo de fase e, conseqüentemente, controla a potência reativa.

O STATCOM (Figura 1) consiste basicamente em:

- Um transformador, representado pela sua indutância de dispersão, para compatibilizar a tensão de saída do conversor com a tensão do ponto do sistema ao qual ele será conectado. Na maioria dos casos outro transformador é utilizado também para diminuir o conteúdo dos harmônicos da tensão terminal do STATCOM. Muitos têm dois transformadores, uma para compatibilização de níveis de tensão, e outro para diminuição de harmônicos e ligação em série dos conversores, caso haja mais de um.
- Conversor trifásico baseado em chaves de estado sólido, do tipo VSC.
- Banco de capacitores do lado de corrente contínua do conversor.

A diferença de tensão CA no transformador (que pode ser representado por uma reatância de dispersão série) causa uma troca de potência reativa entre o STATCOM e o

sistema, fazendo com que a tensão no barramento de conexão possa ser regulada, melhorando o perfil de tensão do sistema, sendo esta sua principal função.

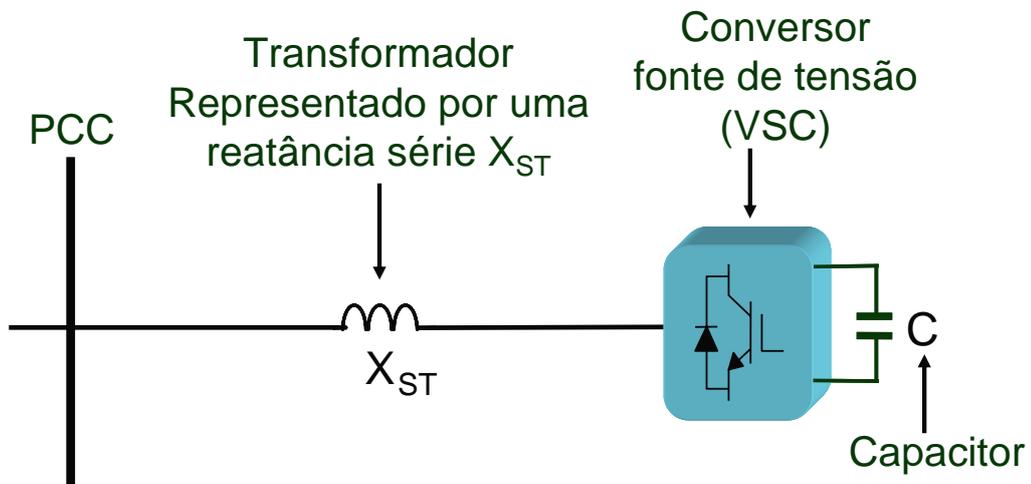


Figura 1 – Diagrama unifilar do STATCOM

Uma análise para o controle da potência reativa pode ser feita através de diagramas fasoriais. Considerando o equivalente Thévenin do sistema elétrico ao qual o compensador está ligado e o equivalente Thévenin do compensador paralelo ideal (sem harmônicos e sem perdas), tem-se o esquema mostrado na Figura 2. Neste esquema, foi considerado que as resistências são desprezíveis e que o ângulo de defasagem entre as tensões V_{ST} e V_{PCC} é δ .

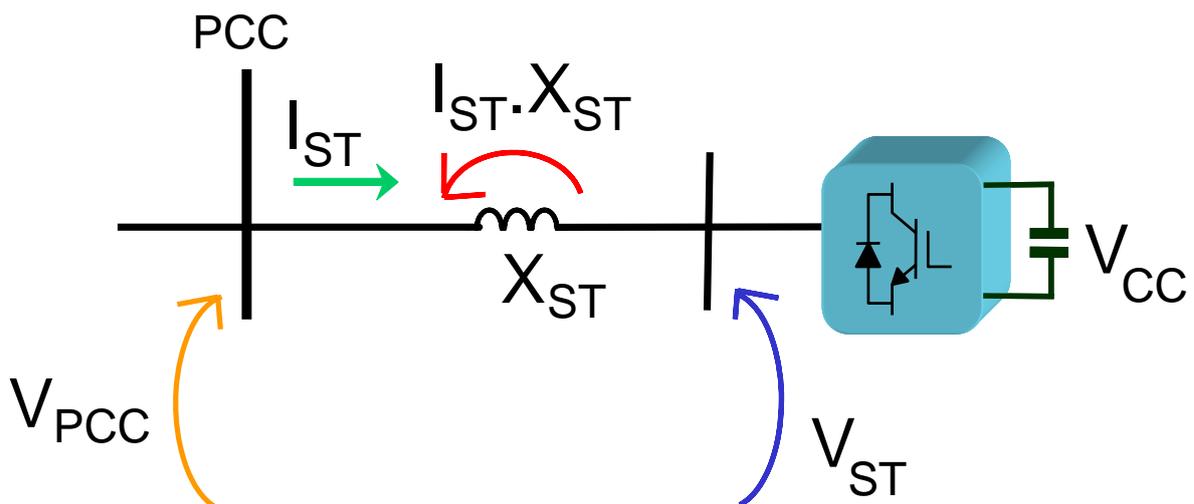


Figura 2 - Diagrama simplificado do STATCOM (V_S) e da rede CA (V_R)

Desenvolvendo as equações de potência entre duas fontes para a situação mostrada na Figura 2, temos [12]:

$$P_{PCC} = \frac{V_{PCC} V_{ST}}{X_{ST}} \cdot \sin \delta \quad (1.1)$$

$$Q_{PCC} = \frac{V_{PCC}^2 - V_{PCC} V_{ST}}{X_{ST}} \cdot \cos \delta \quad (1.2)$$

Considerando (1.1) e (1.2) temos cinco situações relevantes:

(a) Tensão V_{ST} adiantada em relação à V_{PCC} , como mostrado na Figura 3(a), $0^\circ < \delta < 90^\circ$, existe um fluxo de potência ativa na direção de V_{PCC} (Ponto de Conexão Comum), descarregando o capacitor e, por conseqüência, diminuindo sua tensão.

(b) Tensão V_{ST} atrasada em relação à V_{PCC} , como mostrado na Figura 3(b), $-90^\circ < \delta < 0^\circ$, existe fluxo de potência ativa na direção de V_{ST} (STATCOM), carregando o capacitor do lado CC e, por conseqüência, aumentando sua tensão.

(c) Tensão V_{ST} em fase com V_{PCC} , como mostrado na Figura 3(c), $\delta = 0^\circ$, e se $|V_{PCC}| > |V_{ST}|$, não há fluxo de potência ativa entre o PCC e o STATCOM, mas a corrente está atrasada em relação à V_{PCC} , caracterizando potência reativa indutiva nos terminais do STATCOM visto pelo PCC ($Q_{PCC} > 0$).

(d) Tensão V_{ST} em fase com V_{PCC} , como mostrado na Figura 3(d), $\delta = 0^\circ$, e se $|V_{PCC}| < |V_{ST}|$, não há fluxo de potência ativa entre o PCC e o STATCOM, mas a corrente está adiantada em relação a V_{PCC} , caracterizando potência reativa capacitiva nos terminais do STATCOM visto pelo PCC ($Q_{PCC} < 0$).

(e) Tensão V_{ST} em fase com V_{PCC} , como mostrado na Figura 3(e), $\delta = 0^\circ$, e se $|V_{PCC}| = |V_{ST}|$, não há fluxo de potência ativa nem reativa entre o PCC e o STATCOM, ou seja, o STATCOM fica em “*stand by*”.

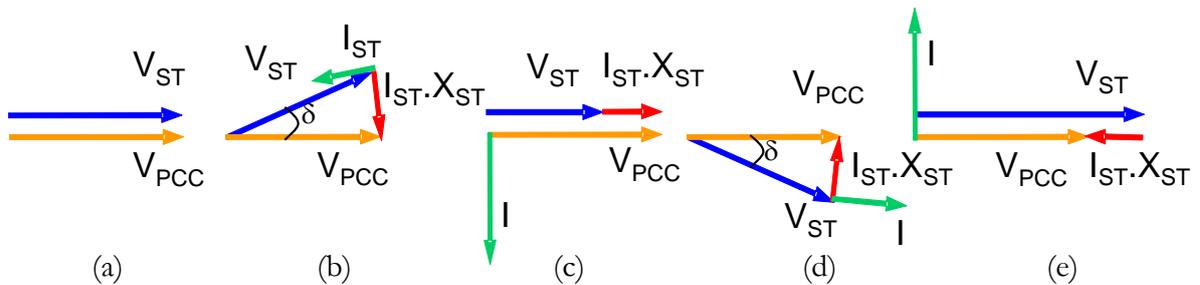


Figura 3 – Diagramas fasoriais de tensões e correntes

Verifica-se assim que um conversor fonte de tensão operando como uma fonte de tensão ideal com capacidade de controle de fase pode direcionar o fluxo de potência ativa entrando ou saindo do conversor.

O controle de tensão CA do STATCOM pode ser feito por modulação de largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) ou por modulação de amplitude de pulso (PAM – *Pulse Amplitude Modulation*). Ambas as modulações serão detalhadas posteriormente. No caso do controle PAM, pode-se controlar a tensão do capacitor CC e, conseqüentemente, controlar a amplitude da tensão CA nos terminais do STATCOM. Este controle da tensão CA permite o ajuste da potência reativa naquele ponto do circuito.

Aplicações típicas para o STATCOM são relacionadas a seguir:

- Controle e regulação de tensão
- Melhoria da margem de estabilidade transitória do sistema
- Amortecimento de oscilações no sistema
- Amortecimento de ressonância subsíncrona
- Atenuação de *flicker*
- Aplicações em sistemas de distribuição (*Custom Power*) [13]

1.2. Motivação

O STATCOM vem ocupando um importante papel na provisão de potência reativa e controle de tensão devido à sua excelente característica de operação e desempenho, especialmente em regime transitório, sendo bastante estudado nos últimos anos [14,15]. Vários estudos têm sido realizados sem se conhecer realmente o modelo matemático de um STATCOM [8,16-17]. Estes estudos baseiam-se em modelos digitais que permitem o estudo caso a caso, sem a flexibilidade dos modelos matemáticos analíticos. Com o modelo matemático analítico é possível calcular seu dimensionamento, prever seu comportamento ao ser inserido na rede, calcular a frequência de ressonância que surgirá com a presença desse STATCOM e facilitam a escolha dos parâmetros de um controlador para um STATCOM.

Enquanto os sistemas elétricos no mundo inteiro estão se tornando mais complexos e cada vez mais cargas não-lineares são utilizadas, um controle para resposta dos transitórios do sistema vem se tornando cada vez mais crítico. Logo, é necessário estudar a característica dinâmica do STATCOM e sua capacidade dinâmica de controlar a potência reativa e com isto garantir o controle rápido e preciso da tensão. Este fato permite aumentar a estabilidade dinâmica do sistema ou amortecer oscilações. A análise do desempenho dinâmico do STATCOM e métodos de controle vêm sendo estudados nos últimos anos [18,19]. O algoritmo de controle deve ser baseado em um modelo dinâmico instantâneo. Modelos dinâmicos fasoriais não se aplicam bem para a maioria dos problemas. O cálculo das potências ativa e reativa baseados no domínio da frequência não são adequados para controlar o STATCOM quando fenômenos rápidos (frequência acima de alguns Hz até dezenas de Hz) estão em jogo. Na realidade, os valores instantâneos de parâmetros do sistema de potência são utilizados para o controle dinâmico do STATCOM, fazendo com que a resposta do STATCOM possa ser alcançada em menos de um período da frequência do sistema.

1.3. Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Modelagem analítica do STATCOM em regime permanente para o cálculo do seu dimensionamento.
- Apresentar resultados experimentais em regime permanente do STATCOM *quasi* 24-pulsos.
- Modelagem analítica de um STATCOM para o regime dinâmico.

1.4. Linhas Gerais da Dissertação

A presente dissertação foi organizada da seguinte forma: seguindo a Introdução, no Capítulo 2 será apresentado o STATCOM *quasi* 24-pulsos. Será mostrado o motivo da utilização deste tipo de STATCOM e as suposições adotadas para sua utilização na obtenção dos modelos analíticos.

No Capítulo 3, será apresentada uma modelagem para o regime permanente. Com essa modelagem ficará claro como se deve calcular o dimensionamento do STATCOM em função dos parâmetros básicos da rede à qual ele será conectado.

No Capítulo 4, será proposta uma modelagem analítica para o regime dinâmico, com o auxílio da Transformada de Park e conceitos de controle moderno, como por exemplo, a obtenção do modelo em espaço de estados. Este modelo analítico será confrontado com o modelo representado no domínio do tempo.

Finalmente, no Capítulo 5, conclusões sobre esse trabalho de pesquisa serão apresentadas. Além disso, algumas sugestões de trabalhos futuros serão discutidas.

Capítulo 2

STATCOM *quasi* 24-pulsos

O conversor fonte de tensão (VSC) é o coração do STATCOM e de muitos dos equipamentos FACTS. Um conversor simples é capaz de produzir uma tensão com forma de onda quadrada conforme as suas chaves são acionadas. O objetivo principal do VSC é produzir uma tensão CA com mínima distorção harmônica a partir da tensão CC. Três configurações básicas são utilizadas para reduzir os harmônicos na tensão de saída do conversor:

- Conversores multi-pulso que utilizam Estruturas Magnéticas para Redução de Harmônicos (EMRH) e chaveamento PAM (*Pulse Amplitude Modulation*);
- Conversores multi-níveis com chaveamento PAM e conversores com chaveamento por modulação da largura de pulso (PWM – *Pulse-Width Modulation*).

2.1 Tipos de Conversores

2.1.1 Conversor Multi-pulso

A operação multi-pulso é alcançada através da conexão de conversores do tipo ponte trifásicas de 6 pulsos (Figura 4) ou com pontes monofásicas tipo ponte-H (não abordado neste trabalho, mas detalhada em [34]) em transformadores cujas saídas estão com suas fases deslocadas em relação às outras. Enrolamentos em estrela e delta possuem uma diferença de fase em 30 graus e a conexão de um conversor em cada transformador proporcionará uma tensão de saída do tipo 12 pulsos, com a eliminação do 5° e 7° componentes harmônicos. Este princípio pode ser estendido para a operação em 24 e 48 pulsos nas tensões de saída (lado primário) dos transformadores e utilizando-se vários conversores em cada secundário (4 para operação em 24-pulsos e 8 para 48-pulsos).

tensão de saída se aproxima de uma forma de onda senoidal, resultando em uma menor distorção harmônica. A Figura 6 mostra um exemplo de um ramo de conversor de 5 níveis e a tensão em uma fase. Este conversor é mais complexo e requer que a fonte de tensão CC seja separada ou com um *tap* central de forma a promover uma referência (zero) de tensão [20, 21].

A amplitude da tensão fundamental e o espectro harmônico são controlados através da variação do ângulo de chaveamento, α . A amplitude da tensão fundamental também pode ser controlada mantendo-se α constante e alterando V_{CC} .

Existem também formas alternativas de conversores multi-níveis [22,23], onde várias pontes conversoras, cada uma com seu próprio capacitor são conectados em série (cascata), como ilustrado na Figura 7. Essa topologia é mais simples que a apresentada na Figura 6, devido à inexistência de diodos de grampo (*clamp diodes*) e capacitores flutuantes.

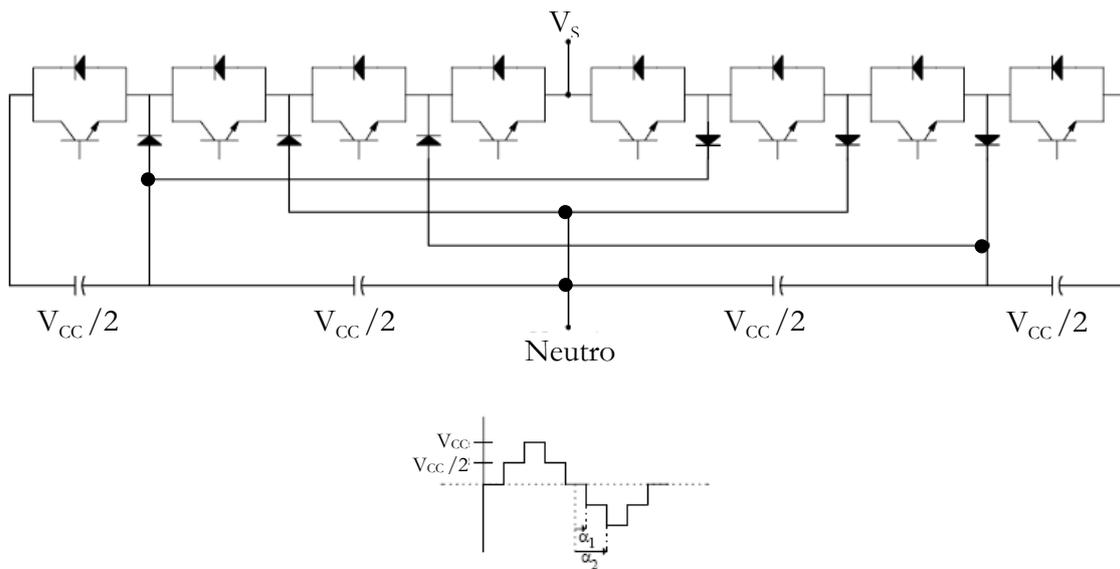


Figura 6 – Conversor de 5 níveis

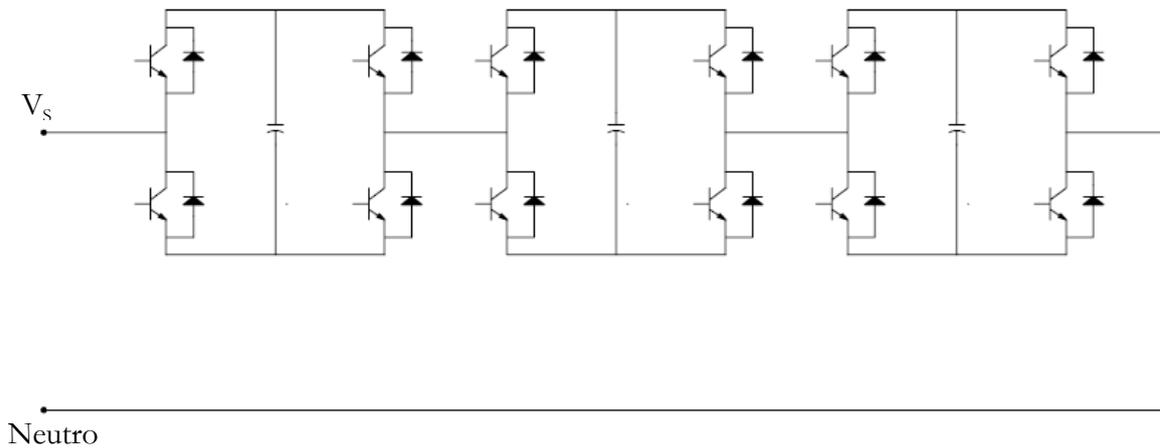


Figura 7 – Conversor cascata de sete níveis

A principal vantagem do conversor multi-nível é a sua capacidade de produzir uma forma de onda de tensão com baixa distorção harmônica sem a necessidade de uma estrutura magnética para redução dos harmônicos, desde que sua distorção harmônica de saída esteja em um valor aceitável. Normalmente esse valor de distorção baixo é conseguido com no mínimo nove níveis de tensão na saída. Em contrapartida, há a complexidade construtiva e o dimensionamento do capacitor CC, a necessidade de componentes de potência (diodos de potência) e algoritmos de controle adicionais para a equalização da tensão nos capacitores do lado CC.

2.1.3 Conversor PWM

Nos conversores multi-pulso e multi-nível, há apenas um disparo e bloqueio por chave a cada ciclo (se o controle de tensão for por PAM – *Pulse Amplitude Modulation*). Outra abordagem é a realização de vários disparos e bloqueios das chaves a cada meio ciclo, variando a largura dos pulsos de forma a obter valores diferentes na tensão CA de saída. A técnica de modulação por largura de pulso (PWM) é largamente utilizada para geração de uma tensão de saída com alta qualidade (baixo DHT – **D**istorção **H**armônica **T**otal considerando os harmônicos de baixa frequência) [1,2,13]. Com chaveamento PWM há um aumento significativo de harmônicos de frequências mais altas – da ordem de kHz – mas estes são mais facilmente eliminados por filtros passivos.

O chaveamento PWM requer um aumento considerável no número de chaveamentos dos semicondutores (chaveamento de alta frequência), geralmente aumentando as perdas por chaveamento no conversor [12,24,25]. Contudo, o constante crescimento da capacidade de chaveamento das chaves semicondutoras está permitindo o uso do PWM em aplicações de alta potência, da ordem de vários MVA [26,27].

Entre as várias topologias de VSC's, as configurações multi-pulso e multi-nível têm se tornado populares para aplicações de compensação de potência reativa. Nessas aplicações, a frequência de chaveamento pode ser mantida baixa para minimizar as perdas de chaveamento e as interferências eletromagnéticas [20]. Alguns STATCOM's comerciais são: O STATCOM instalado no Japão em 1991 que utiliza 3 pontes H monofásicas para compor um conversor trifásico, cada um com uma potência de 10MVA, e com oito VSC deste tipo forma o conversor de 48-pulsos, conectado em um transformador principal, resultando em um STATCOM 48-pulsos de 80MVA, em 154kV [28].

Um STATCOM de 100MVA foi instalado em 1995 pela *Tennessee Valley Authority* (TVA) na Subestação de Sullivan. Este STATCOM, também de 48-pulsos, foi conectado a um barramento de 161kV [29]. Outro exemplo é o UPFC (*Unified Power Flow Controller*) instalado na Subestação de Inez da AEP (*American Electric Power*) no Kentucky, EUA, baseado em dois VSC's de 48 pulsos idênticos com 160MVA cada [30].

2.2 STATCOM *quasi* 24-pulsos

Serão apresentadas neste item, as características elétricas e construtivas de um STATCOM *quasi* 24-pulsos. Outras topologias para o STATCOM, como por exemplo o STATCOM 6-pulsos, 12-pulsos e 24 pulsos serão detalhadas no apêndice B. A diferença básica entre o STATCOM *quasi* 24-pulsos e o 24 pulsos é que o STATCOM *quasi* 24-pulsos utiliza transformadores YY e Y Δ na estrutura EMRH, enquanto que no STATCOM 24-pulsos são utilizados transformadores zigzague na estrutura EMRH. Será apresentado também uma breve descrição do STATCOM *quasi*-24 pulsos experimental montado em laboratório. Maiores detalhes sobre o STATCOM experimental podem ser encontrados em [17].

Como explicado no item 2.1.1, um STATCOM 6 pulsos pode ser implementado com apenas um conversor de 6 pulsos. Para a síntese de um STATCOM 12 pulsos, são necessários dois conversores ligados em série pelo lado CA por meio de transformadores e em paralelo pelo lado CC. Para a síntese de um STATCOM quasi-24 pulsos são necessários quatro conversores ligados em série pelo lado CA por meio de transformadores e em paralelo pelo lado CC, e assim sucessivamente [8]. Esquemas de ligação 12 e quasi-24 estão apresentados na Figura 8.

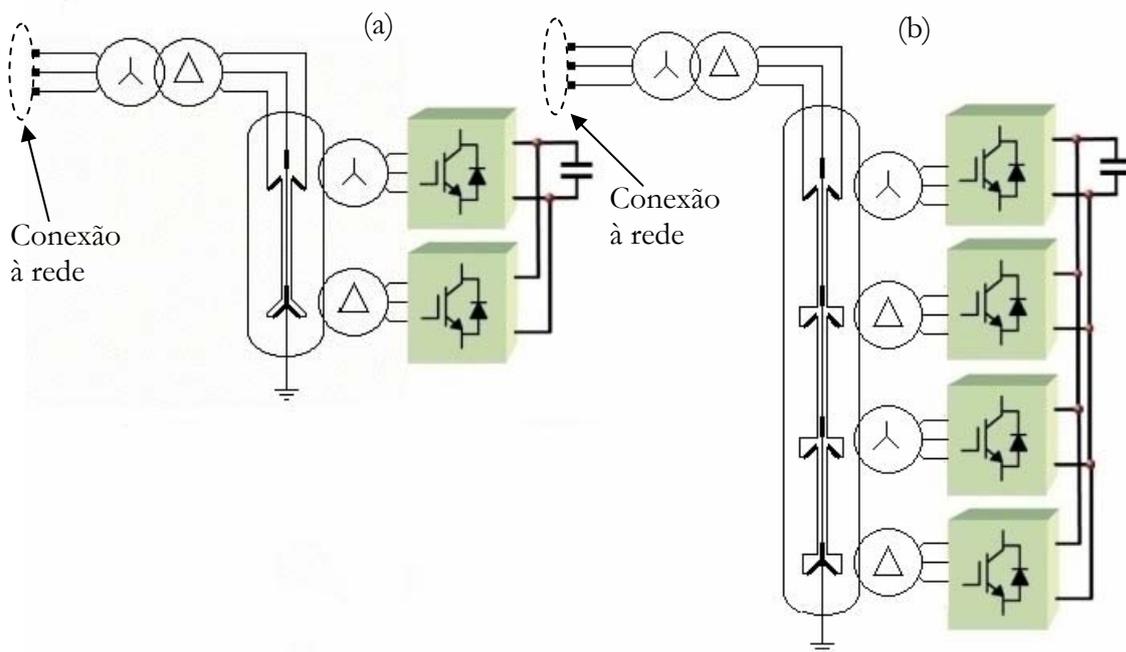


Figura 8 – (a) STATCOM 12 pulsos; (b) STATCOM quasi-24 pulsos

Como apresentado na Figura 8(a), os quatro conversores de 6 pulsos estão ligados a transformadores conectados em estrela-estrela e delta-estrela. Esta estrutura corresponde a dois conversores de 12 pulsos, com transformadores iguais dois a dois. Este conversor é mais simples que o conversor 24-pulsos, pois para síntese dos 24 pulsos são necessários transformadores zigzag. A complexidade dos enrolamentos nos transformadores zigzag faz com que o conversor *quasi* 24-pulsos seja mais atraente. Entretanto, a formação de um conversor *quasi* 24-pulsos a partir da ligação em série de dois conversores de 12 pulsos apenas minimiza os harmônicos de ordem 11 e 13, não os eliminando completamente, como no conversor 24-pulsos.

Na Figura 9 é mostrada a forma de onda de saída do STATCOM quasi-24 pulsos, bem como seu espectro harmônico.

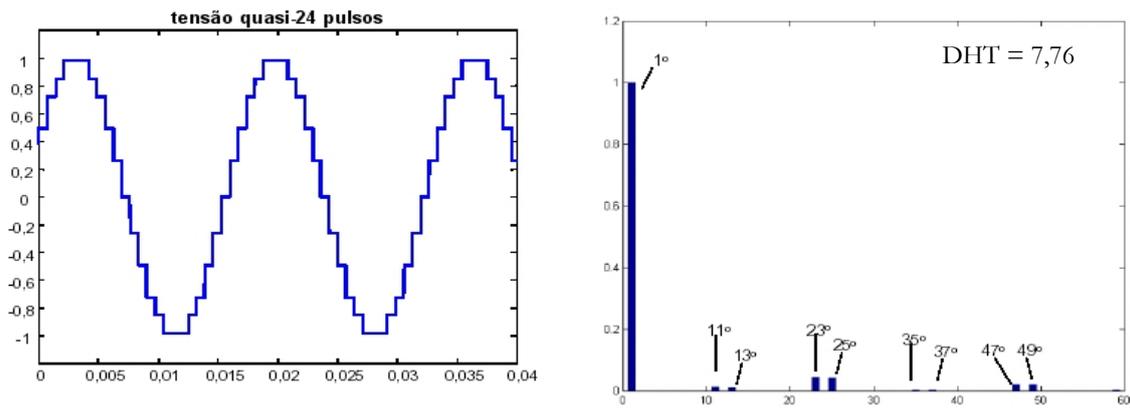


Figura 9 – (a) Tensão de saída no STATCOM quasi-24 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo

Os componentes harmônicos $12n \pm 1$ para n ímpar não são cancelados totalmente, como no caso de um conversor 24 pulsos, devido à simplificação do transformador.

Devido à baixa amplitude dos componentes harmônicos, para os estudos dos próximos capítulos, o conversor *quasi* 24-pulsos será representado por um modelo na frequência fundamental, tanto para o domínio do tempo quanto para o domínio da frequência. As tensões de saída e as correntes nas fases serão representadas apenas pela sua componente fundamental. Isto facilitará bastante a obtenção dos modelos analíticos.

O conversor escolhido para síntese do modelo do STATCOM para a construção em laboratório foi um conversor *quasi*-24 pulsos, conforme mostrado no esquema na Figura 10. Maiores detalhes podem ser obtidos no Apêndice C. Os quatro conversores a IGBT de 6 pulsos foram montados a partir de conversores CFW-09 da WEG [31], de potência igual a 15kVA. O conjunto conversores, capacitor no lado CC e controle caracterizam o STATCOM *quasi*-24 pulsos.

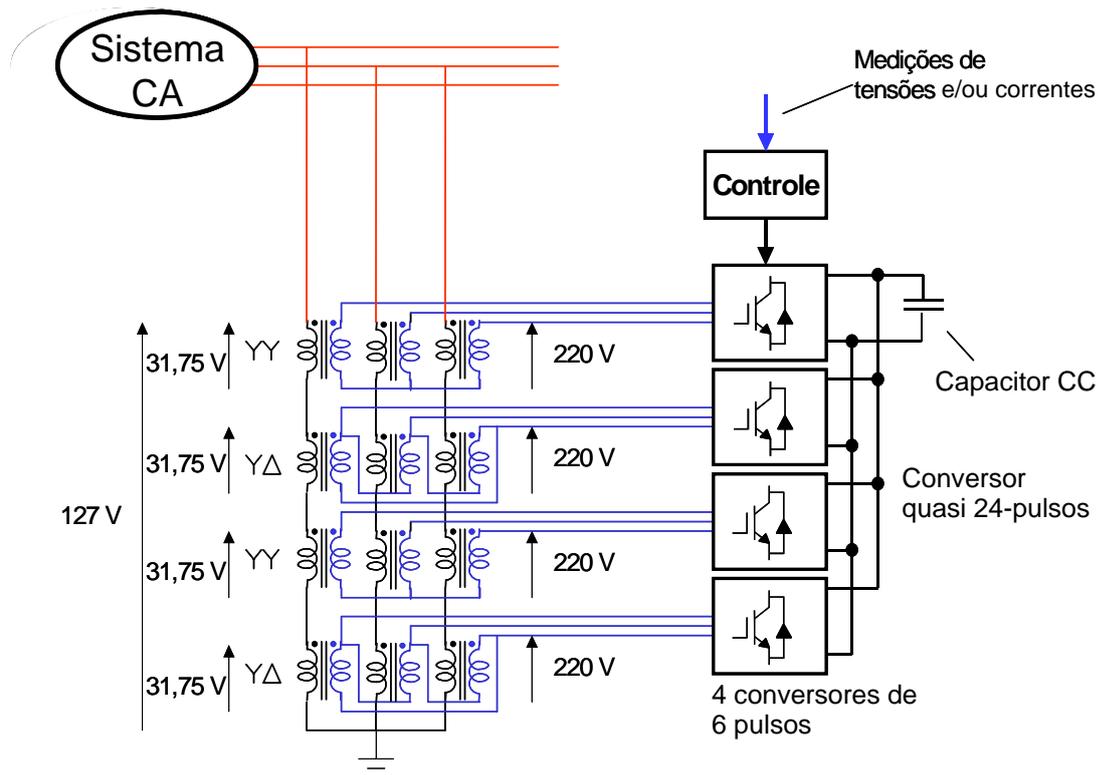


Figura 10 - Esquema do STATCOM quasi-24 pulsos experimental.

A tensão do lado da rede do protótipo é de 220V (fase-fase) e a potência de cada um dos transformadores da EMRH é de 15kVA. A soma das potências dos transformadores permite uma potência total no STATCOM de 60kVA.

Tendo em vista o fato do STATCOM experimental ter sido desenvolvido para operação em rede com tensão de 220V, os transformadores da EMRH do protótipo fazem o acoplamento com o circuito do sistema CA. Desta forma, a tensão no lado CA em Y de cada um dos transformadores conectados em série tem a tensão nominal de 31,75V, conforme o esquema mostrado na Figura 10. A tensão de operação dos VSC's é de 220V, logo, determina-se este valor para o lado do conversor em Y e em Δ dos transformadores.

Na Figura 11 as tensões experimentais entre fases de saída do STATCOM são mostradas. Essa forma de onda não apresenta componentes harmônicas de seqüência zero, porém apresenta componentes harmônicas de seqüência positiva e negativa da ordem de $12n \pm 1$ (para $n = 1, 2, 3, \dots$). A DHT (Distorção Harmônica Total) da tensão de saída do STATCOM *quasi*-24 pulsos vale, idealmente, 7,76%.

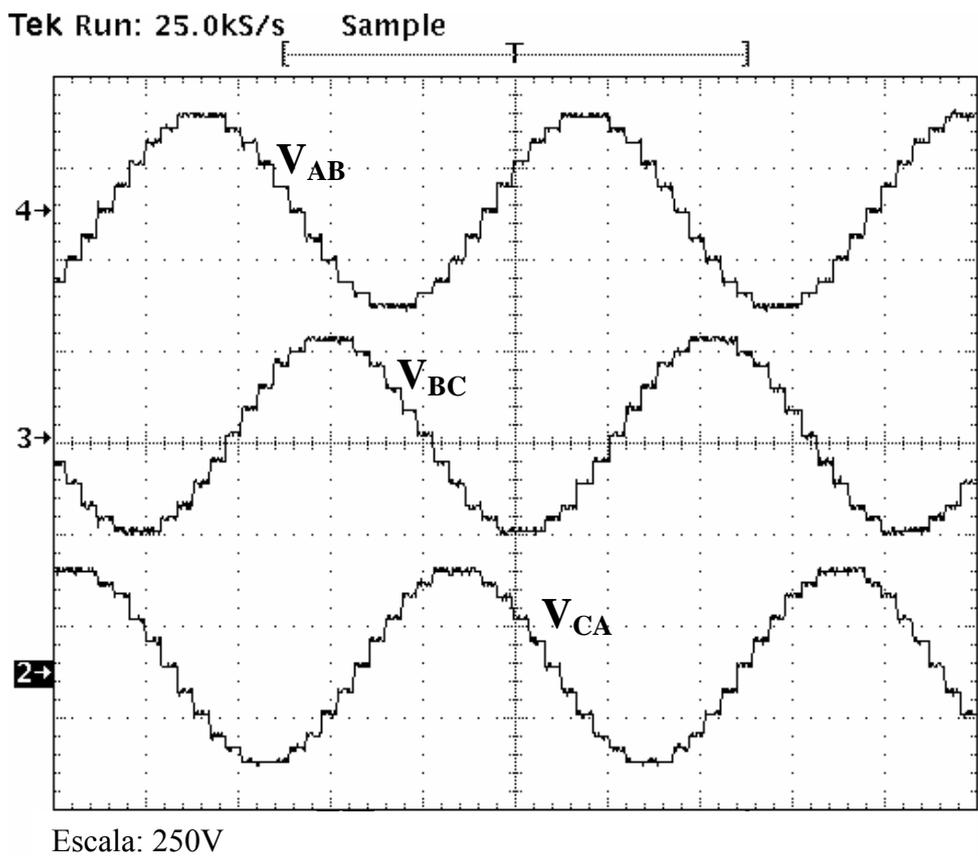


Figura 11 – Tensões fase-neutro de saída do STATCOM quasi 24 pulsos.

O diagrama unifilar do sistema experimental montado em laboratório é apresentado na Figura 12. Esse sistema foi montado para servir de base para os capítulos seguintes.

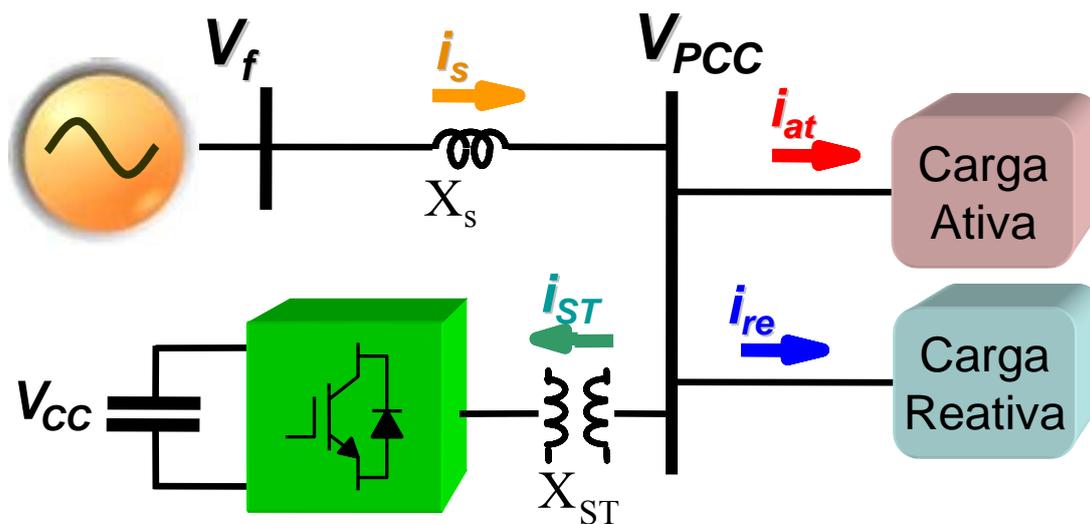


Figura 12 – Diagrama unifilar do esquema montado em laboratório.

Na Figura 13 são apresentadas as formas de onda da tensão na fonte V_f , tensão no ponto de conexão comum (PCC) do STATCOM e das cargas (V_{PCC}) e corrente que a fonte fornece. O STATCOM não está conectado no PCC. Para este exemplo, utilizou-se apenas uma carga reativa indutiva. Nota-se que a corrente está atrasada de quase 90° em relação à V_{PCC} . O valor da carga reativa utilizada nesse experimento foi de 3 kvar. Nos cálculos subsequentes, foi usado como base de potência o valor de 5 kVA e de tensão de linha 220V. A reatância série (X_f) inserida entre a fonte e o PCC vale $1,94 \Omega$ ($\approx 5,0$ mH), o que equivale a aproximadamente 0,2 pu na base escolhida.

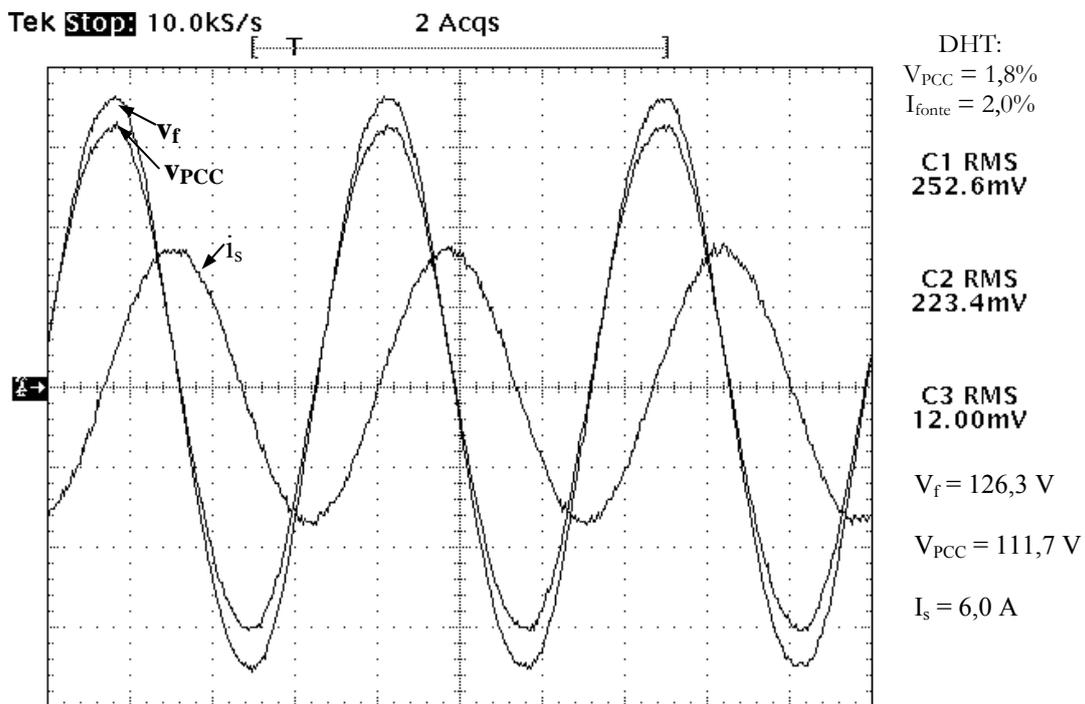


Figura 13 – Formas de onda das tensões na fonte e no PCC e corrente na fonte sem a conexão do STATCOM

Na Figura 14 são apresentadas as formas de ondas medidas no sistema. Agora o STATCOM está conectado no PCC, regulando a tensão no mesmo valor da tensão da fonte, conforme detalhado no Apêndice E. Nota-se que a corrente está ligeiramente capacitiva. A justificativa para essa corrente capacitiva é que o STATCOM não deve apenas fornecer potência reativa para carga, mas deve fornecer um pouco de potência reativa para o sistema para compensar a queda de tensão nas impedâncias (cabos, perdas nos transformadores, etc...), não representadas no diagrama unifilar da Figura 12. Uma explicação mais detalhada será apresentada no próximo capítulo.

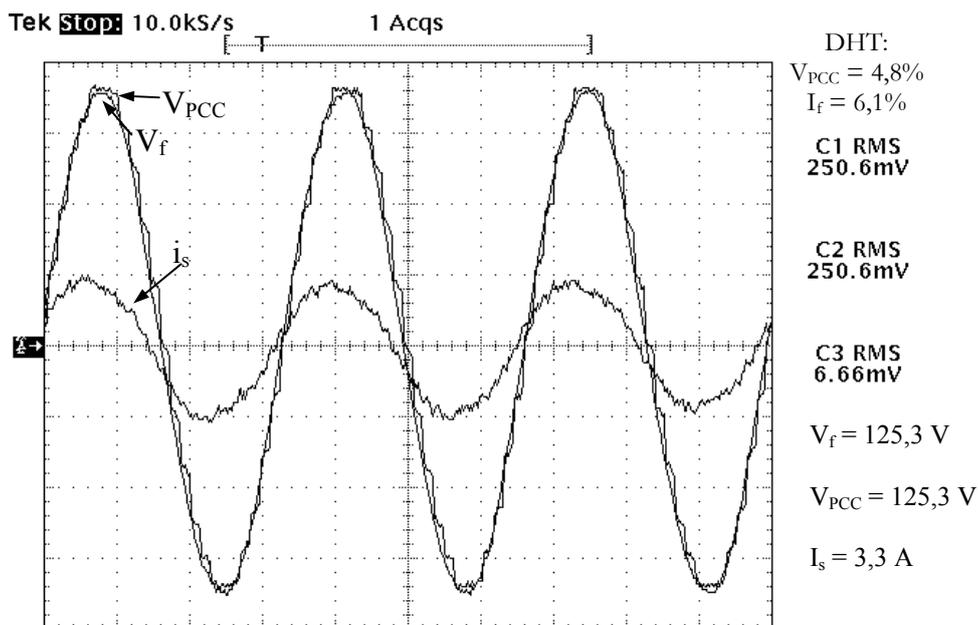


Figura 14 – Formas de onda das tensões na fonte e no PCC e corrente na fonte com a conexão do STATCOM

2.3 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram apresentados os tipos de conversores que podem sintetizar o STATCOM. Foram mostradas as vantagens e desvantagens de cada um e o motivo da escolha do conversor *quasi* 24-pulsos para implementação em laboratório. Foram apresentados formas de ondas *quasi* 24-pulsos, seu espectro harmônico e seu DHT. Foram apresentados detalhes elétricos e construtivos do projeto e a operação do STATCOM experimental em regime permanente.

Capítulo 3

Análise em Regime Permanente

No capítulo anterior foram apresentados os conversores que podem sintetizar o STATCOM e a implementação experimental de um STATCOM regulando a tensão no Ponto de Conexão Comum em regime permanente. Neste capítulo será proposta uma forma de modelagem do STATCOM em regime permanente para cálculo do seu dimensionamento. Será mostrado como a tensão no Ponto de Conexão Comum varia conforme há variação de potência ativa e reativa da carga conectada no PCC bem como a sensibilidade da tensão no PCC em relação a alguns parâmetros.

3.1 Variação de tensão no PCC (Ponto de Conexão Comum)

Primeiramente será apresentada uma análise mostrando como varia a tensão no PCC em um sistema simples, em função da variação da potência da carga conectada e da variação da tensão na fonte. Essa análise em regime permanente será realizada através de um equacionamento com a ajuda de diagramas fasoriais e gráficos ilustrando este equacionamento.

3.1.1 Perfil de tensão no PCC em regime permanente

Na Figura 15 é apresentado o sistema provido de uma fonte de tensão V_f , uma carga e uma reatância indutiva X_s entre a fonte de tensão e a carga linear. A reatância poderia vir acompanhada de uma resistência série, mas como normalmente o módulo da reatância é bem maior que o valor da resistência, por simplicidade, a resistência será suprimida.

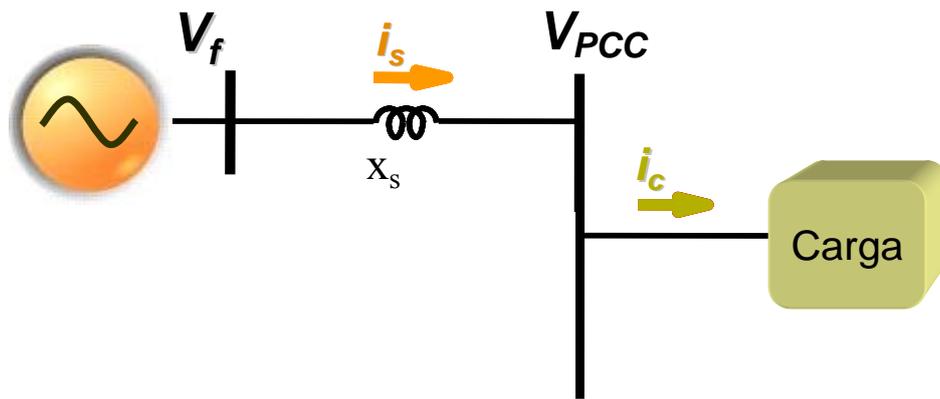


Figura 15 – Sistema elétrico simples.

Toda carga linear pode ser representada pelas suas partes real e imaginária (ativa e reativa). Logo, para uma melhor análise, a carga linear será representada separadamente pela sua parte ativa e reativa, como mostrado na Figura 16.

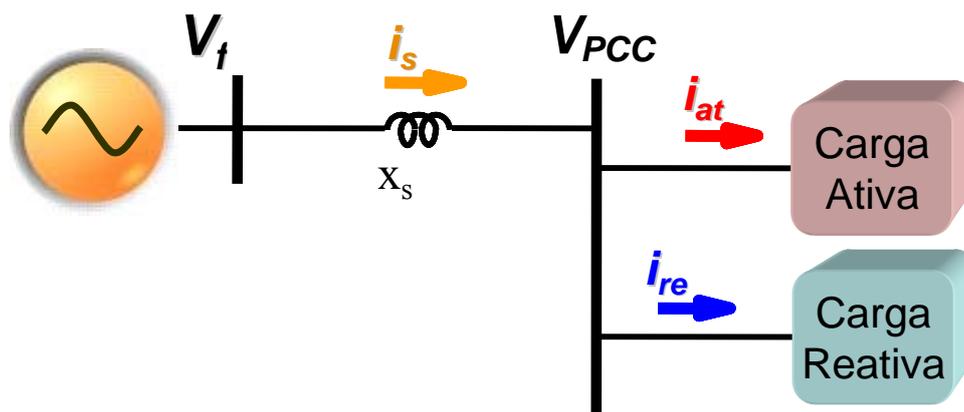


Figura 16 - Sistema elétrico simples com a carga representada pelas suas partes ativa e reativa.

Utilizando este sistema, pode-se deduzir o diagrama fasorial de tensão e corrente, mostrado na Figura 17, através da representação das variáveis por fasores, utilizada na representação de sistemas em regime permanente.

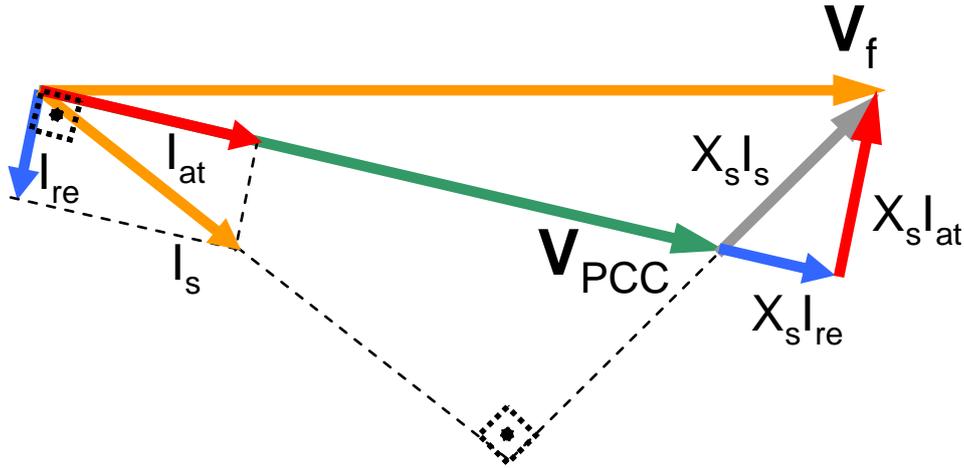


Figura 17 – diagrama fasorial do sistema apresentado na Figura 16.

A componente $X_s I_{re}$ é a queda de tensão na reatância X_s devido à corrente reativa da carga e a componente $X_s I_{at}$ é a queda de tensão devido à parte ativa da carga.

A partir do diagrama fasorial apresentado, podemos derivar:

$$V_f^2 = (V_{PCC} + X_s I_{re})^2 + (X_s I_{at})^2 \quad (3.1)$$

Reescrevendo a equação (3.1), temos:

$$V_{PCC} = -X_s I_{re} + \sqrt{V_f^2 - X_s^2 I_{at}^2} \quad (3.2)$$

Percebe-se que, a tensão no PCC, é dependente de três variáveis (I_{re} , I_{at} e V_f) e dependente da reatância entre a fonte e a carga.

Supondo agora, que no PCC é conectado um STATCOM para regulação de tensão no PCC, como mostrado na Figura 18. Como explicado no Capítulo 2, seção 2.2, modelaremos o STATCOM *quasi* 24-pulsos como uma fonte de tensão senoidal controlada na frequência fundamental, devido ao seu baixo conteúdo de harmônicos. Logo, podemos deduzir outro diagrama fasorial, mostrado na Figura 19. Neste exemplo, o STATCOM está com uma corrente reativa capacitiva de módulo menor que a corrente reativa indutiva da carga.

A corrente reativa total no conjunto “carga + STATCOM” é dada por I_{rl} , onde $I_{rl} = I_{re} - I_{ST}$. A nova componente $X_s I_{ST}$, é a queda de tensão em X_s devido à corrente do STATCOM. O índice “rl” em I_{rl} pode ser entendido como “reativo líquido”, ou seja, I_{rl} é a

corrente reativa líquida do conjunto “carga + STATCOM”.

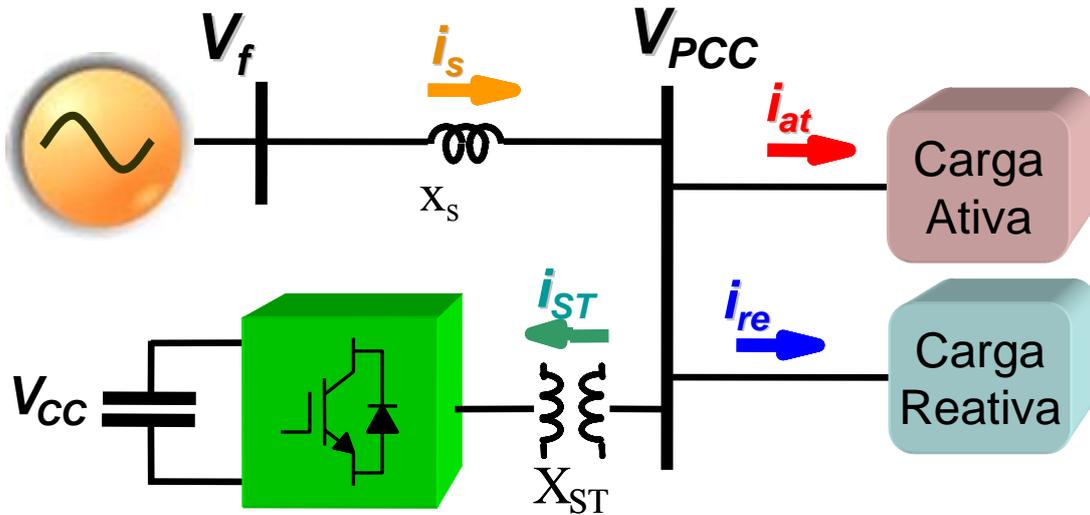


Figura 18 – Conexão do STATCOM ao sistema.

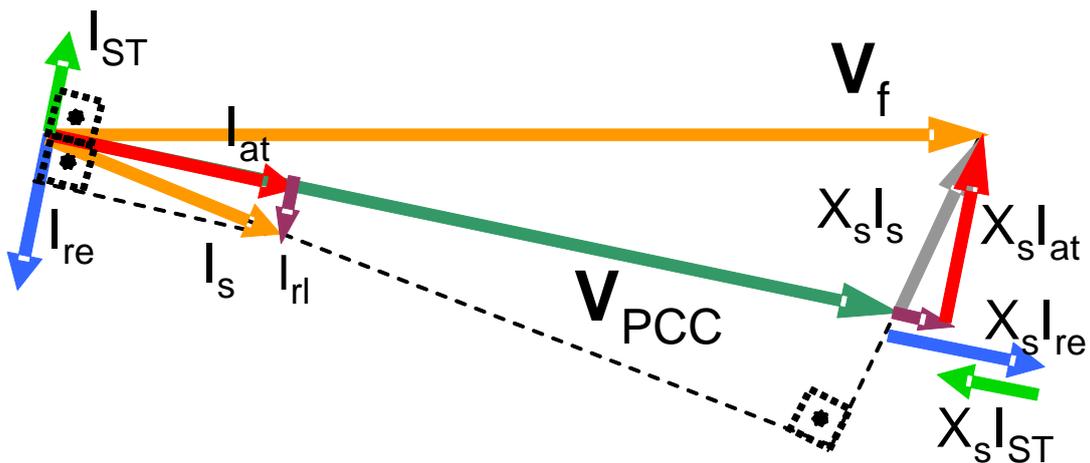


Figura 19 – Diagrama fasorial das tensões e correntes do sistema elétrico com o STATCOM.

A partir do novo diagrama fasorial, podemos compor uma nova equação:

$$V_{PCC} = -X_s I_{rl} + \sqrt{V_f^2 - X_s^2 I_{at}^2} \quad (3.3)$$

Supõe-se que não haja variação na tensão da fonte (V_f), ou seja, que a fonte seja uma barra infinita. A reatância série escolhida no Capítulo 2 para o sistema foi de 0,2 pu. Variando a corrente I_{at} de 0 pu a 1 pu e variando a corrente I_{rl} de 1 pu capacitivo a 1 pu indutivo, obtemos o gráfico da Figura 20 para valores de V_{PCC} .

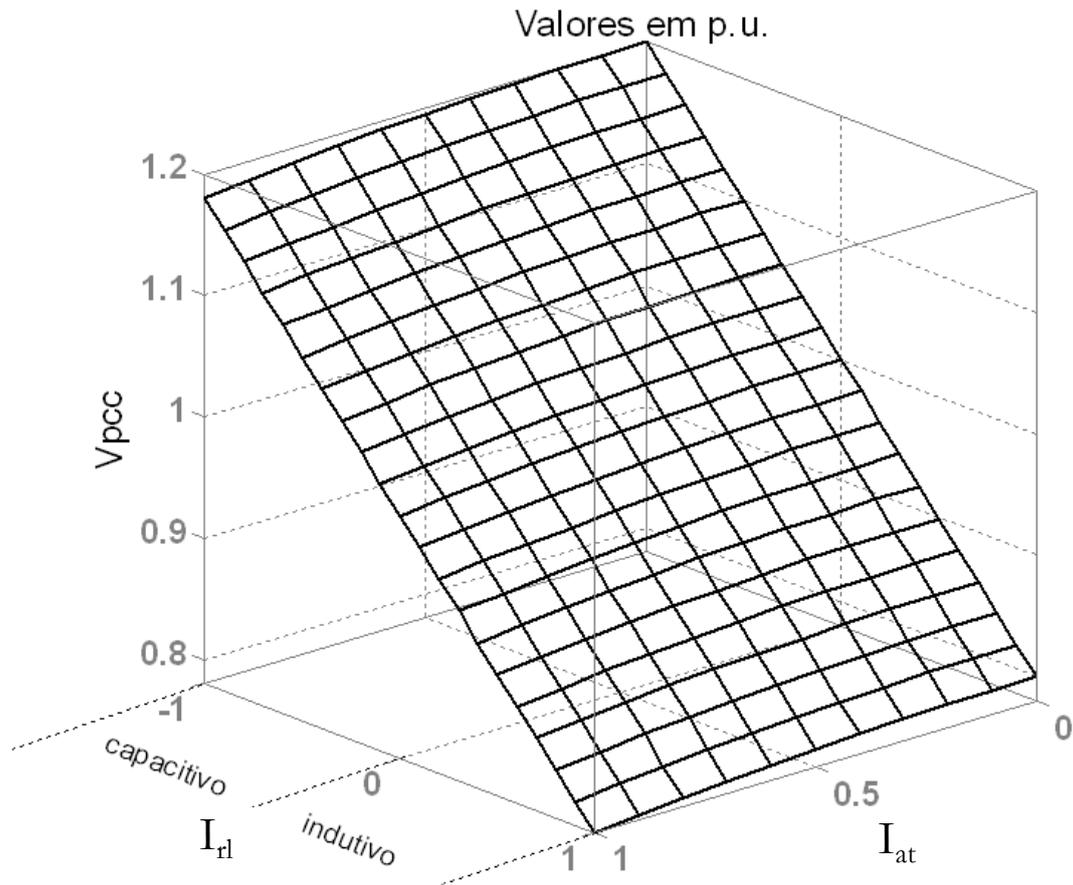


Figura 20 – Tensão no PCC em função das correntes ativa I_{at} e reativa I_{rl} .

Para melhor análise da Figura 20, será mostrada sua projeção em cada um dos três pares de eixos ($I_{at} \times I_{rl}$, $I_{at} \times V_{PCC}$ e $I_{rl} \times V_{PCC}$).

Na Figura 21 são apresentadas curvas de I_{rl} em função das correntes ativas I_{at} que garantem V_{PCC} constante em vários valores. Nota-se que, conforme se aumenta a carga ativa, para se manter a tensão em 1,0 pu, é necessário que a corrente líquida (“carga + STATCOM”) se torne um pouco capacitiva, ou seja, a potência reativa do STATCOM deverá ser um pouco maior que a potência reativa da carga. No entanto, nota-se que a influência da corrente ativa da carga na tensão V_{PCC} é relativamente pequena.

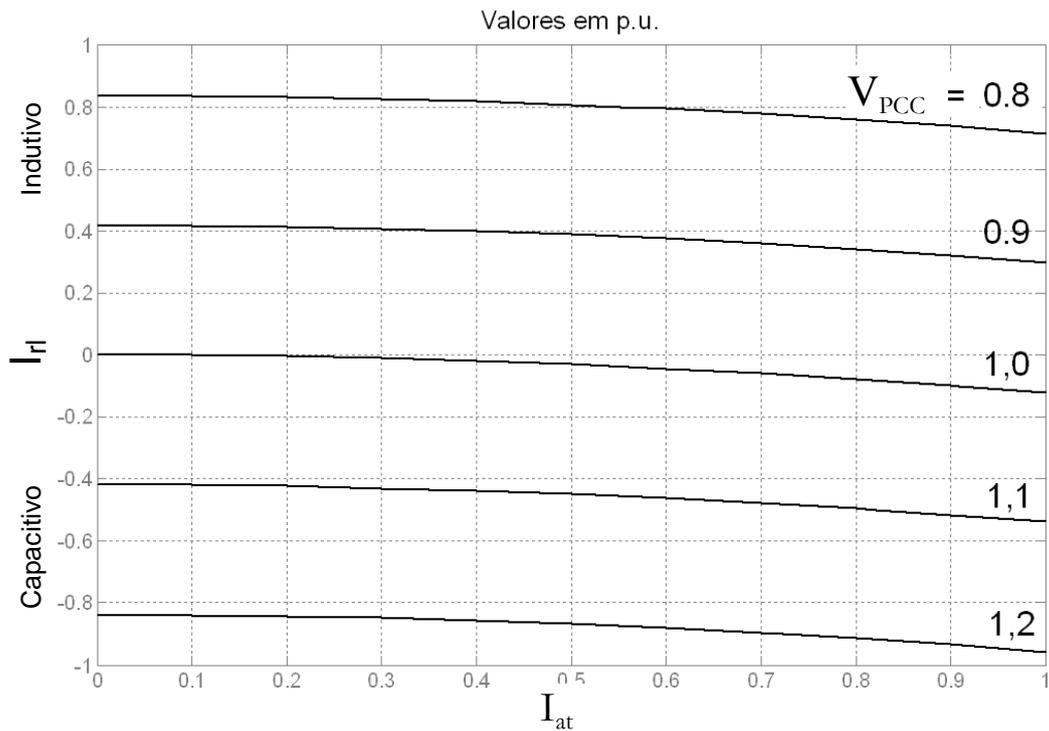


Figura 21 – Valores de correntes ativa e reativa para cada curva V_{PCC} constante.

Na Figura 22 são apresentadas curvas de I_{at} x V_{PCC} para vários valores de I_{rl} . Nesse gráfico é fácil visualizar como varia a tensão no PCC para vários valores de correntes ativa e reativa.

Na Figura 23 são apresentadas curvas mostrando a relação de V_{PCC} em função de I_{rb} para vários valores de I_{at} . Nesta figura nota-se a grande sensibilidade na variação da tensão no PCC conforme se varia a corrente reativa. No entanto, a variação de V_{PCC} em função de I_{at} é relativamente pequena.

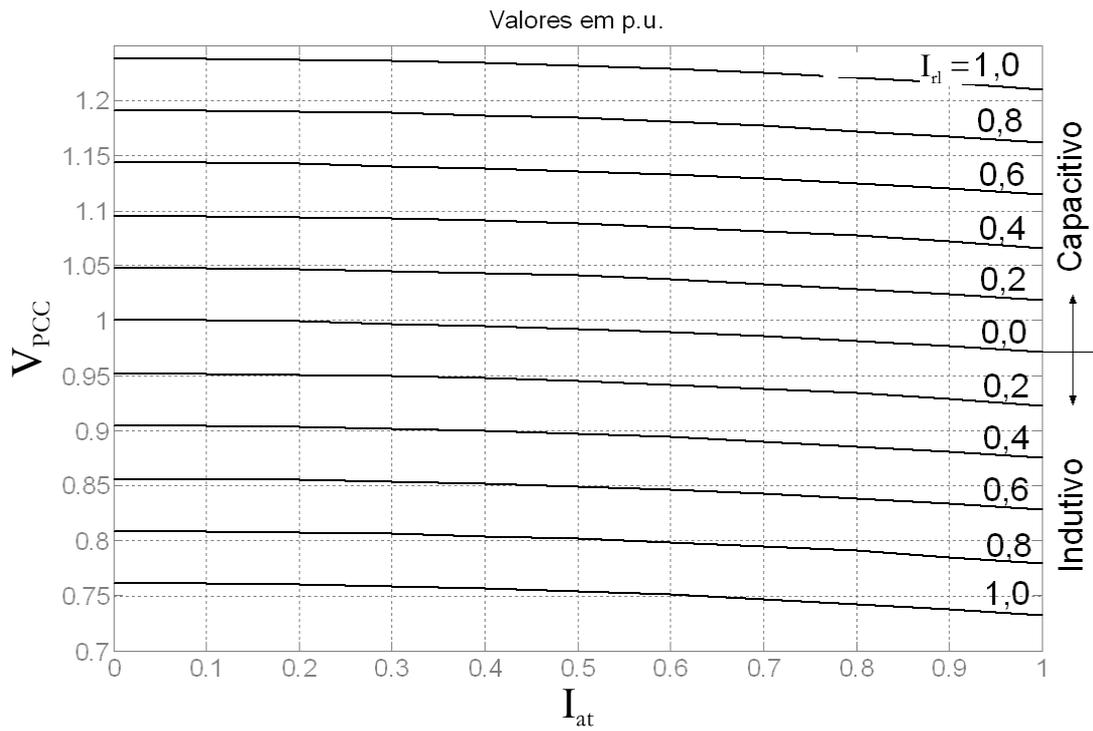


Figura 22 – Valores de corrente ativa e V_{PCC} para cada curva I_{rl} constante.

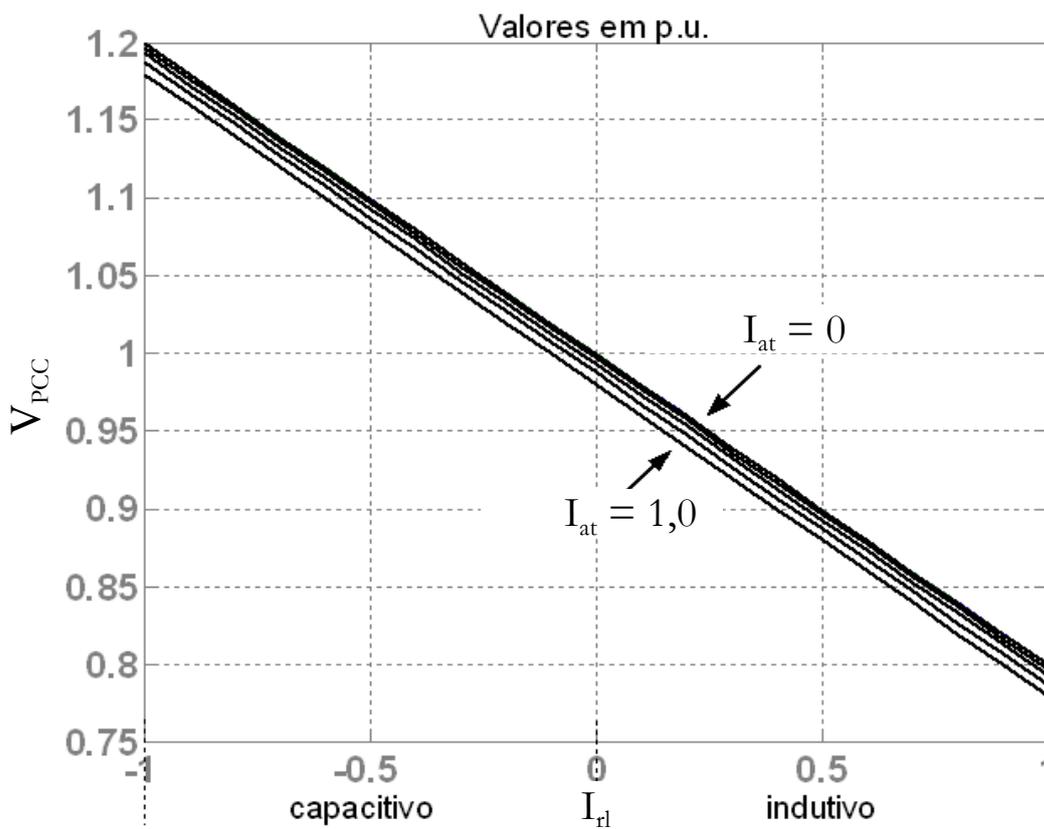


Figura 23 – Valores de corrente reativa e V_{PCC} para cada reta I_{at} constante.

Será mostrado agora, como varia a tensão no PCC em função da variação na tensão da fonte. Será mostrada também a corrente reativa necessária para mantermos a tensão no PCC em um dado valor constante, por exemplo, $V_{PCC} = 1,0$ pu.

Supõe-se agora que não haja variação na corrente ativa da carga (I_{at}), e que essa se mantenha em 1.0 pu. Ainda com relação a (3.3), variando a corrente I_{rl} de 1 pu capacitivo a 1 pu indutivo e variando a tensão na fonte de 0,7 a 1,3 pu, obtemos o gráfico da Figura 24, para diferentes valores de V_{PCC} . Por deste gráfico, percebe-se que, se a tensão na fonte cair de 1.0 pu para 0,9 pu, a corrente reativa líquida que antes valia aproximadamente 0,1 pu capacitivo, para a tensão no PCC se manter em 1,0 pu, é necessário que a corrente reativa líquida atinja o valor de aproximadamente 0,55 pu capacitivo. Isto significa que se for utilizado o STATCOM para regular a tensão no PCC quando houver variações na tensão da fonte, a sua capacidade fica muito maior que no caso apenas de variação de corrente reativa da carga.

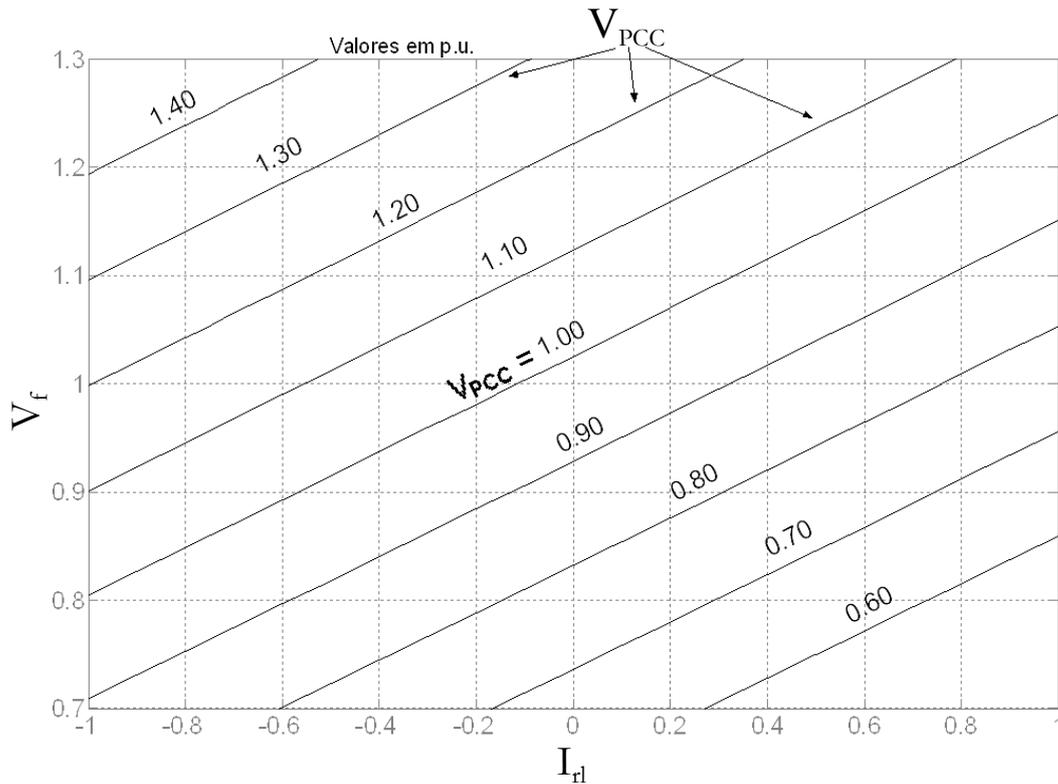


Figura 24 – Tensão na fonte em função da corrente reativa para diferentes valores de V_{PCC} .

Na Figura 25 são mostradas as curvas da tensão V_{PCC} em função de I_{rl} para diferentes valores da tensão na fonte V_f .

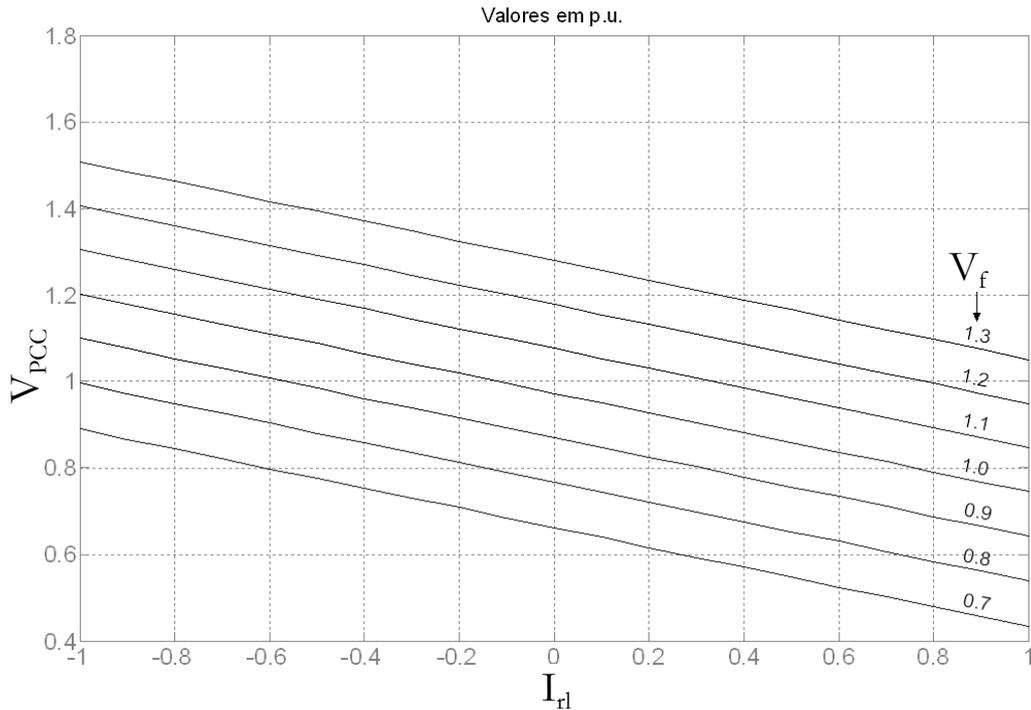


Figura 25 – Valores de corrente reativa e tensão no PCC para cada reta V_f constante

3.2 Análise de Sensibilidade de V_{PCC}

A análise de sensibilidade tem por objetivo avaliar a influência de um ou mais parâmetros da rede em seu desempenho global, ou em alguma variável, como V_{PCC} .

Podemos derivar V_{PCC} em relação a alguns de seus parâmetros para analisarmos sua sensibilidade em relação a estes parâmetros.

Derivando parcialmente (3.3) em relação a I_{rl} , chegamos a:

$$\frac{\partial V_{PCC}}{\partial I_{rl}} = -X_s. \quad (3.4)$$

A partir desta equação, nota-se que, a variação da tensão no PCC devido à variação de I_{rl} depende apenas de X_s . Se X_s assumir valores relativamente grandes, para pequenas alterações em I_{rl} haverá grandes alterações em V_{PCC} . Tomando como base o STATCOM experimental, assumindo X_s igual a 0,2 pu a variação máxima é de 20% em V_{PCC} . O STATCOM para compensar esta queda deve ser tal que compense toda a corrente reativa da carga. Se esta for de 1,0 pu, então o STATCOM deverá ser também de 1,0 pu de potência nominal.

Derivando parcialmente (3.3) em relação a I_{at} , chegamos a:

$$\frac{\partial V_{PCC}}{\partial I_{at}} = -\frac{X_s^2 I_{at}}{(V_f^2 - X_s^2 I_{at}^2)^{1/2}} \quad (3.5)$$

Se X_s assumir valores pequenos, $V_f^2 \gg X_s^2 I_{at}^2$, pois $X_s^2 \approx 0$. Logo:

$$\frac{\partial V_{PCC}}{\partial I_{at}} \cong -\frac{X_s^2 I_{at}}{V_f} \quad (3.6)$$

A partir desta equação, nota-se a pouca dependência da tensão no PCC em relação à variação de I_{at} , pois o valor de X_s^2 normalmente é muito pequeno. Variação de I_{at} implica em $\Delta V_{PCC} = -X_s^2$ pu para $V_f = 1$ pu e $I_{at} = 1$ pu. Considerando $X_s = 0,2$ pu, a variação máxima é de 4,0% em V_{PCC} . Para compensar esta variação com o STATCOM é necessária uma corrente reativa de 0,1 pu. Ou seja, basta um STATCOM de 0,1 pu potência nominal.

X_s pode assumir valores relativamente grandes, como em sistemas de média tensão com alimentadores de longo comprimento. Se assumirmos $X_s = 0,5$ pu, a variação de tensão no PCC considerando (3.5) chega à 30% para $V_f = 1$ pu e $I_{at} = 1$ pu.

Derivando parcialmente a equação (3.3) em relação a V_f , chegamos à equação (3.7).

$$\frac{\partial V_{PCC}}{\partial V_f} = \frac{V_f}{(V_f^2 - X_s^2 I_{at}^2)^{1/2}} \quad (3.7)$$

Como $V_f^2 \gg X_s^2 I_{at}^2$, pois $X_s^2 \approx 0$, temos que:

$$\frac{\partial V_{PCC}}{\partial V_f} \cong 1 \quad (3.8)$$

A partir desta equação nota-se a grande dependência da tensão no PCC em relação à variação na tensão da fonte. Esta equação mostra que, se a tensão na fonte varia em 0,1 pu, a tensão no PCC também variará 0,1 pu.

Para análise da variação de V_f , ainda consideramos $X_s = 0,2$ pu e I_{at} em 1 pu. Se V_f sofrer uma queda de 10%, para manter a tensão no PCC em 1 pu, é necessário que o STATCOM compense toda a corrente reativa da carga, além de fornecer uma corrente a mais de aproximadamente 60%. Ou seja, para este caso, o STATCOM deverá ser de 1,6 pu de potência nominal.

X_s assumindo um valor relativamente grande, como $X_s = 0,5$ pu, se a tensão na fonte varia em 0,1 pu, a tensão no PCC a partir de (3.7) variará aproximadamente 0,12 pu.

Mas para definir exatamente a potência de um STATCOM para controle de tensão, cada caso deverá ser estudado individualmente, pois esta dependerá principalmente da reatância série entre a fonte e o PCC, da potência reativa da carga e da possível variação de tensão na fonte.

3.3 Validação experimental em regime permanente do estudo

Primeiramente, foi analisado o caso do STATCOM conectado ao PCC sem nenhuma carga conectada, conforme mostrado na Figura 26. A reatância X_{ST} é a representação da reatância de dispersão dos transformadores da estrutura EMHR. Foi ajustada a tensão de saída do STATCOM de forma que a tensão no PCC se igualasse em módulo à tensão da fonte V_f . A corrente I_{ST} medida foi de 3,2 A. Como o STATCOM experimental foi construído com uma potência de 60 kVA para uma tensão de linha de 220V, essa corrente representa apenas 2% de sua corrente nominal. Esse valor pode ser considerado como sendo um valor de perdas ativas no STATCOM, causadas pelas perdas no chaveamento, perdas nos transformadores da EMRH, etc.

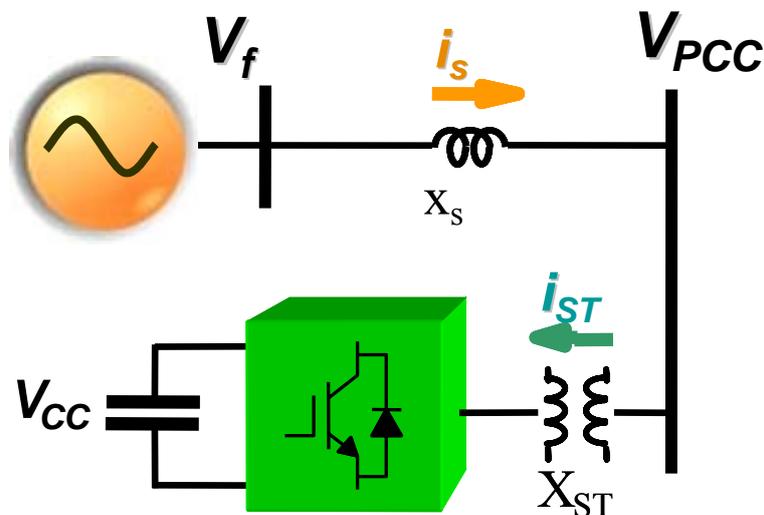


Figura 26 – Conexão do STATCOM no PCC sem as cargas.

Com a conexão das cargas ativa e reativa no PCC (mostrado anteriormente na Figura 18), procedeu-se o levantamento da Tabela 1:

- A carga reativa foi mantida fixa em 3 kvar (aprox. 7,5 A por fase);
- A carga ativa foi variada desde 0 kW até 4,5 kW (aprox. 12,0 A por fase) utilizando-se um reostato;
- Para cada valor de resistência do reostato, a tensão no PCC foi ajustada para o mesmo valor da tensão na fonte.

Tabela 1 – Valores medidos no circuito com o STATCOM experimental.

Vf (V)	VPCC (V)	Is (A)	Ist [perdas] = 3,2 A			STATCOM			
			CARGA			STATCOM			
			Iat (A)	Iat (pu)	Ire (A)	Ist (A)	Ist [reativo] (A)	Irl (A)	Irl (pu)
216,0	216,0	3,5	0,0	0,00000	7,1	7,9	7,2	0,1	0,00920
216,0	216,0	5,0	1,0	0,07485	7,1	8,2	7,5	0,4	0,03367
216,0	216,0	5,8	2,0	0,14970	7,1	8,3	7,7	0,6	0,04179
216,0	216,0	7,0	3,2	0,23952	7,1	8,0	7,3	0,2	0,01737
216,0	216,0	7,5	4,0	0,29940	7,1	8,4	7,8	0,7	0,04989
215,0	215,0	9,5	5,4	0,40419	7,1	8,2	7,5	0,4	0,03367
215,0	215,0	10,0	6,6	0,49401	7,1	8,8	8,2	1,1	0,08215
215,0	215,0	11,0	8,4	0,62874	7,1	9,0	8,4	1,3	0,09820
214,5	214,5	13,0	10,0	0,74850	7,1	9,2	8,6	1,5	0,11419
214,0	214,0	16,0	12,0	0,89820	7,1	10,0	9,5	2,4	0,17771

Com a obtenção da corrente de perdas do STATCOM, (3.3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_{PCC} = -X_s I_{rl} + \sqrt{V_f^2 - X_s^2 \cdot (I_{at} + I_{at}^{perdas})^2} \quad (3.9)$$

Substituindo o valor experimental encontrado para a corrente ativa de perdas, chegamos a (3.10).

$$V_{PCC} = -X_s I_{rl} + \sqrt{V_f^2 - X_s^2 \cdot (I_{at} + 3,2)^2} \quad (3.10)$$

A partir dos dados da Tabela 1 é apresentada na Figura 27 o confronto do resultado analítico com o experimental para regulação em regime permanente da tensão no PCC. O resultado obtido a partir do modelo proposto ficou muito próximo dos resultados experimentais, validando o modelo.

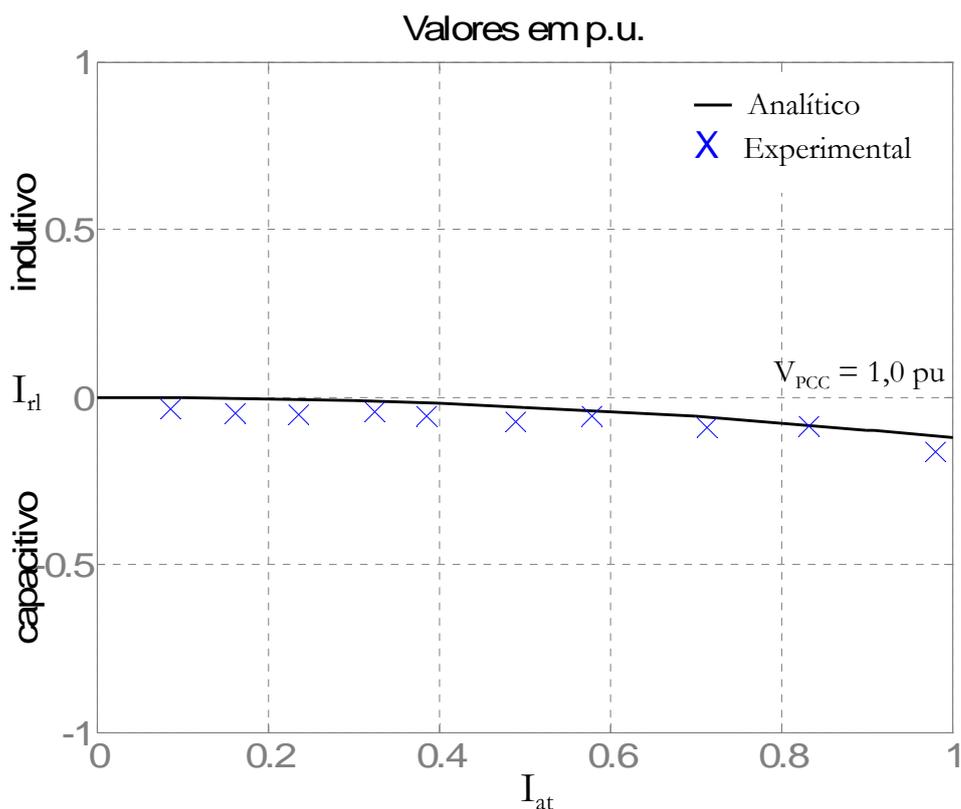


Figura 27 – Confronto do resultado analítico com o experimental para regulação em regime permanente.

3.4 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi proposta uma forma de modelagem do STATCOM, representado por uma fonte de tensão em regime permanente para cálculo do seu dimensionamento. Levantou-se a equação de variação de tensão no PCC em função da variação tanto na carga quanto na fonte e, a partir daí, mostra-se como dimensionar o STATCOM para cada caso. Os resultados apresentados mostram que, em regime permanente, o STATCOM consegue manter a tensão no PCC em um valor desejado (1,0 pu) para valores diferentes de carga e quando há variação na tensão da fonte

Outra análise importante foi o estudo de sensibilidade da tensão no PCC em função da variação de alguns parâmetros da rede, principalmente a variação da tensão na fonte.

Capítulo 4

Modelo em Regime Dinâmico

Neste capítulo será deduzido um modelo do STATCOM para o regime dinâmico. Primeiramente, será apresentado o modelo do STATCOM no domínio do tempo, utilizando-se a transformada de Park. Posteriormente será obtido o modelo em espaço de estados, a partir do modelo analítico nas coordenadas $d-q$. A partir deste modelo, serão obtidas as funções de transferência do STATCOM. Por fim, o modelo será validado através do confronto da simulação no domínio do tempo, utilizando-se o *software* PSCAD, com a simulação no domínio da frequência.

4.1 Transformada de Park

Na Figura 28, a representação vetorial pode ser estendida através da introdução de um novo sistema de coordenadas ortogonais girantes, em que cada vetor é descrito através de componentes d , q e 0 . Este novo eixo $d-q-0$ gira em uma frequência ω , normalmente igual à frequência da rede. Essa transformada de vetores das coordenadas $a-b-c$ para $d-q-0$ é chamada de Transformada de Park. Como o STATCOM que será modelado será a 3 fios, não haverá corrente de seqüência zero, logo podemos suprimir a componente “0”. A transformação de variáveis de fase $a-b-c$ para $d-q$ é dado por:

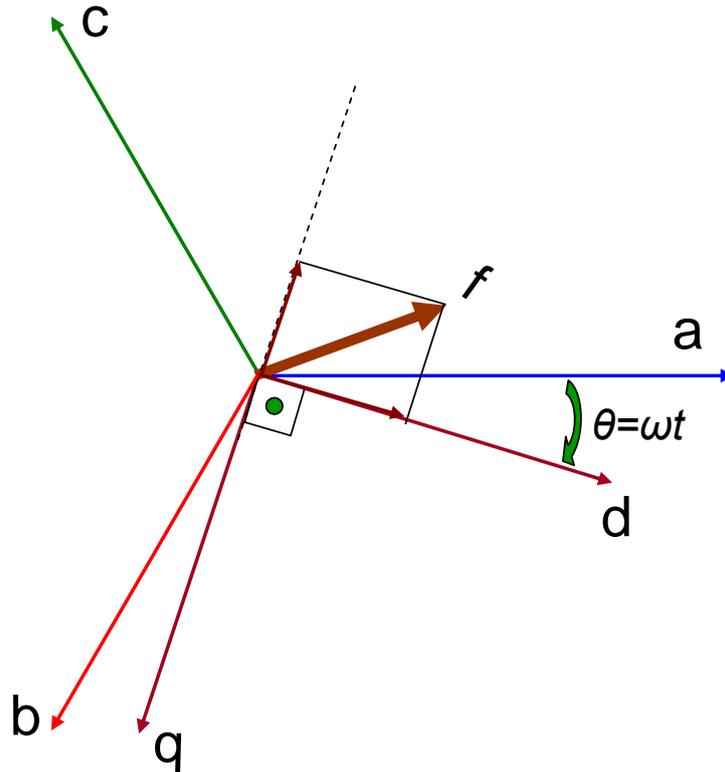


Figura 28 – Eixo de coordenadas d-q em relação às coordenadas abc.

$$\vec{f}_{qd} = [P] \cdot \vec{f}_{abc}$$

(4.1)

onde,

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta - 2\pi/3 & \cos \theta + 2\pi/3 \\ \sin \theta & \sin \theta - 2\pi/3 & \sin \theta + 2\pi/3 \end{bmatrix}$$

(4.2)

e

$$\vec{f}_{abc} = [\hat{P}] \cdot \vec{f}_{qd}$$

(4.3)

onde,

$$[\hat{P}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos \theta - 2\pi/3 & \sin \theta - 2\pi/3 \\ \cos \theta + 2\pi/3 & \sin \theta + 2\pi/3 \end{bmatrix}$$

(4.4)

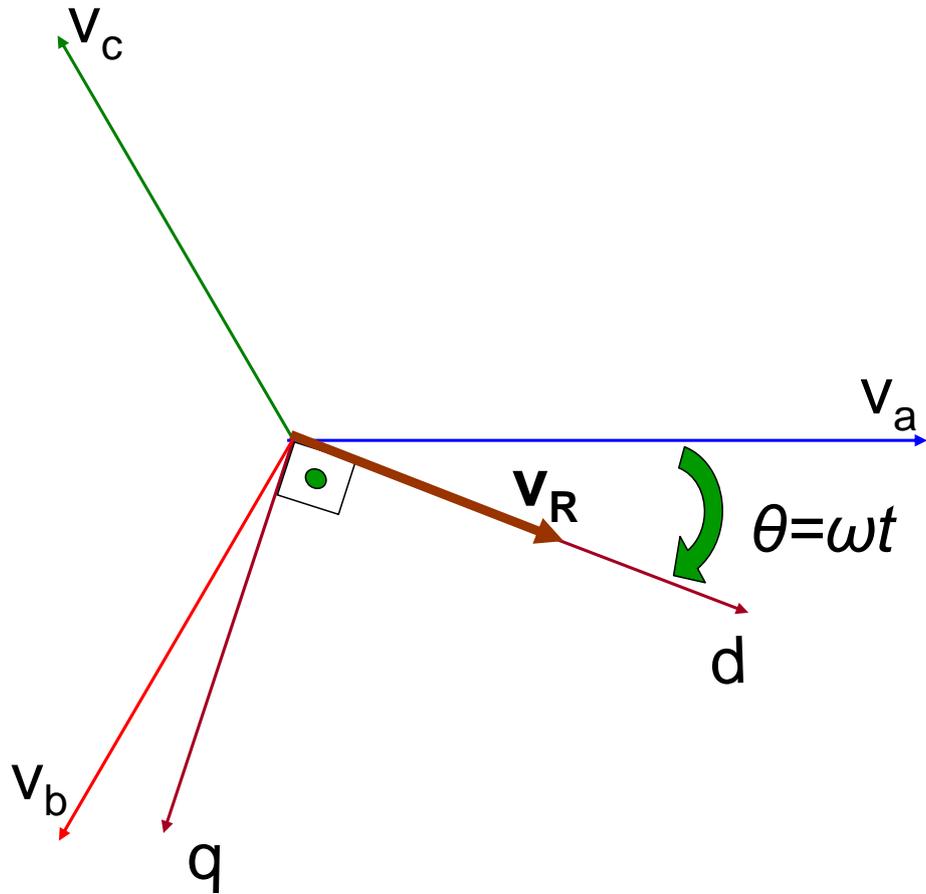


Figura 29 – Representação do vetor v_R no eixo d - q .

Se no lugar do vetor f considerarmos um vetor tensão genérico v_R como mostrado na Figura 29, podemos fazer com que o eixo d seja sempre coincidente este vetor v_R e em quadratura com o eixo q . Neste caso temos:

$$\begin{bmatrix} v_{Rq} \\ v_{Rd} \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} v_{Ra} \\ v_{Rb} \\ v_{Rc} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

sendo que:

$$\begin{cases} v_{Ra} = V_R \cdot \sin(\omega t) \\ v_{Rb} = V_R \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ v_{Rc} = V_R \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases}$$

logo:

$$\begin{bmatrix} v_{Rq} \\ v_{Rd} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta - 2\pi/3 & \cos\theta + 2\pi/3 \\ \sin\theta & \sin\theta - 2\pi/3 & \sin\theta + 2\pi/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \cdot \sin\omega t \\ V_R \cdot \sin\omega t - 2\pi/3 \\ V_R \cdot \sin\omega t + 2\pi/3 \end{bmatrix}, \quad \theta = \omega t$$

$$\begin{bmatrix} v_{Rq} \\ v_{Rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_R \end{bmatrix} \quad \therefore \quad (4.6)$$

Se inserirmos na Figura 29 um vetor corrente genérico i_R , como mostrado na Figura 30, podemos decompô-lo em duas correntes independentes:

- i_{Rd} representando a componente ativa da corrente i_R visto que esta sempre estará em fase com o vetor tensão v_R
- i_{Rq} representando a componente reativa da corrente i_R visto que esta sempre estará em quadratura ao o vetor tensão v_R .

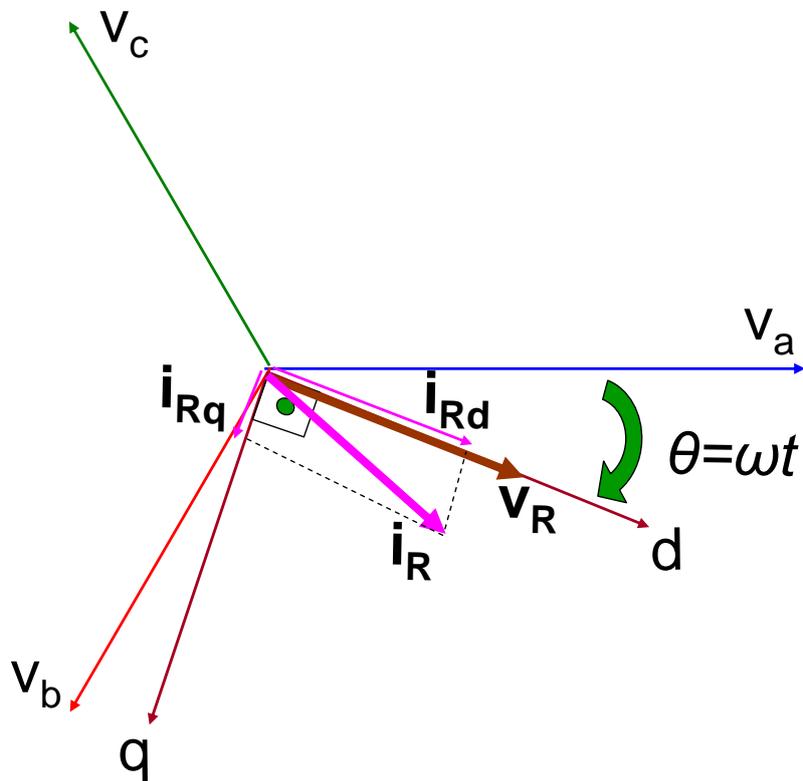


Figura 30 – Decomposição da corrente i_R nas coordenadas $d-q$.

Sob condições onde não há desbalanços nem harmônicos, os vetores de tensão e corrente no sistema $d-q$ têm módulos constantes.

4.2 Circuito equivalente do STATCOM e suas equações

Na Figura 31 é apresentada uma representação simplificada do STATCOM, incluindo um capacitor do lado CC, um conversor CC/CA, e uma indutância série entre o STATCOM e o PCC. Essa indutância representa a reatância de dispersão dos transformadores do STATCOM. O circuito possui também uma resistência em paralelo com o capacitor CC representando as perdas de chaveamento do conversor, e resistências em série com a reatância de dispersão representando as perdas nos transformadores.

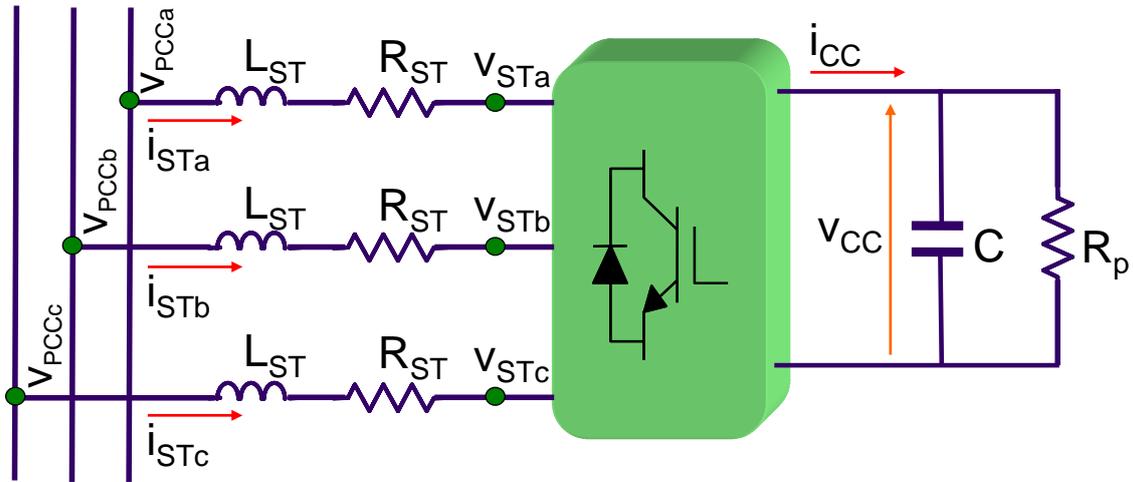


Figura 31 – Circuito equivalente do STATCOM.

Em termos das variáveis instantâneas apresentadas na Figura 31, e com a ajuda da transformada de Park, podemos derivar:

$$\begin{bmatrix} v_{PCCa} \\ v_{PCCb} \\ v_{PCCc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{STa} \\ v_{STb} \\ v_{STc} \end{bmatrix} = L_{ST} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{STa} \\ i_{STb} \\ i_{STc} \end{bmatrix} + R_{ST} \cdot \begin{bmatrix} i_{STa} \\ i_{STb} \\ i_{STc} \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

e

$$\begin{cases} v_{PCCa} = V_{PCC} \cdot \sin(\omega t) \\ v_{PCCb} = V_{PCC} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ v_{PCCc} = V_{PCC} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases}, \quad \begin{cases} v_{STa} = V_{ST} \cdot \sin(\omega t + \delta) \\ v_{STb} = V_{ST} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3 + \delta) \\ v_{STc} = V_{ST} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \end{cases}$$

O ângulo δ é a defasagem entre a tensão no PCC e a tensão de saída do STATCOM. Esse ângulo é chamado de ângulo de potência do STATCOM, pois ele é

responsável pela carga ou descarga no capacitor CC. Como a tensão CA no STATCOM é proporcional à tensão CC é a variação desse ângulo que controlará a tensão CA de saída do STATCOM, ou seja, v_{ST} . Isso foi demonstrado no Capítulo 1, através da representação gráfica na Figura 3.

A partir de (4.7), podemos escrever:

$$[\hat{P}] \begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} - [\hat{P}] \begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = L_{ST} \cdot \frac{d}{dt} \left([\hat{P}] \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \right) + R_{ST} \cdot [\hat{P}] \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Para facilitar o desenvolvimento de (4.8), será adotado $s = \frac{d}{dt}$, $K = \frac{2\pi}{3}$ e $\theta = \omega t$.

Assim,

$$\begin{aligned} [\hat{P}] \begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} - [\hat{P}] \begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} &= L_{ST} \cdot s \left(\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \right) + R_{ST} \cdot [\hat{P}] \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \\ &= L_{ST} \cdot \left(\omega \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\sin(\theta - K) & \cos(\theta - K) \\ -\sin(\theta + K) & \cos(\theta + K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + [\hat{P}] \cdot s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \right) + R_{ST} \cdot [\hat{P}] \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Multiplicando ambos os lados por [P]:

$$\begin{aligned} [P] \cdot [\hat{P}] \begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} - [P] \cdot [\hat{P}] \begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} &= [P] \cdot L_{ST} \cdot \left(\omega \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\sin(\theta - K) & \cos(\theta - K) \\ -\sin(\theta + K) & \cos(\theta + K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + [\hat{P}] \cdot s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \right) + \\ &+ [P] \cdot R_{ST} \cdot [\hat{P}] \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Aplicando cálculos matriciais, e sabendo que $[P] \cdot [\hat{P}] = [I]$, temos que:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} &= L_{ST} \cdot \left(\omega \cdot \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - K) & \cos(\theta + K) \\ \sin \theta & \sin(\theta - K) & \sin(\theta + K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\sin(\theta - K) & \cos(\theta - K) \\ -\sin(\theta + K) & \cos(\theta + K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + \right. \\ &\left. + s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \right) + R_{ST} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

Calculando a multiplicação das matrizes intermediárias:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - K) & \cos(\theta + K) \\ \sin \theta & \sin(\theta - K) & \sin(\theta + K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta \\ -\sin(\theta - K) & \cos(\theta - K) \\ -\sin(\theta + K) & \cos(\theta + K) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{2} \\ -\frac{3}{2} & 0 \end{bmatrix},$$

Podemos escrever:

$$\begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = L_{ST} \cdot \left(\omega \cdot \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{2} \\ -\frac{3}{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} \right) + R_{ST} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix},$$

e

$$\begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = \omega \cdot L_{ST} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + L_{ST} \cdot s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + R_{ST} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix}.$$

Reescrevendo:

$$\begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & L_{ST} \\ -L_{ST} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + L_{ST} \cdot s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + R_{ST} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Como explicado anteriormente, podemos escolher que o vetor v_{PCC} seja coincidente com o eixo d e fique em quadratura com o eixo q . Logo, a transformação desse vetor para as coordenadas d - q pode ser calculado da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} v_{PCCa} \\ v_{PCCb} \\ v_{PCCc} \end{bmatrix}, \quad \text{onde} \quad \begin{cases} v_{PCCa} = V_{PCC} \cdot \sin(\theta) \\ v_{PCCb} = V_{PCC} \cdot \sin(\theta - 2\pi/3), \\ v_{PCCc} = V_{PCC} \cdot \sin(\theta + 2\pi/3) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta - 2\pi/3 & \cos \theta + 2\pi/3 \\ \sin \theta & \sin \theta - 2\pi/3 & \sin \theta + 2\pi/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{PCC} \cdot \sin \theta \\ V_{PCC} \cdot \sin(\theta - 2\pi/3) \\ V_{PCC} \cdot \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} v_{PCCq} \\ v_{PCCd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{PCC} \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

e para a tensão no STATCOM:

$$\begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} v_{STa} \\ v_{STb} \\ v_{STc} \end{bmatrix}, \quad \text{onde} \quad \begin{cases} v_{STa} = V_{ST} \cdot \sin(\omega t + \delta) \\ v_{STb} = V_{ST} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3 + \delta), \\ v_{STc} = V_{ST} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta - 2\pi/3 & \cos\theta + 2\pi/3 \\ \sin\theta & \sin\theta - 2\pi/3 & \sin\theta + 2\pi/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ST} \cdot \sin(\theta + \delta) \\ V_{ST} \cdot \sin(\theta - 2\pi/3 + \delta) \\ V_{ST} \cdot \sin(\theta + 2\pi/3 + \delta) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ST} \cdot \sin \delta \\ V_{ST} \cdot \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Substituindo (4.10) e (4.11) em (4.9), temos:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{PCC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ST} \cdot \sin \delta \\ V_{ST} \cdot \cos \delta \end{bmatrix} = \omega \cdot \begin{bmatrix} 0 & L_{ST} \\ -L_{ST} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + L_{ST} \cdot s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + R_{ST} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Reestruturando (4.12) chegamos a:

$$s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_{ST} \cdot \sin \delta}{L_{ST}} \\ \frac{V_{PCC} - V_{ST} \cdot \cos \delta}{L_{ST}} \end{bmatrix}.$$

Simplificando:

$$s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\omega \\ \omega & -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_{ST} \cdot \sin \delta}{L_{ST}} \\ \frac{V_{PCC} - V_{ST} \cdot \cos \delta}{L_{ST}} \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

É necessário agora, deduzir a relação entre o lado CC e CA para completarmos o sistema de equações. A potência instantânea no lado CA e CC nos terminais do conversor pode ser escrita como:

$$p_{CAqd} = \frac{3}{2} (v_{STq} \cdot i_{STq} + v_{STd} \cdot i_{STd}), \quad (4.14)$$

e

$$p_{CC} = v_{CC} \cdot i_{CC}. \quad (4.15)$$

Igualando (4.15) com (4.14), temos:

$$v_{CC} \cdot i_{CC} = \frac{3}{2} (v_{STq} \cdot i_{STq} + v_{STd} \cdot i_{STd}). \quad (4.16)$$

Podemos obter ainda outra equação a partir do lado CC do conversor:

$$i_{CC} = C \cdot \frac{d}{dt} v_{CC} + \frac{v_{CC}}{R_p}. \quad (4.17)$$

Substituindo (4.17) em (4.16), obtemos:

$$v_{CC} \cdot \left(C \cdot s v_{CC} + \frac{v_{CC}}{R_p} \right) = \frac{3}{2} (v_{STq} \cdot i_{STq} + v_{STd} \cdot i_{STd}). \quad (4.18)$$

Sabendo que $v_{CC} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot V_{ST\phi\phi}$ apresentado em [8] e no Apêndice D, e que $V_{ST\phi\phi}$ é o valor *rms* da tensão fase-fase CA do STATCOM, temos que:

$v_{CC} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{3} V_{ST\phi n}$, pois $V_{ST\phi\phi} = \sqrt{3} V_{ST\phi n}$, e $V_{ST\phi n}$ é o valor *rms* da tensão fase-neutro CA do STATCOM.

Como $V_{ST\phi n} = \frac{V_{ST}}{\sqrt{2}}$, tendo em vista que V_{ST} foi definido em (4.7) como valor de pico da tensão fase-neutro CA do STATCOM, podemos definir então v_{CC} como:

$$v_{CC} = \frac{\pi}{2} \cdot V_{ST} \quad \text{ou} \quad (4.19)$$

$$V_{ST} = \frac{2}{\pi} \cdot v_{CC}.$$

A equação (4.11) pode ser reescrita com a utilização de (4.19) da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} v_{STq} \\ v_{STd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\pi} \cdot v_{CC} \cdot \sin \delta \\ \frac{2}{\pi} \cdot v_{CC} \cdot \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

Substituindo (4.20) em (4.18), podemos prosseguir com as seguintes simplificações:

$$v_{CC} \cdot \left(C \cdot sv_{CC} + \frac{v_{CC}}{R_p} \right) = \frac{3}{2} \left(\frac{2}{\pi} \cdot v_{CC} \cdot \sin \delta \cdot i_{STq} + \frac{2}{\pi} \cdot v_{CC} \cdot \cos \delta \cdot i_{STd} \right),$$

$$C \cdot sv_{CC} + \frac{v_{CC}}{R_p} = 3 \left(\frac{1}{\pi} \cdot \sin \delta \cdot i_{STq} + \frac{1}{\pi} \cdot \cos \delta \cdot i_{STd} \right),$$

$$sv_{CC} = \frac{3}{\pi \cdot C} \cdot \sin \delta \cdot i_{STq} + \frac{3}{\pi \cdot C} \cdot \cos \delta \cdot i_{STd} - \frac{v_{CC}}{C \cdot R_p}. \quad (4.21)$$

Ainda com a utilização de (4.19), podemos reescrever (4.13) da seguinte forma:

$$s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\omega \\ \omega & -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\frac{2}{\pi} \cdot v_{CC} \cdot \sin \delta}{L_{ST}} \\ \frac{V_{PCC} - \frac{2}{\pi} \cdot v_{CC} \cdot \cos \delta}{L_{ST}} \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

Finalmente, de (4.22) e (4.21), obtemos o seguinte sistema de equações diferenciais nas coordenadas d - q que regem o comportamento do STATCOM:

$$s \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \\ v_{CC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\omega & -\frac{2 \cdot \sin \delta}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \omega & -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\frac{2 \cdot \cos \delta}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \frac{3 \cdot \sin \delta}{\pi \cdot C} & \frac{3 \cdot \cos \delta}{\pi \cdot C} & -\frac{1}{C \cdot R_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{STq} \\ i_{STd} \\ v_{CC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{PCC}}{L_{ST}} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

A equação (4.23) é não-linear se δ for considerada como uma variável de entrada. Contudo, podemos obter uma linearização para pequenos desvios em torno de um ponto de operação a partir da linearização de (4.23):

$$\begin{aligned}
s \begin{bmatrix} \Delta i_{STq} \\ \Delta i_{STd} \\ \Delta v_{CC} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\omega & -\frac{2 \cdot \sin \delta_0}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \omega & -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\frac{2 \cdot \cos \delta_0}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \frac{3 \cdot \sin \delta_0}{\pi \cdot C} & \frac{3 \cdot \cos \delta_0}{\pi \cdot C} & -\frac{1}{C \cdot R_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_{STq} \\ \Delta i_{STd} \\ \Delta v_{CC} \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} -\frac{2 \cdot \cos \delta_0 \cdot v_{CC_0}}{\pi \cdot L_{ST}} \\ -\frac{2 \cdot \sin \delta_0 \cdot v_{CC_0}}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \frac{3}{\pi \cdot C} \cdot (i_{q_0} \cdot \cos \delta_0 - i_{d_0} \cdot \sin \delta_0) \end{bmatrix} \cdot [\Delta \delta]
\end{aligned} \tag{4.24}$$

As variáveis que apresentam o subscrito “₀” podem ser entendidas como seus valores no ponto de operação analisado.

4.3 Modelo do STATCOM em espaço de estados

A análise no espaço de estados envolve três tipos de variáveis na modelagem de sistemas dinâmicos: variáveis de entrada, variáveis de saída e variáveis de estado. Se considerarmos o modelo geral da equação em espaço de estados [33]:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x + D \cdot u \end{cases} \tag{4.25}$$

onde x são as variáveis de estado, u são os sinais de entrada, e y os sinais de saída, podemos relacionar (4.24) a (4.25) da seguinte forma:

$$x = \begin{bmatrix} \Delta i_{STq} \\ \Delta i_{STd} \\ \Delta v_{CC} \end{bmatrix}, u = \Delta \delta, A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\omega & -\frac{2 \cdot \sin \delta_0}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \omega & -\frac{R_{ST}}{L_{ST}} & -\frac{2 \cdot \cos \delta_0}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \frac{3 \cdot \sin \delta_0}{\pi \cdot C} & \frac{3 \cdot \cos \delta_0}{\pi \cdot C} & -\frac{1}{C \cdot R_p} \end{bmatrix}, \quad (4.26)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{2 \cdot \cos \delta_0 \cdot v_{CC_0}}{\pi \cdot L_{ST}} \\ -\frac{2 \cdot \sin \delta_0 \cdot v_{CC_0}}{\pi \cdot L_{ST}} \\ \frac{3}{\pi \cdot C} \cdot (i_{q_0} \cdot \cos \delta_0 - i_{d_0} \cdot \sin \delta_0) \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Também a partir de [33], a relação entre as funções de transferência e equações no espaço de estados, é dado por:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B + D. \quad (4.27)$$

De (4.26) com (4.27), podemos obter três funções de transferência:

$$\frac{\Delta I_q(s)}{\Delta \delta(s)}, \frac{\Delta I_d(s)}{\Delta \delta(s)} \text{ e } \frac{\Delta V_{CC}(s)}{\Delta \delta(s)}.$$

Podemos considerar, para facilitar a obtenção das funções de transferência, que as perdas de chaveamento do conversor sejam aproximadamente zero, ou seja, $R_p \approx \infty$, e que o STATCOM esteja em fase com o PCC, sem fluxo de potência ativa, ou seja $\delta_0 = 0$.

Será apresentado a seguir, a equação para cada função de transferência:

$$\frac{\Delta I_q(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{s^2(-2\pi^2 v_{CC_0} L_{ST} C) + s(-2\pi^2 v_{CC_0} R_{ST} C) + 6\pi\omega L_{ST} i_{q_0} - 12v_{CC_0}}{s^3(\pi^3 L_{ST}^2 C) + s^2(2\pi^3 L_{ST} R_{ST} C) + s(\pi^3 R_{ST}^2 C + \pi^3 \omega^2 L_{ST}^2 C + 6\pi L_{ST}) + 6\pi R_{ST}} \quad (4.28)$$

$$\frac{\Delta I_d(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{s(-2\pi\omega v_{CC_0} L_{ST} C - 6L_{ST} i_{q_0}) - 6R_{ST} i_{q_0}}{s^3(\pi^2 L_{ST}^2 C) + s^2(2\pi^2 L_{ST} R_{ST} C) + s(\pi^2 R_{ST}^2 C + \pi^2 \omega^2 L_{ST}^2 C + 6L_{ST}) + 6R_{ST}} \quad (4.29)$$

$$\frac{\Delta V_{CC}(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{s^2(3\pi L_{ST}^2 i_{q0}) + s(6\pi L_{ST} R_{ST} i_{q0}) + 3\pi R_{ST}^2 i_{q0} - 6\omega L_{ST} v_{CC0} + 3\pi \omega^2 L_{ST}^2 i_{q0}}{s^3(\pi^2 L_{ST}^2 C) + s^2(2\pi^2 L_{ST} R_{ST} C) + s(\pi^2 R_{ST}^2 C + \pi^2 \omega^2 L_{ST}^2 C + 6L_{ST}) + 6R_{ST}} \quad (4.30)$$

Se considerarmos ainda, para simplificação da obtenção dos pólos das funções de transferência, ou seja, obtenção das raízes dos denominadores das funções de transferência, que as perdas no transformador são nulas ($R_{ST} = 0$), podemos reescrever (4.28), (4.29) e (4.30) da seguinte forma:

$$\frac{\Delta I_q(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{s^2(-2\pi^2 v_{CC0} L_{ST} C) + 6\pi \omega L_{ST} i_{q0} - 12v_{CC0}}{s(s^2 \pi^2 L_{ST} C + \pi^2 \omega^2 L_{ST} C + 6)\pi L_{ST}}, \quad (4.31)$$

$$\frac{\Delta I_d(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{s(-2\pi \omega v_{CC0} C - 6i_{q0})}{s(s^2 \pi^2 L_{ST} C + \pi^2 \omega^2 L_{ST} C + 6)} e \quad (4.32)$$

$$\frac{\Delta V_{CC}(s)}{\Delta \delta(s)} = \frac{s^2(3\pi L_{ST} i_{q0}) - 6\omega v_{CC0} + 3\pi \omega^2 L_{ST} i_{q0}}{s(s^2 \pi^2 L_{ST} C + \pi^2 \omega^2 L_{ST} C + 6)}. \quad (4.33)$$

Os pólos calculados para as funções de transferência (4.31), (4.32) e (4.33) são:

$$p_1 = 0$$

$$p_{2,3} = \pm j \sqrt{\omega^2 + \frac{6}{\pi^2 L_{ST} C}} \quad [\text{rad/s}] \quad (4.34)$$

Nota-se que os pólos são dependentes da indutância de dispersão dos transformadores e do capacitor CC do conversor do STATCOM.

4.3.1 Análise paramétrica

Nesta seção será realizada uma análise paramétrica com o objetivo de mostrar como varia a parte imaginária (frequência) dos pólos das funções de transferência a partir da variação dos parâmetros L_{ST} , C , R_{ST} e R_p . Primeiramente, Será variado L_{ST} e C com a utilização de (4.34). Posteriormente, na Seção 4.4, será mostrada uma análise completa, onde serão obtidos os diagramas de Bode para as variáveis envolvidas na equação em espaço de estados do STATCOM (4.26). Para facilitar a visualização, nos gráficos a seguir, a escala no eixo y estará em Hz, ao invés de radianos por segundo.

Com a utilização de (4.34), o valor da capacitância C será fixado em três valores: $500\mu\text{F}$, $2000\mu\text{F}$ e $16000\mu\text{F}$. O valor da indutância L_{ST} do STATCOM, L_{ST} , será variada entre $100\mu\text{H}$ e 10mH para cada C , como mostrado na Figura 32, que para sua melhor visualização, está em escala semi-logarítmica.

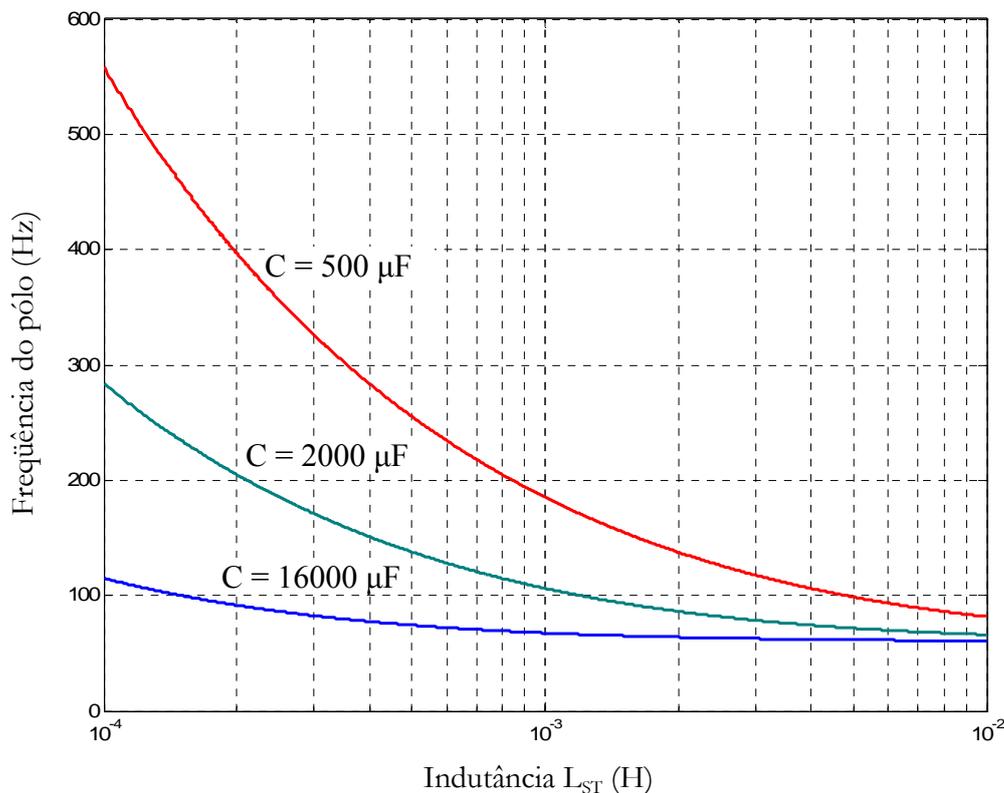


Figura 32 – Variação da frequência em função da variação da indutância L_{ST} do STATCOM.

Como demonstrado empiricamente em [17], para valores maiores de L_{ST} , menores serão as frequências das oscilações na resposta do STATCOM. Esse fato pode ser comprovado graficamente a partir da figura anterior. Conforme se aumenta o valor a indutância CA do STATCOM, diminui-se a parte imaginária dos pólos, ou seja, diminui-se a frequência de oscilação na resposta de I_d , I_q e V_{CC} .

Para análise da variação do valor da capacitância, utilizamos a definição de “constante de inércia” (similar ao usado em máquina síncrona) e definido em [8]. Esta constante de inércia τ_c , é definida como a razão entre a energia armazenada no capacitor na sua tensão nominal (quando a corrente CC vale zero) e a potência aparente do STATCOM:

$$\tau_c = \frac{E_{STATCOM}}{S_{STATCOM}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C \cdot v_{CC}^2}{S_{STATCOM}}. \quad (4.35)$$

Para conversores multi-pulso comutados na frequência fundamental, como é o caso deste trabalho, a tensão CC deve ser controlada para mudar o ponto de operação do STATCOM. O capacitor CC, sendo o elemento armazenador de energia, representa então a inércia inicial vista pelo controle para alterar seu ponto de operação. Capacitores menores resultam em respostas do STATCOM mais rápidas, mas as ondulações de tensão sobre este capacitor CC podem se tornar bastantes altas. Além disso, é natural observar que a indutância de comutação do lado CA e a capacitância CC do STATCOM, podem formar um circuito ressonante. Oliveira, Jiang e Ekström [35] mostraram que um cálculo adequado do capacitor do lado CC do STATCOM pode evitar ressonâncias em frequências indesejáveis (normalmente múltiplos inteiros da frequência fundamental) que podem causar instabilidades.

Substituindo (4.35) em (4.34), obtemos a seguinte equação:

$$p_{2,3} = \pm j \sqrt{\omega^2 + \frac{3}{\pi^2 \cdot L_{ST} \cdot \frac{\tau_c \cdot S_{STATCOM}}{v_{CC}^2}}}. \quad (4.36)$$

Fixando L_{ST} em três valores (200 μ H, 600 μ H e 2 mH) e variando-se τ_c entre 1 ms até 100 ms para cada valor de L_{ST} , obteve-se a variação da parte imaginária do pólo do sistema, conforme mostrado na Figura 33:

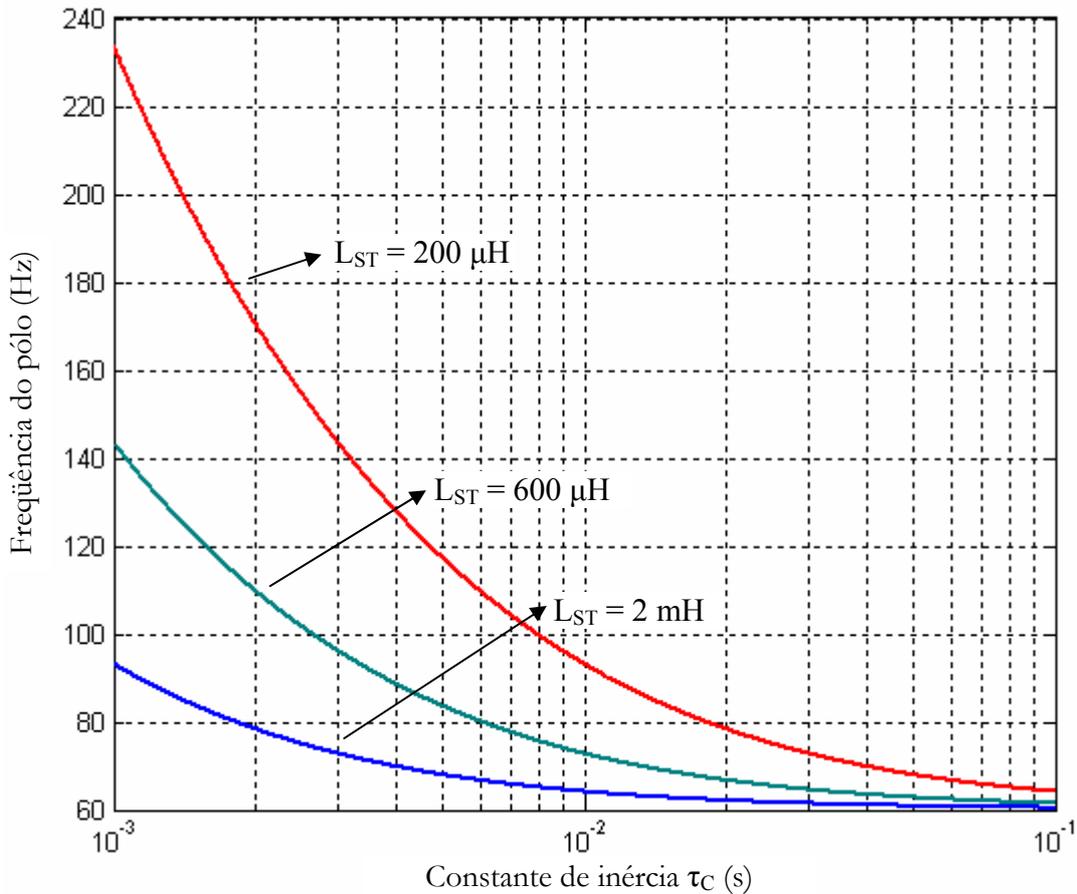


Figura 33 – Variação da frequência em função da variação da constante de tempo do capacitor CC do STATCOM.

Analisando a Figura 33, nota-se que, conforme se diminui a constante de tempo do capacitor CC (τ_C), ou seja, o próprio valor da capacitância, aumenta-se a frequência das oscilações nas respostas de I_d , I_q e V_{CC} , conforme explicado anteriormente.

4.4 Validação: Simulação no Domínio da Frequência *versus* Domínio do Tempo

Para validarmos o modelo matemático obtido na seção 4.3, através das funções de transferência (4.31), (4.32) e (4.33), serão seguidos os seguintes passos.

- Será calculada a frequência de ressonância do STATCOM a partir dos valores reais do STATCOM experimental.

- Serão obtidos os diagramas de Bode para uma melhor visualização da ressonância na frequência calculada.
- O sistema apresentado na Figura 31 será simulado no domínio do tempo e no domínio da frequência. Primeiramente, o ângulo de potência do STATCOM (δ) será excitado com uma onda senoidal com frequência abaixo da frequência de ressonância, variando entre ± 2 graus em relação ao PCC. Posteriormente o ângulo de potência do STATCOM será excitado com uma onda senoidal com frequência igual à frequência de ressonância, onde será mostrado que o STATCOM simulado no domínio do tempo irá entrar em ressonância, ou seja, o valor de sua saída tenderá a crescer indefinidamente. Os gráficos resultantes das simulações serão desenhados de forma sobrepostas, mostrando que o modelo obtido por meio de funções de transferência representa o modelo no domínio do tempo.

4.4.1 Cálculo da frequência de ressonância do STATCOM

O STATCOM experimental, apresentado detalhadamente em [17], possui os seguintes valores de L_{ST} , C :

$$L_{ST} = 2,0 \text{ mH}$$

$$C = 16000 \mu F$$

e opera em uma frequência de $\omega = 2 \times \pi \times 60 = 377 \text{ rad/s}$.

Para os valores apresentados, a partir de (4.34) podemos calcular os pólos das funções de transferência:

$$P_{2,3} = \pm j \sqrt{377^2 + \frac{6}{\pi^2 \cdot 2 \times 10^{-3} \cdot 16000 \times 10^{-6}}}$$

$$P_{2,3} = \pm j401,4 \text{ rad/s}$$

A frequência de ressonância do pólo vale 63,9 Hz.

4.4.2 Obtenção dos diagramas de Bode

Um diagrama de Bode consiste em dois gráficos. O primeiro diz respeito ao logaritmo do módulo da função de transferência senoidal. O segundo gráfico representa o ângulo de fase. Ambos os gráficos são construídos em função da frequência em uma escala logarítmica.

Na Figura 34 e Figura 35 são apresentados os diagramas de Bode das funções de transferência (4.31) e (4.33). Nota-se que a frequência de ressonância (pólo) calculada no item anterior no valor de 63,9 Hz é obtida nos diagramas de Bode. O diagrama da Figura 34 mostra um zero em 21,9 Hz, o que nos diz que se a entrada desta função for uma senóide de frequência 21,9 Hz, a saída tenderá a zero. Uma obtenção similar deste pólo e zero pode ser encontrado em [36].

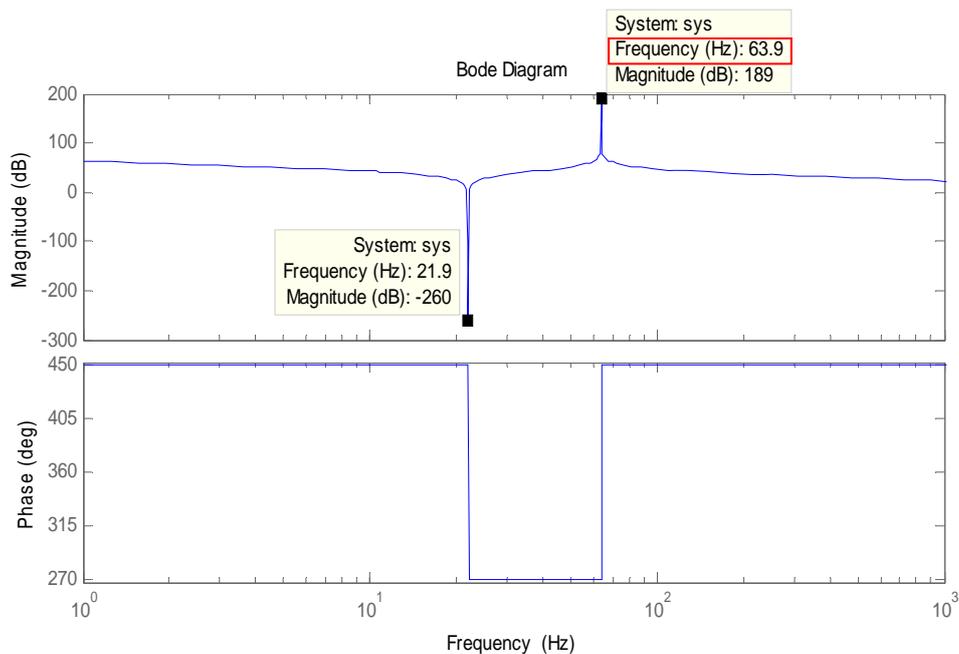


Figura 34 – Diagrama de Bode da função de transferência $\Delta I_q(s)/\Delta\delta(s)$.

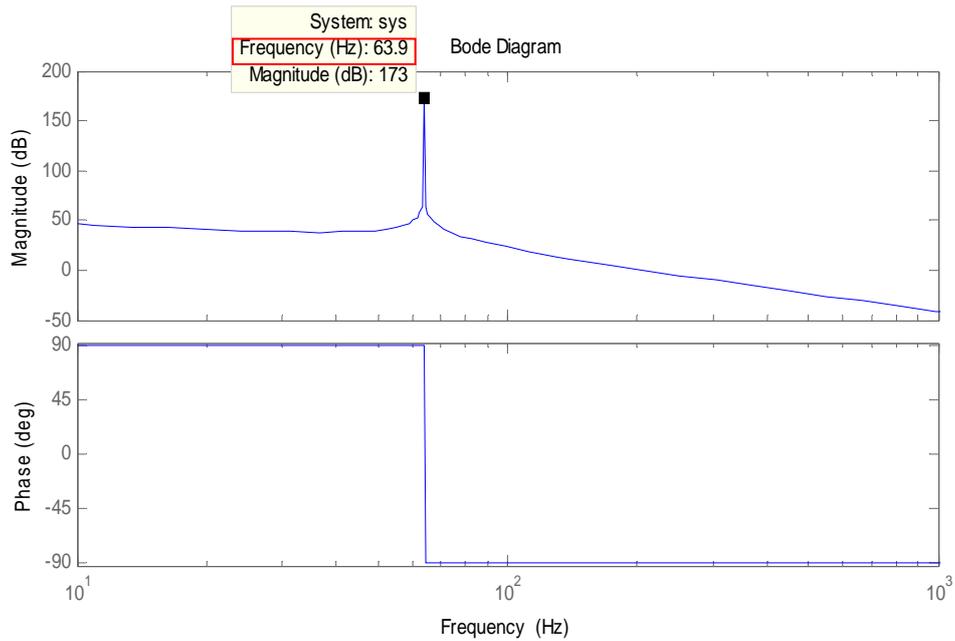


Figura 35 – Diagrama de Bode da função de transferência $\Delta V_{CC}(s)/\Delta\delta(s)$

4.4.2.1 Obtenção dos Diagramas de Bode com variação paramétrica

Nesta seção será realizada uma análise paramétrica com o objetivo de mostrar como varia a resposta em frequência das funções de transferência a partir da variação dos parâmetros L_{ST} , C , R_{ST} , e R_p . Será tomado como base, a equação em espaço de estados apresentada em (4.26) e a saída ΔI_{STq} .

Primeiramente, a resistência de perdas do STATCOM será variada, considerando os outros parâmetros com seus valores nominais. Os valores calculados para R_p , tiveram como base as perdas típicas de um STATCOM. Os mais eficientes estão com perdas na faixa de 1 a 2% em relação à sua potência nominal, enquanto que os menos eficientes estão na faixa de 5 a 6%. Com isso, foi atribuído os seguintes valores de perdas: 0%, 1%, 3%, 5% e 10%. A partir daí, foi obtido o diagrama de Bode mostrado na Figura 36. Nota-se que as perdas no STATCOM, ou seja, R_p , não influenciam na ressonância do STATCOM, nem amortecem as mesmas. Observa-se apenas um pequeno amortecimento no zero da função de transferência.

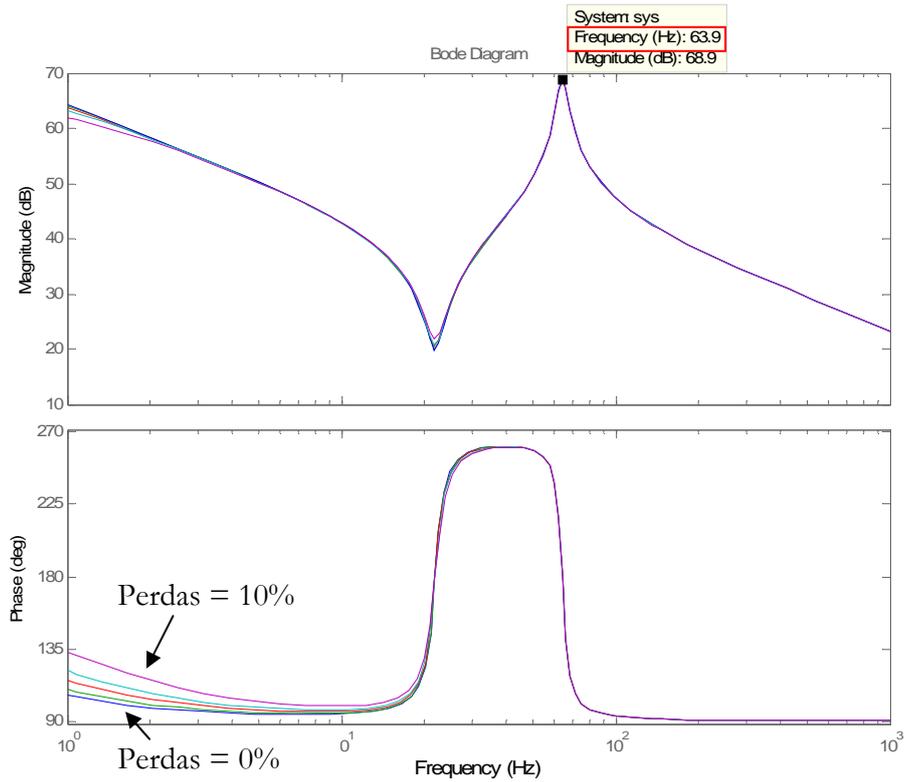


Figura 36 – Diagrama de Bode para variação de R_p .

Para verificar se a retirada da resistência de perdas nos transformadores, R_{ST} , alteraria o valor da frequência de ressonância, foram traçados o diagrama de Bode da função de transferência (4.28) com os seguintes valores de R_{ST} : 0 m Ω , 30 m Ω (aproximadamente o valor da resistência de perdas do transformador experimental, calculado em [17]), 100 m Ω e 300 m Ω . A frequência de ressonância não alterou de valor, e como já era de se esperar, a ressonância sofreu um amortecimento.

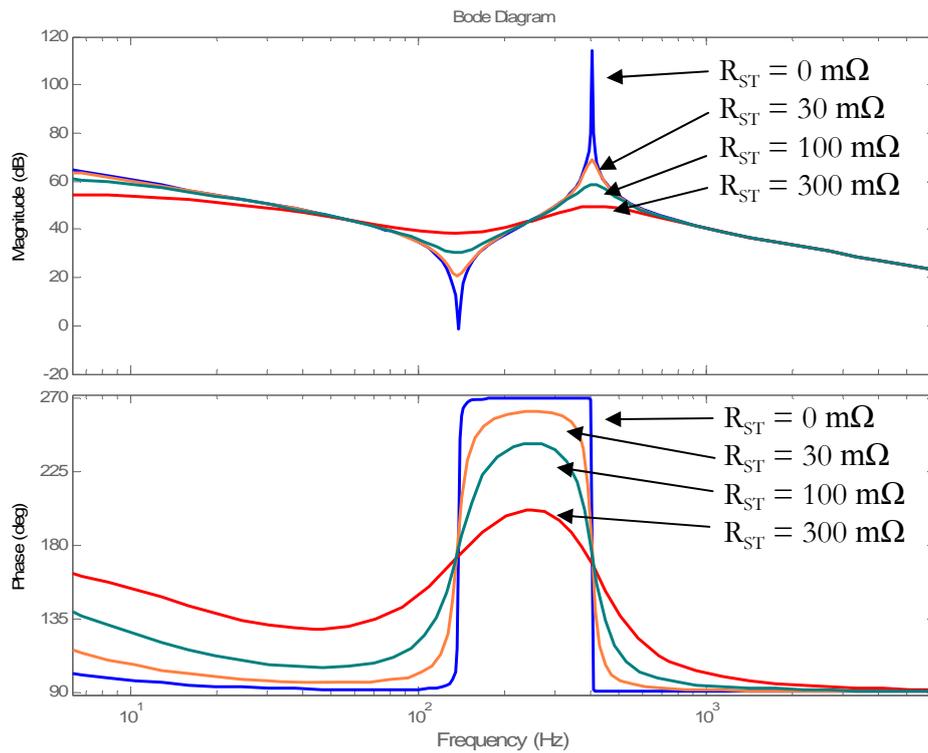


Figura 37 - Diagrama de Bode para variação de R_{ST} .

Este amortecimento pode ser visualizado também no diagrama do lugar das raízes da função de transferência $\Delta I_q(s)/\Delta \delta(s)$ para três valores de R_{ST} diferentes, apresentado na Figura 38. Nota-se que os pólos e zeros se deslocam para a esquerda, aumentando seu módulo no eixo real, ligado diretamente ao amortecimento, mas suas projeções continuam constantes no eixo imaginário, ligado diretamente à frequência de ressonância.

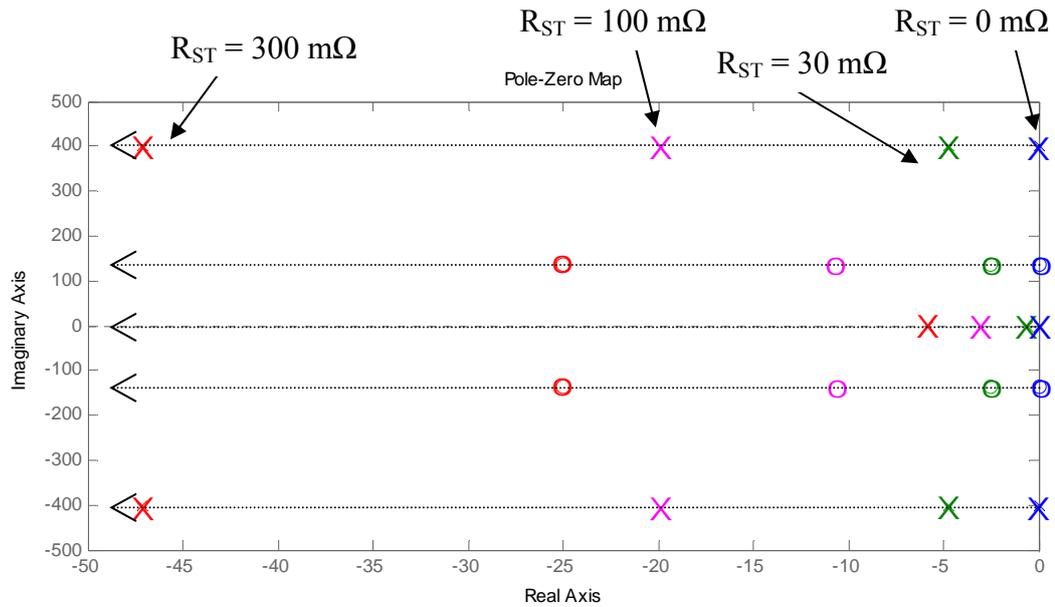


Figura 38 – Lugar das raízes da função de transferência $\Delta I_q(s) / \Delta \delta(s)$ para variação de R_{ST} .

Será apresentado agora o diagrama de Bode para variação dos seguintes valores de L_{ST} : 200 μH , 600 μH e 2 mH (valor experimental). O resultado pode ser visualizado na Figura 39. Nota-se que, conforme se diminui o valor de L_{ST} , aumenta-se a frequência de ressonância do STATCOM, ou seja, aumentam-se as oscilações nas variáveis de saída.

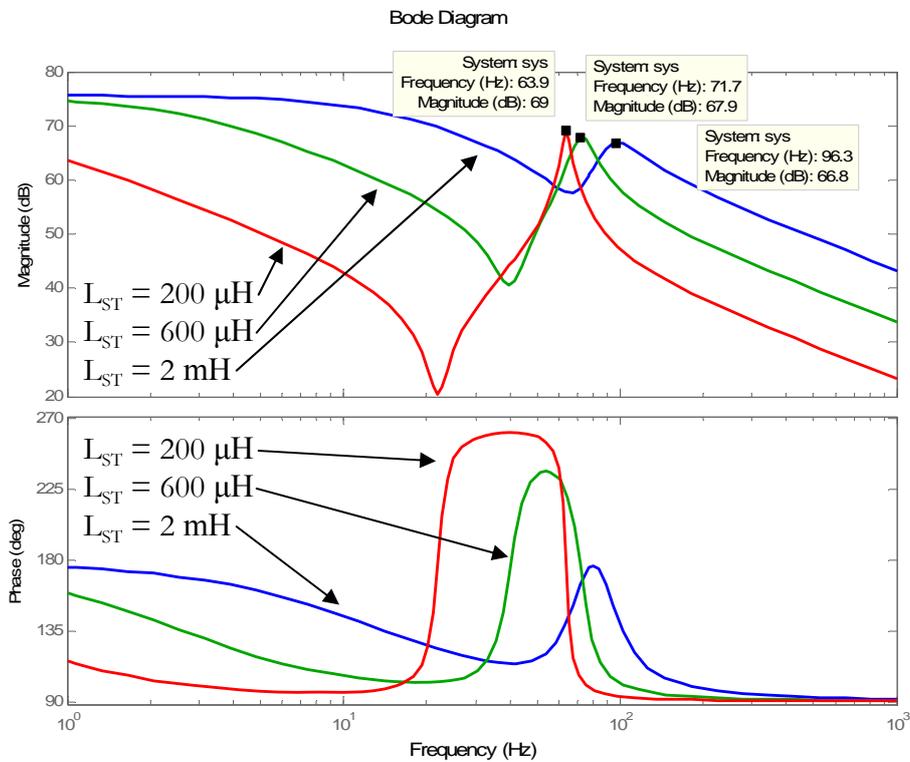


Figura 39 - Diagrama de Bode para variação de L_{ST} .

Por último, será apresentado o diagrama de Bode para variação da capacitância CC do STATCOM. Os valores escolhidos para C são: 500 μF , 2000 μF e 16000 μF (valor experimental). A Figura 40 apresenta o resultado deste estudo. Mostra-se que, conforme diminui-se o valor da capacitância, a frequência do pólo aumenta, aumentando assim as ondulações nas respostas de I_d , I_q e V_{CC} .

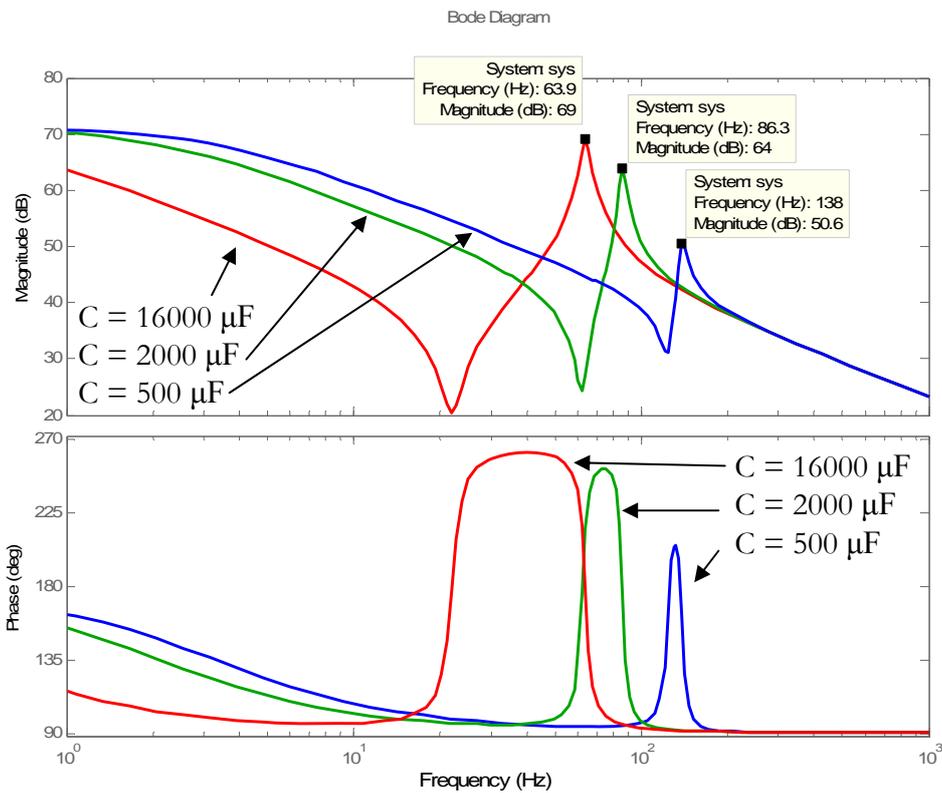


Figura 40 – Diagrama de Bode para variação de C.

4.4.3 Confronto das simulações

Será apresentado o confronto entre as simulações no domínio do tempo com as simulações no domínio da frequência.

Primeiramente, foi escolhido uma frequência (f_s) de 5 Hz para o sinal de entrada por estar bem abaixo da frequência de ressonância e com amplitude de ± 2 graus, dado por:

$$\delta(t) = 2 \times \sin(2\pi \times 5 \times t). \quad (4.37)$$

O valor da resistência de perdas dos transformadores foi considerado aproximadamente zero para mostrar que a ressonância tenderá a permanecer, ou seja, não será amortecida. Na Figura 41 é apresentada a corrente i_q simulada no domínio do tempo com o PSCAD (em cinza) sobreposta à curva calculada a partir da função de transferência (em preto).

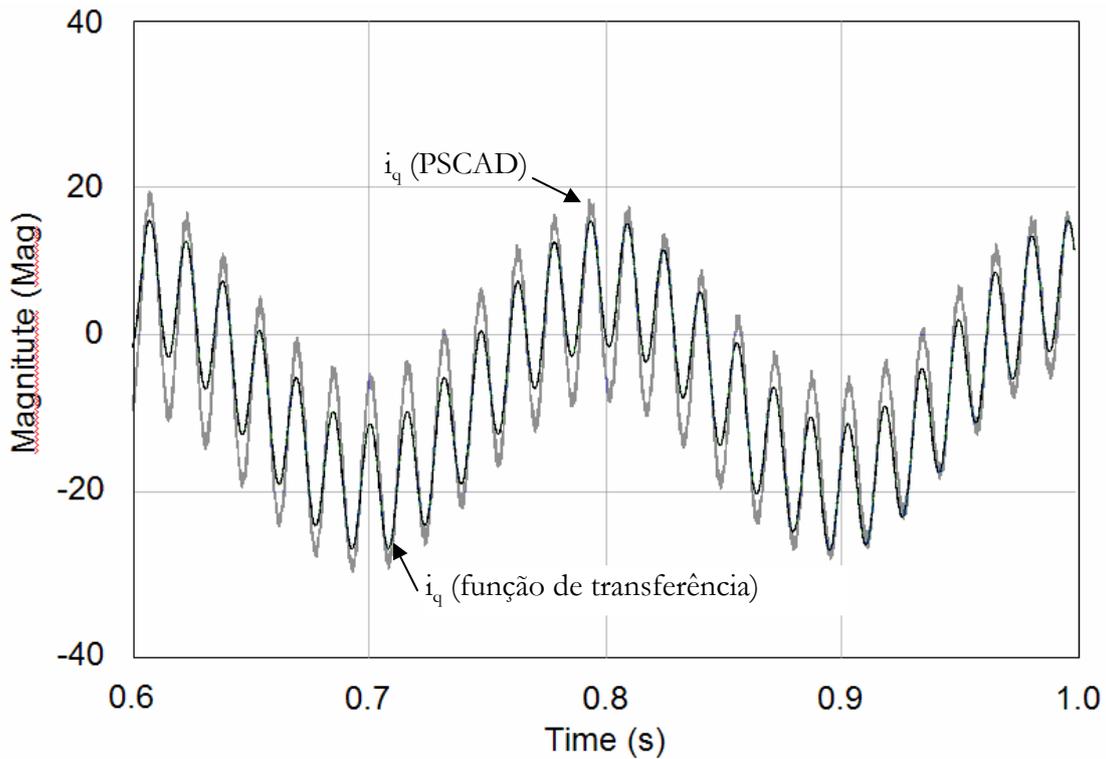


Figura 41 – Corrente i_q simulada no PSCAD (cinza) e através da função de transferência (preto) para $f_s = 5$ Hz e $R_{ST} = 0$.

A diferença entre as amplitudes das correntes pode ter sido causada pelas simplificações adotadas no cálculo das funções de transferência e na não modelagem da indutância de magnetização no equacionamento, modeladas apenas no PSCAD.

Para o valor da resistência de perdas dos transformadores será utilizado o valor aproximado do STATCOM experimental, $R_{ST} = 30$ m Ω . Neste caso serão apresentadas três figuras, uma para i_q (Figura 42), a segunda para i_d (Figura 43) e por último, para v_{CC} (Figura 44). Novamente as curvas foram simuladas no PSCAD (em cinza) e a partir da função de transferência (em preto). Nota-se que nas três curvas, a presença da resistência amortece a oscilação causada pela ressonância.

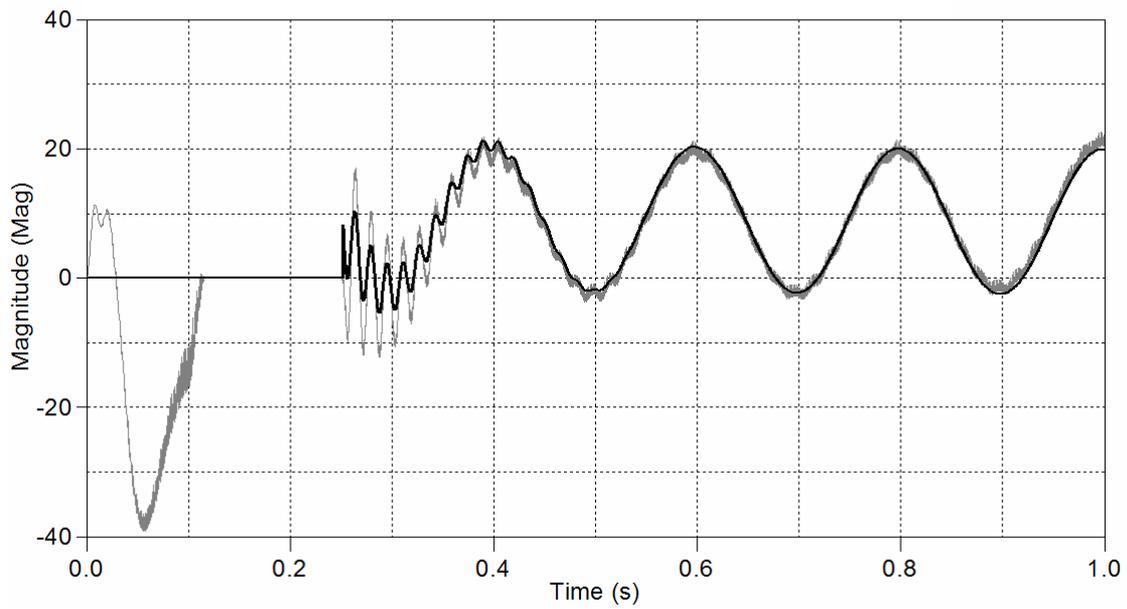


Figura 42 – Corrente i_q simulada no domínio do tempo (cinza) e através da função de transferência (preto) para $f_\delta = 5$ Hz e $R_{ST} = 30$ m Ω .

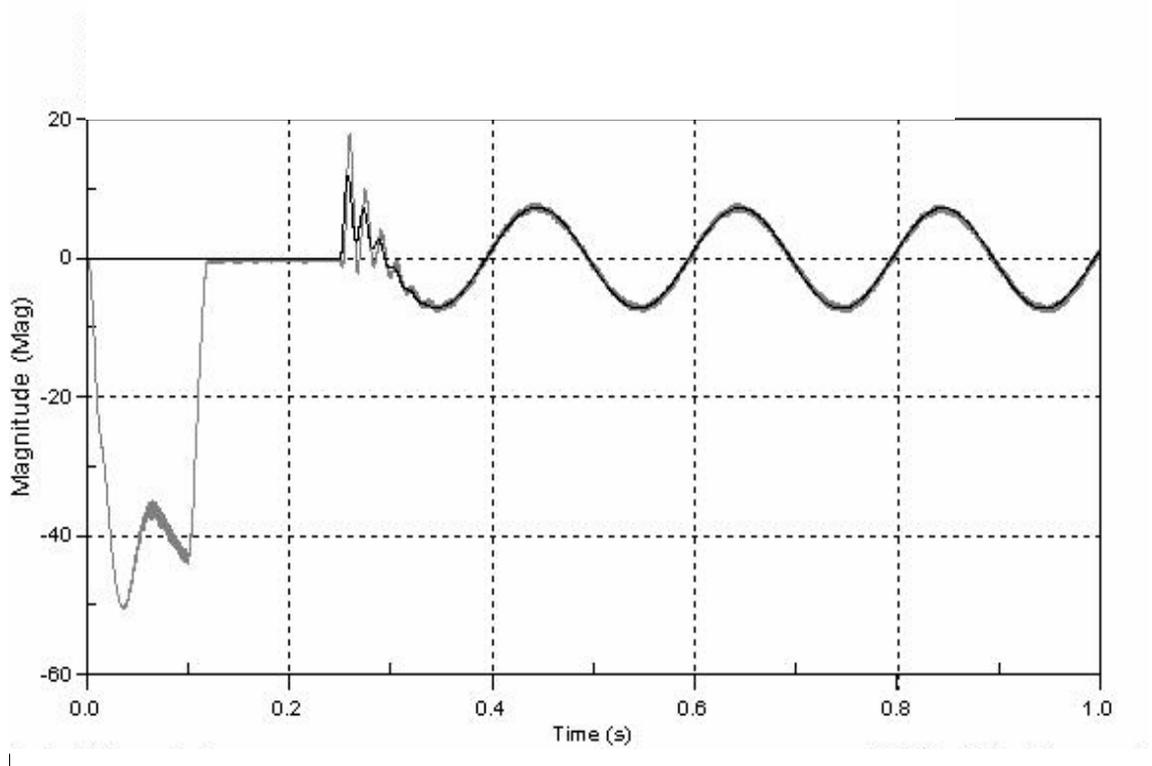


Figura 43 – Corrente i_d simulada no domínio do tempo (cinza) e através da função de transferência (preto) para $f_\delta = 5$ Hz e $R_{ST} = 30$ m Ω .

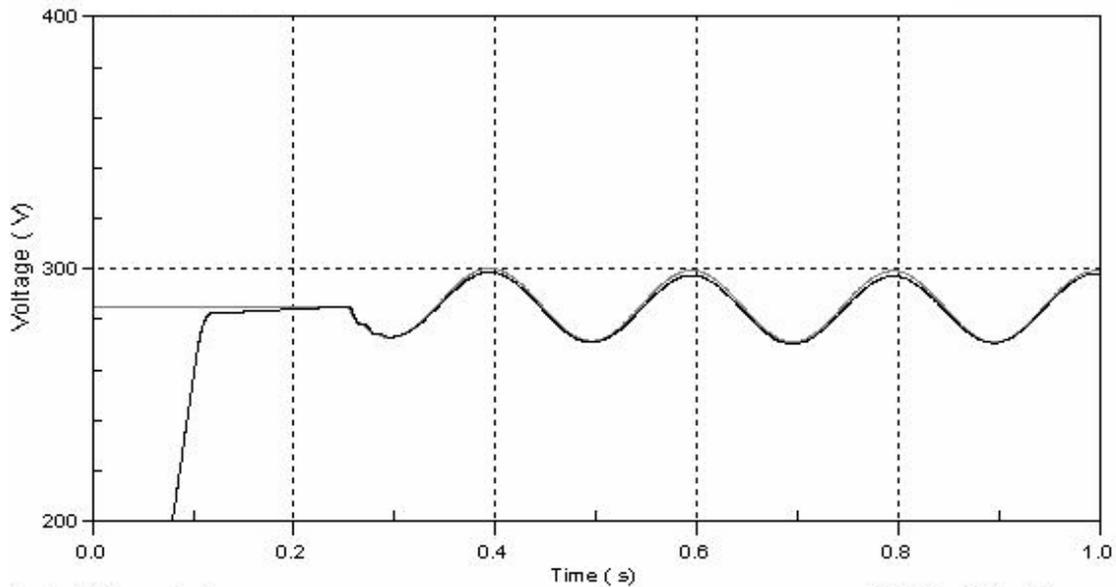


Figura 44 – Tensão v_{CC} simulada no domínio do tempo (preto) e através da função de transferência (cinza) para $f_s = 5$ Hz e $R_{ST} = 30$ m Ω .

Por último, é apresentada na Figura 45 a resposta do STATCOM no domínio do tempo quando o sinal de entrada $\delta(t)$ é uma onda senoidal com frequência igual à frequência de ressonância, como mostrado na equação (4.38):

$$\delta(t) = 2x \sin(2\pi \times 63,9 \times t). \quad (4.38)$$

A curva da corrente i_q tende rapidamente a infinito, comprovando que com o modelo do STATCOM no domínio da frequência, foi possível calcular a frequência de ressonância a partir das funções de transferência, comprovar a ressonância na simulação no domínio do tempo, validando assim, o modelo analítico obtido do STATCOM.

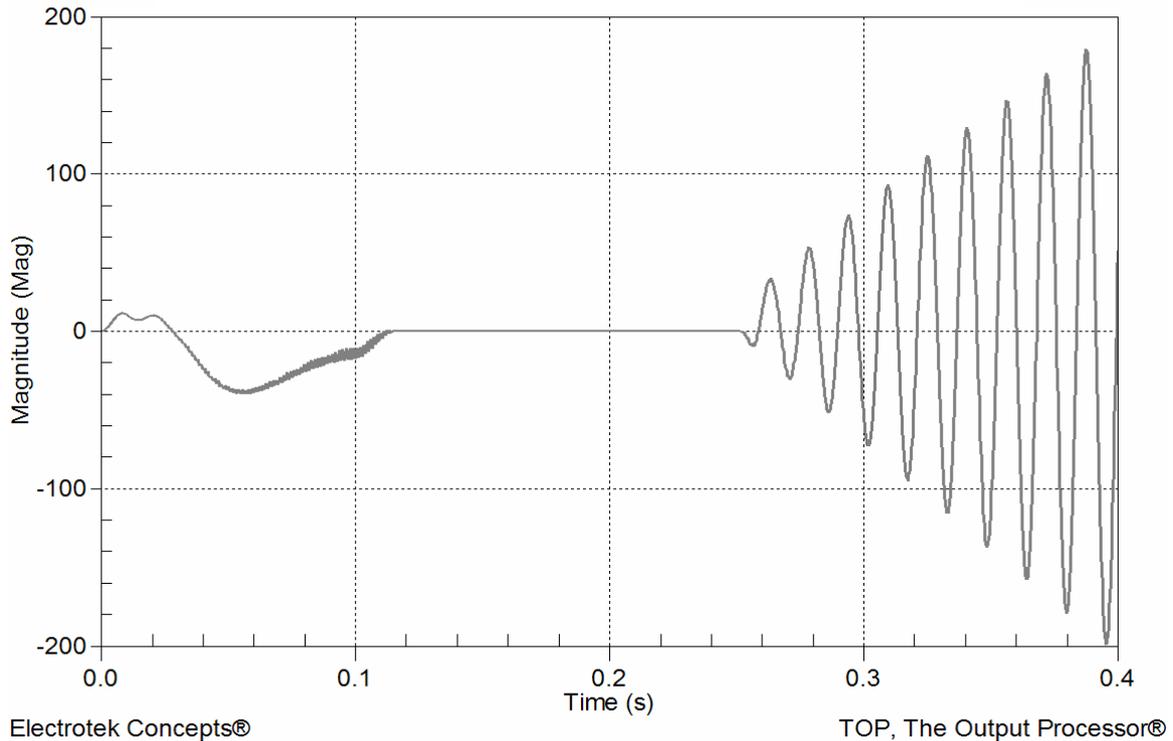


Figura 45 – Corrente i_q simulada no domínio do tempo para $f_s = 63,9$ Hz.

4.5 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentado um modelo e a análise do STATCOM para o regime dinâmico. Primeiramente, foi apresentado como foi obtido o modelo analítico no domínio do tempo do STATCOM, utilizando-se principalmente a transformada de PARK. Posteriormente, foi mostrado como foi possível obter o modelo em espaço de estados, a partir do modelo analítico nas coordenadas $d-q$, onde foi necessário linearizar o modelo em torno de um ponto de equilíbrio. Com a utilização de técnicas de controle moderno, foram obtidas as funções de transferência do STATCOM. A partir dessas funções, foi possível calcular os pólos do modelo do STATCOM, sendo obtida a frequência de ressonância, e foram traçados os diagramas de Bode, comprovando a ressonância calculada. Por fim, o modelo foi validado através do confronto da simulação no domínio do tempo com a simulação no domínio da frequência. As curvas obtidas em cada programa foram desenhadas de forma coincidente, onde foi possível observar a frequência de ressonância igual para cada simulação. Quando foi inserida a resistência de perda nos transformadores, essa ressonância foi rapidamente amortecida. O erro encontrado na amplitude pode estar ligado à não modelagem da corrente de magnetização e das simplificações feitas. A resposta

do STATCOM no domínio do tempo quando o sinal de entrada $\delta(t)$ é uma onda senoidal com frequência igual à frequência de ressonância tende rapidamente a infinito, comprovando a validade do modelo do STATCOM no domínio da frequência.

Capítulo 5

Conclusões Finais

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma análise em regime permanente e dinâmico do STATCOM. Foi feita uma breve apresentação do protótipo do STATCOM *quasi* 24-pulsos feito em laboratório, que foi a base para o desenvolvimento deste trabalho. Foi apresentada uma forma de modelagem para regime permanente visando principalmente o cálculo do seu dimensionamento. Por último foi mostrada um equacionamento para a análise em regime dinâmico do STATCOM. Essa análise através de funções de transferência foi validada através do confronto com simulações no domínio do tempo.

Foram apresentados os tipos de conversores que podem sintetizar o STATCOM. Foram mostradas as vantagens e desvantagens de cada um e o motivo da escolha do conversor *quasi* 24-pulsos para implementação em laboratório, que foi basicamente a baixa geração de harmônicos e relativamente fácil implementação. Foram apresentadas formas de ondas *quasi* 24-pulsos, seu espectro harmônico, sua Distorção Harmônica Total e a ligação dos transformadores YY e $Y\Delta$, afirmando assim sua excelente aplicabilidade. Foram apresentados detalhes elétricos e construtivos do projeto e a operação real do STATCOM experimental em regime permanente.

Para a modelagem do STATCOM em regime permanente para cálculo do seu dimensionamento, levantou-se a equação de variação de tensão no PCC em função da variação tanto na carga quanto na fonte. As curvas apresentadas ajudam a visualizar a variação da tensão no PCC em função das correntes ativa e reativa. O dimensionamento do STATCOM depende principalmente da reatância entre o PCC e o STATCOM, e da possibilidade de variação da tensão na fonte. Essa variação só ocorrerá se o sistema for fraco. Caso contrário, a fonte pode ser considerada com uma barra infinita, ou seja, um sistema forte. Os resultados apresentados mostram que, em regime permanente, o STATCOM consegue manter a tensão no PCC em um valor desejado (1,0 pu) para valores diferentes de carga e quando há variação na tensão da fonte. Inclusive, dependendo da

potência do STATCOM, o mesmo pode ser projetado para regular a tensão no PCC em qualquer valor. Se o valor desejado for maior que 1,0 pu, o STATCOM aumenta de potência. Se o valor desejado for menor que 1,0 pu, o STATCOM diminui de potência.

Outra análise importante foi a sensibilidade da tensão no PCC a variação de alguns parâmetros da rede. A tensão no PCC é fortemente dependente da reatância entre a fonte e o PCC, e principalmente dependente de variações da tensão na fonte.

Para a análise do STATCOM no regime dinâmico, primeiramente foi apresentado como foi obtido o modelo analítico no domínio do tempo do STATCOM, utilizando-se a transformada de Park. Posteriormente, foi mostrado como foi possível obter o modelo em espaço de estados, a partir do modelo analítico nas coordenadas $d-q$, onde foi necessário linearizar o modelo em torno de um ponto de equilíbrio. Com a utilização de técnicas de controle moderno, foram obtidas as funções de transferência do STATCOM, estas relacionam os sinais de saída i_q , i_d e v_{CC} com o sinal de entrada δ . A partir dessas funções, foi possível calcular os pólos do modelo do STATCOM. Mostrou-se que esses pólos são fortemente dependentes da indutância de dispersão dos transformadores (indutância entre o PCC e o STATCOM) e do capacitor do lado CC do STATCOM. Foi obtida a frequência de ressonância do STATCOM experimental, através da utilização de seus parâmetros reais e foram traçados os diagramas de Bode, comprovando a ressonância obtida. Por fim, o modelo foi validado através do confronto da simulação no domínio do tempo, utilizando-se o programa PSCAD, com a simulação no domínio da frequência. As curvas obtidas em cada programa foram desenhadas em um mesmo gráfico, onde foi possível visualizar a frequência de ressonância igual para cada simulação. O erro encontrado na amplitude pode estar ligado à não modelagem da corrente de magnetização e das simplificações feitas. Ao ser inserida a resistência de perda nos transformadores, essa ressonância foi rapidamente amortecida. Por fim, o modelo do STATCOM no domínio do tempo, ao ser excitado com uma senóide de frequência igual à frequência de ressonância calculada no modelo no domínio da frequência, teve sua saída tendendo a crescer indefinidamente. Assim, o modelo matemático obtido no domínio da frequência foi comprovado.

5.2 Trabalhos Futuros

São apresentadas a seguir, algumas sugestões de trabalhos futuros de continuação dessa dissertação:

- Obter um modelo analítico mais completo, com a inclusão da corrente de magnetização e perdas no chaveamento, visando diminuir o erro encontrado na amplitude.
- Obter o modelo matemático discreto, pois sistema de controle real do STATCOM é realizado através de componentes discretos, como microcontroladores e DSPs.
- Projetar o controle de forma a eliminar o efeito da ressonância e obter uma resposta dinâmica satisfatória, a partir do modelo matemático obtido em funções de transferência. O controle também pode ser projetado utilizando-se técnicas em espaço de estados.
- Validar experimentalmente o controle projetado.

REFERÊNCIAS:

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", John Wiley and Sons, 1995.
- [2] B.K. Bose, *Power electronics and AC Drives*, New Jersey: Prentice Hall, 1986.
- [3] CIGRE, "Static Synchronous Compensator", working group 14.19, Sep. 1998.
- [4] E. H. Watanabe, Pedro G. Barbosa, "Principle of Operation of FACTS Devices", *Revista Eletro Evolução: Sistema de Potência*, No. 6, pp.73-82, 1996.
- [5] E. H. Watanabe, Pedro G. Barbosa, Katia C. Almeida, Glauco N. Taranto, "Tecnologia FACTS – Tutorial", *XI CBA*, 1996.
- [6] L. Gyugyi, "Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real Time Control AC Transmission Lines", *Emerging Practices in Technology. IEEE-Transmission Lines*, IEEE Standards Press, Piscatway, USA, 1993.
- [7] L. Gyugyi, C.D. Schauder, Kalyan K. Sen, "The Interline Power Flow Controller Concept: A New Approach to Power Flow Management in Transmission Systems", PE-316-PWRD-0-07-1998.
- [8] Cavaliere, C. A. C., "Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados", Tese M.Sc, COPPE/UFRJ, 2001.
- [9] Z. Yang, C. Shen, L. Zhang, M. L. Crow, "Integration of a STATCOM and Battery Energy Storage", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 16, No. 2, pp. 254-260, May 2001.
- [10] L. Chun, J. Qirong, X. Jianxin, "Investigation of Voltage Regulation Stability of Static Synchronous Compensator in power system", *IEEE Power Engineering Society, Proceedings of the Winter Meeting 2000*, IEEE Vol. 4, pp. 2642-2647.
- [11] H. F. Wang, "Applications of damping torque analysis to StatCom control", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 22, pp. 197-204, 2000.

- [12] Stevenson, William D., Grainger, John J, *Power Systems Analysis*, McGraw-Hill, 1994.
- [13] N. G. Hingorani, "Introducing Custom Power", *IEEE Spectrum*, pp. 41-48, Jun. 1995.
- [14] Schauder, C.; Gernhardt, M.; Stacey, E.; Lemak, T.; Gyugyi, L.; Cease, T.W.; Edris, A.; "Development of a ± 100 MVar static condenser for voltage control of transmission systems. " *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 10, Issue. 3, pp 1486 -1496, Jul. 1995.
- [15] C. Schauder, M. Gernhardt and E. Stacey et al., "Operation of ± 100 MVAR TVA STATCON." *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 12 , No. 1, Oct. 1997.
- [16] Assis, T. M. L. de, "Análise do Desempenho Dinâmico de um STATCOM: Aplicação em 12 pulsos", Tese M.Sc, COPPE/UFRJ, 2000.
- [17] Lopes, F. da C., "Análise de Desempenho de STATCOM quasi 24 pulsos", Tese M.Sc, COPPE/UFRJ, 2006.
- [18] Rao, P.; Crow, M.L.; Yang, Z. "STATCOM control for power system voltage control applications." *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. 15 Issue: 4, Oct. 2000.
- [19] Zhuang, Y.; Menzies, R.W.; Nayak, O.B.; Turanlı, H.M, "Dynamic performance of a STATCON at an HVDC inverter feeding a very weak AC system." *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11 Issue: 2, pp.958 -964, Apr. 1996.
- [20] Ekanayake, J. B., Jenkins, N., "A three-level advanced Static VAR Compensator", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 540-545, Jan. 1996.
- [21] C. J. Hatziadoniu, F. E. Chalkiadakis, "A 12-pulse Static Synchronous Compensator for the distribution system employing the 3-Level GTO-Inverter", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, no. 4, pp. 1830-1835, Oct. 1997.

- [22] K.V. Patil, R.M. Mathur, J. Jiang, and S.H. Hosseini, "Distribution system compensation using a new binary multilevel voltage source inverter," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, pp. 459-464, Apr. 1999.
- [23] B. Han, S. Back, H. Kim, G. Karady, "Dynamic Characteristic Analysis of SSSC bases on multibrige inverter", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 17, No. 2, pp. 623-629, April 2002.
- [24] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE Press 2000.
- [25] Yong Hua Song, Allan T. Johns, "Flexible AC transmission systems (FACTS)", INSPEC/IEE, Nov. 1999.
- [26] Pablo García Gonzalez, Aurerio García Cerrada, "Control System for a PWM-Based STATCOM", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, pp. 1252-1257, Oct. 2002.
- [27] G. Venkataramanan, B. K. Johnson, "Pulse Width Modulated series compensator", *IEE Proc.- Gener., Transm., Distrib.*, Vol. 149, No. 1, pp. 71-75, Jan. 2002.
- [28] S. Mori, K. Matsuno, M. Takeda, M. Seto, "Development of a large var generator using self-commutated inverters for improving power system stability", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 371-377, Feb. 1993.
- [29] C. Schuder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemark, L. Gyugyi, T. W. Cese, A. Edris, "Operation of ± 100 MVAR TVA-STATCON", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, Oct. 1997.
- [30] C. Schauder, E. Stacey, M. Mund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Keri, A. Edris, "AEP UPFC Project: Instalation, Commissioning and Operation of the ± 160 MVA STATCOM (phase I)", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, pp. 1530-1535, Oct 1998.
- [31] Manual do conversor CFW-09 da WEG S.A. [Online] Disponível no sítio: <http://www.weg.com.br/asp/files/CAT-CFW09.PDF>

- [32] N. G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", *Proceedings of IEEE*, Vol. 76, No. 4, April 1988.
- [33] Ogata, K., *Engenharia de Controle Moderno*, 3 ed. Minnessota, Prentice-Hall do Brasil, 1998.
- [34] Miguel, J. M., "Condicionador de Tensão Aplicado a Sistema com Perda de Fase", Tese D.Sc, COPPE/UFRJ, 2005.
- [35] M.M. de Oliveira, Y. Jiang, and Å. Ekström, "Performance of Conventional and Advanced Static Var Compensators at Low Frequency Resonance Conditions," *IEEE Power Tech Conference*, Power Electronics Section, pp. 161-166, Stockholm, Sweden, June 1995.
- [36] P. Petitclair, S. Bacha, J. P. Rognon, "Averaged Modelling and Nonlinear Control of an ASVC", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 1, pp. 753-758, June 1996.

Apêndice A

Na primeira geração temos os equipamentos FACTS utilizando tiristores.

Exemplos de equipamentos ligados em paralelo à rede e pertencentes à primeira geração são mostrados na: Figura 46: o TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), o TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) e o SVC (*Static var Compensator*). Exemplos de equipamentos ligados em série à rede e pertencentes à primeira geração são mostrados na Figura 47: o TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) e o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*).

A segunda geração é composta por equipamentos que utilizam chaves autocomutadas tipo IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou GTOs (*Gate Turn Off Thyristor*). Utilizando estas chaves temos como exemplo o próprio STATCOM, um compensador paralelo como mostrado na Figura 48, e o compensador série mostrador na Figura 49, o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*).

A terceira geração de equipamentos FACTS é composta pela integração dos equipamentos série e paralelo em uma mesma linha de transmissão. O resultado disto é mostrado na Figura 50, o UPFC (*Unified Power Flow Controller*), o qual é um equipamento combinado do SSSC e do STATCOM.

Pode se considerar a existência de uma quarta geração de equipamentos FACTS. Nesta, a integração dos equipamentos série e paralelo é feita em linhas diferentes. Isto resulta em um equipamento mostrado na Figura 51 com o nome IPFC (*Interline Power Flow Controller*).

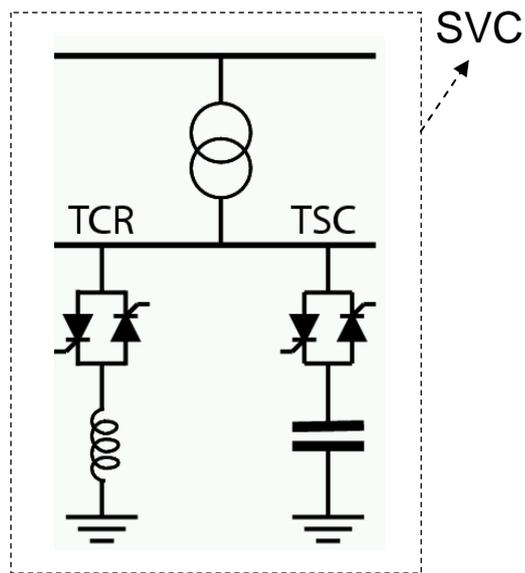


Figura 46 – TCR e TSC compondo o SVC

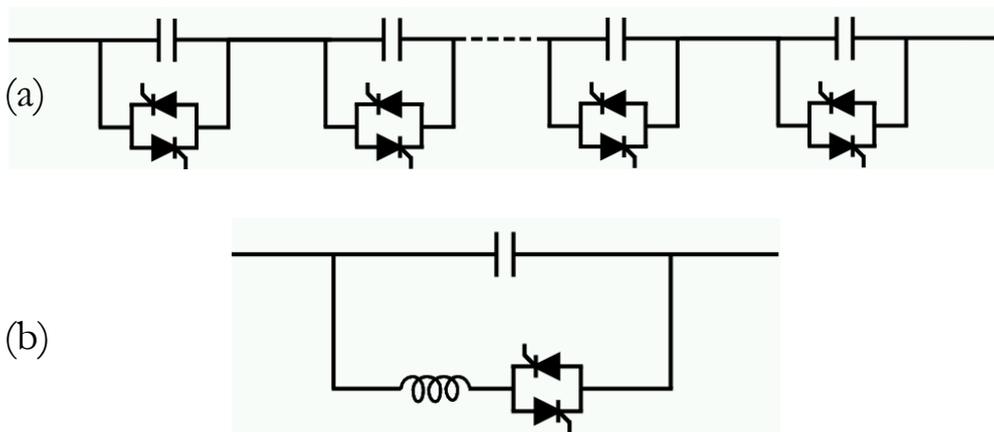


Figura 47 – (a) TSSC; (b) TCSC

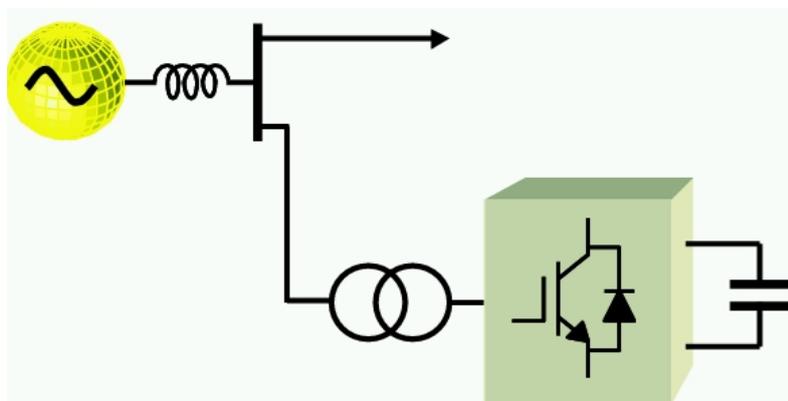


Figura 48 – STATCOM

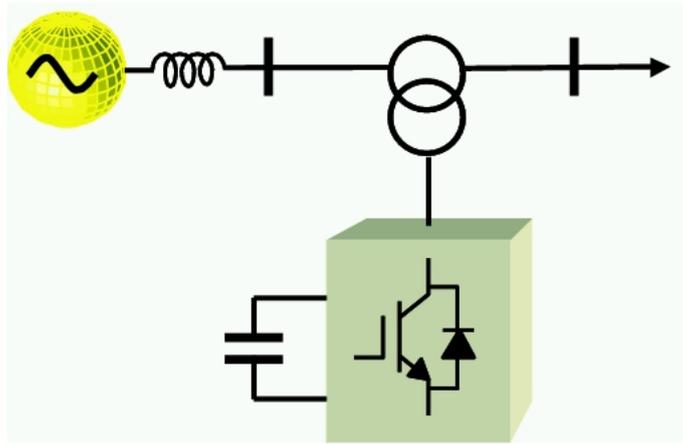


Figura 49 – SSSC

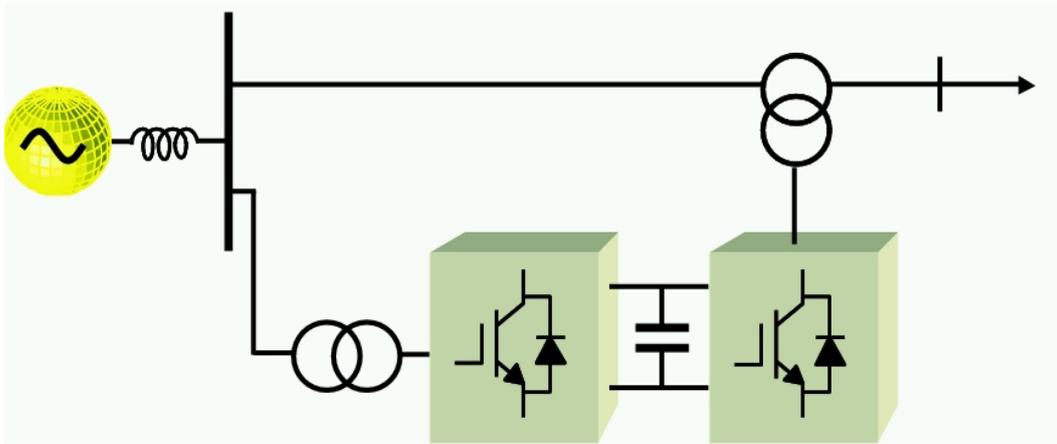


Figura 50 – UPFC

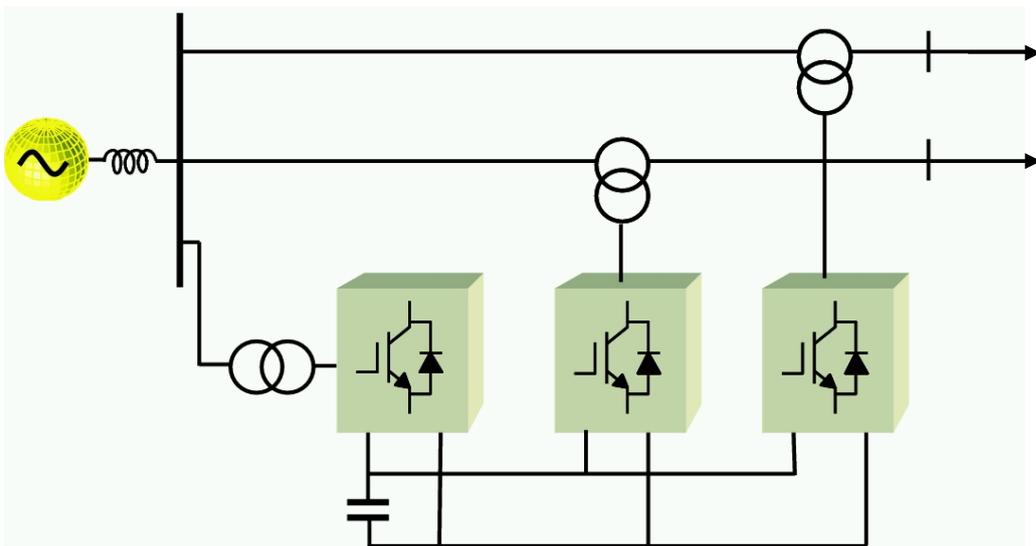


Figura 51 – IPFC

Apêndice B

- STATCOM 6 pulsos

Para a síntese de um STATCOM 6 pulsos é necessário apenas um conversor. A obtenção da forma de onda do STATCOM 6 pulsos é simples. Na Figura 52, é mostrado que cada chave do conversor é chaveada com pulsos de controle de 180° . Isso significa que cada chave individualmente entra em condução a cada período da tensão de saída e permanece conduzindo pelo meio período. O transformador na saída do conversor é responsável pela síntese das tensões fase-neutro produzindo uma forma de onda em cada fase do transformador como ilustrado na Figura 53.

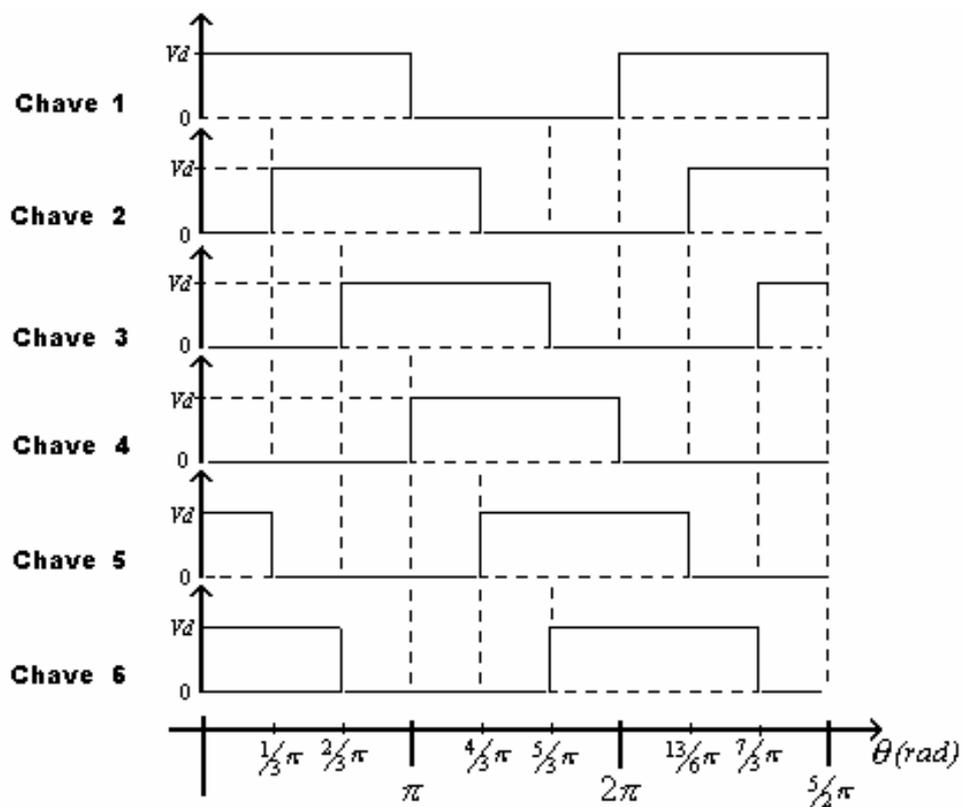


Figura 52 – Forma de onda de tensão nas chaves do conversor

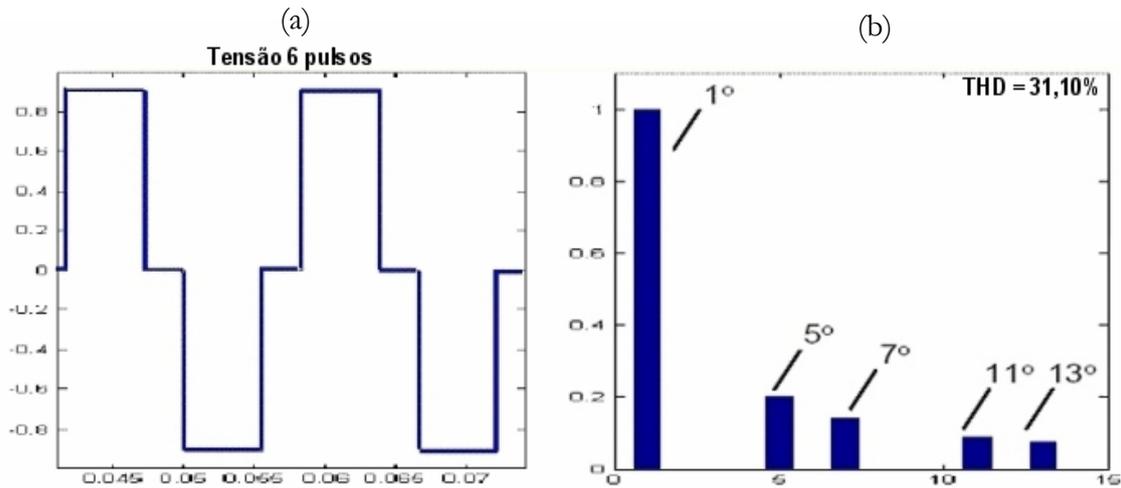


Figura 53 – (a) Tensão de saída no STATCOM 6 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo

O DHT calculado para essa forma de onda é de 31,10%. Não existe um nível máximo, aceitável da DHT que seja definido universalmente, nem específico para o Brasil. Mas na falta de uma norma é comum utilizar a norma do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) como referência, que neste caso vale 5%.

- O STATCOM 12 pulsos

Na construção de conversores de 12 pulsos utilizamos dois conversores de 6 pulsos, como mostrado na Figura 8(a). Na ligação dos transformadores, estrela-delta e estrela-estrela, os primários dos dois transformadores estão ligados em série e os secundários estão ligados aos conversores. Estas ligações geram uma defasagem de 30° entre as tensões a serem somadas no primário. Entretanto, para que a relação entre as amplitudes destas tensões defasadas entre si seja de 1:1, é necessário fazer com que a relação entre o número de espiras do primário e o secundário do transformador estrela-delta seja de $1:\sqrt{3}$. Por fim, a união destes fatores juntamente com os intervalos entre os disparados das chaves, obtemos uma forma de onda de 12 pulsos que se aproxima mais de uma senóide – Figura 54 – quando comparada a forma de onda mostrada na Figura 53.

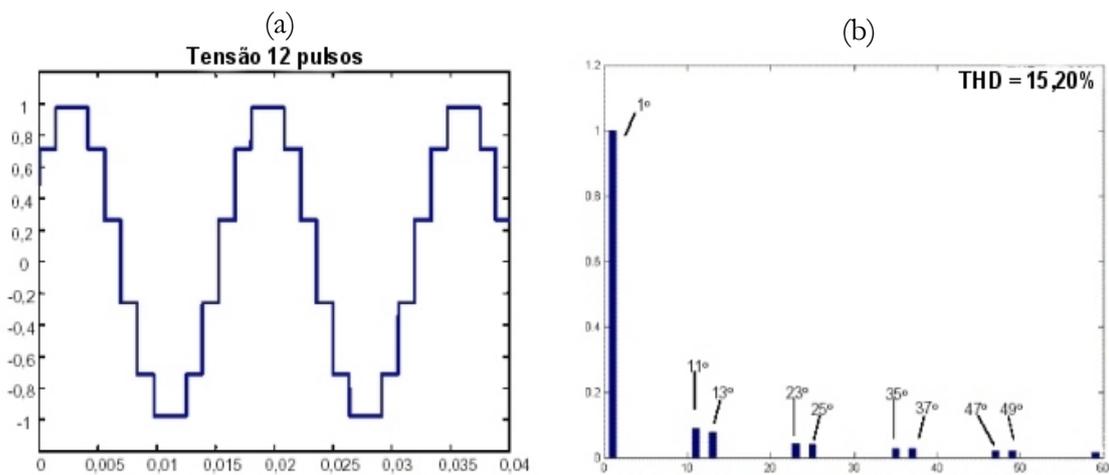


Figura 54 – (a) Tensão de saída no STATCOM 12 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo

Comparando o gráfico apresentado na Figura 54 com o mostrado na Figura 53, conclui-se que o conteúdo harmônico do sinal em questão foi reduzido, especialmente com a eliminação total do quinto e sétimo componentes harmônicos da tensão.

O DHT calculado para esta forma de onda é de 15,20%. Este valor, apesar de muito menor que no caso do 6-pulsos.

- O STATCOM 24 pulsos

Na Figura 55 é mostrada um conversor de 24-pulsos. Este conversor é construído a partir de quatro conversores de 6 pulsos conectados por transformadores zig-zag. Os primários e secundários destes transformadores são todos em estrela sendo que os secundários são divididos cada em enrolamentos principal e auxiliar. São ligações entre estes enrolamentos principais e auxiliares que fornecem defasagens entre as tensões geradas em cada conversor, defasagens necessárias para a composição de uma forma de onda total de 24 pulsos.

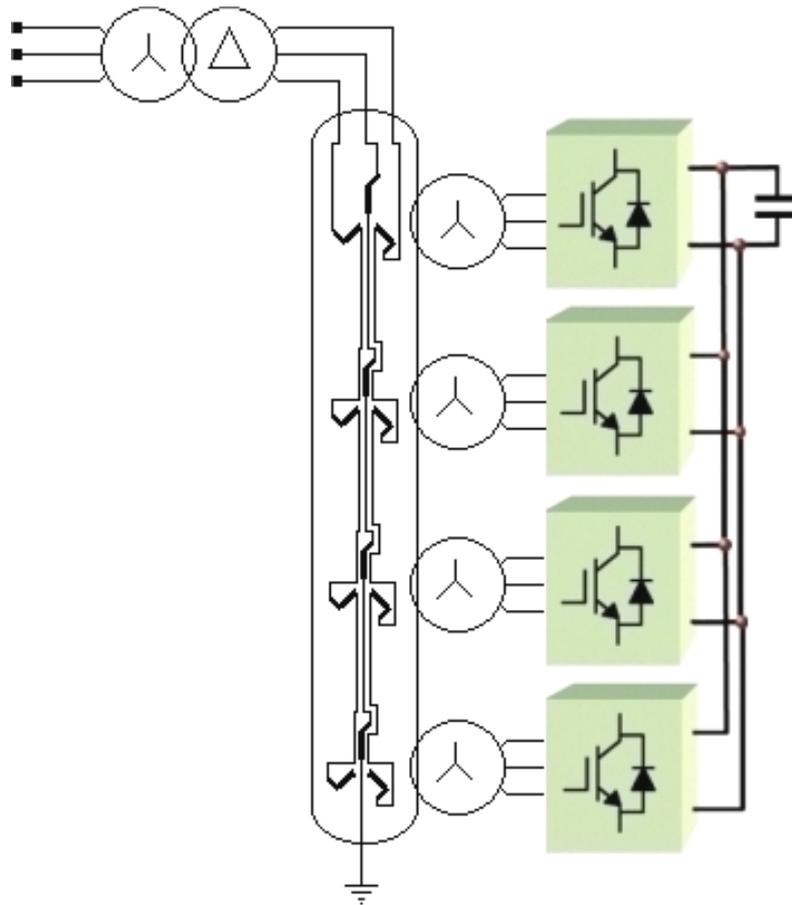


Figura 55 – STATCOM 24 pulsos

Supondo um referencial nulo, observando a figura acima, podemos numerar os conversores de cima para baixo de 1 a 4. Assim, as defasagens em relação ao referencial serão $-22,5^\circ$, $-7,5^\circ$, $7,5^\circ$ e $22,5^\circ$, respectivamente. Para isso, a relação entre o número de espiras do enrolamento principal e auxiliar de cada primário de cada transformador é um número não inteiro, o que dificulta a construção deste tipo de transformador e gera erros devido ao arredondamento destes valores.

Na Figura 56(a) é mostrada a forma de onda de saída do STATCOM 24 pulsos. Esta forma de onda aproxima-se mais de uma senóide que os casos apresentados anteriormente. É fácil constatar que o conteúdo harmônico da tensão gerada por um conversor de 24 pulsos é menor que das tensões geradas pelos conversores já analisados.

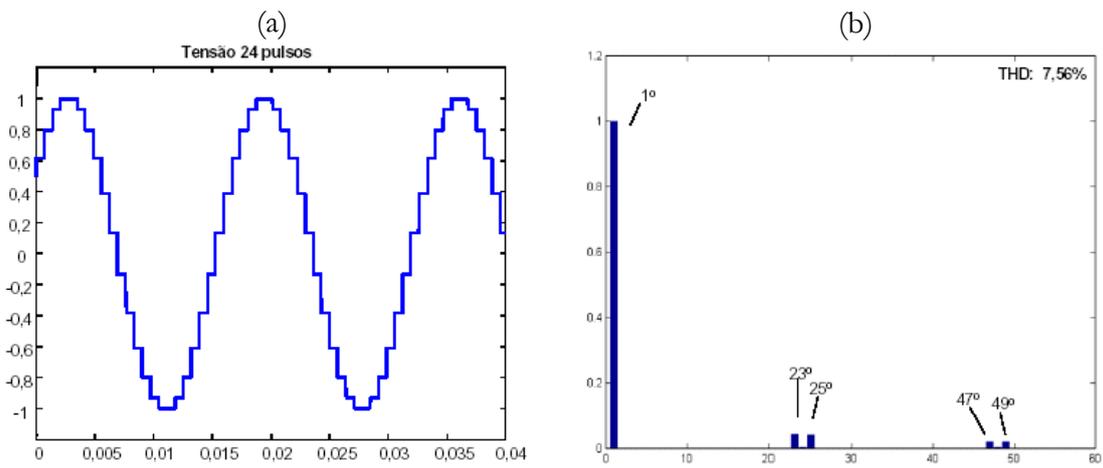
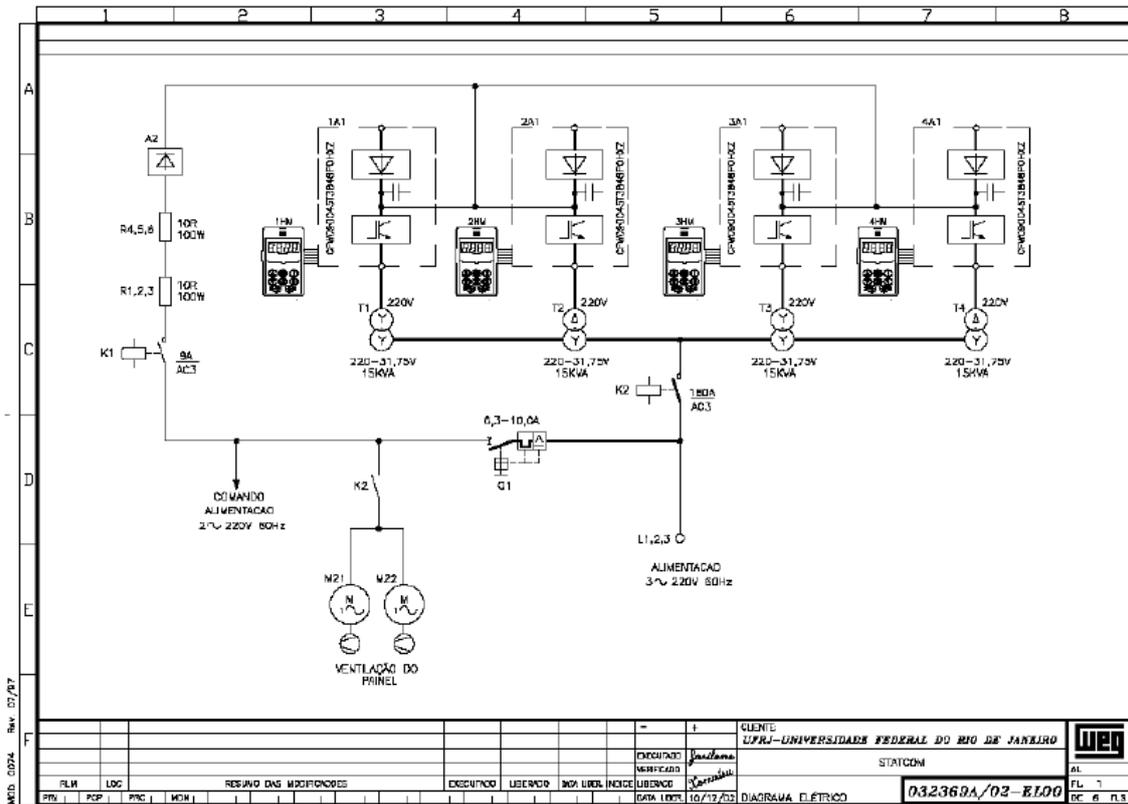


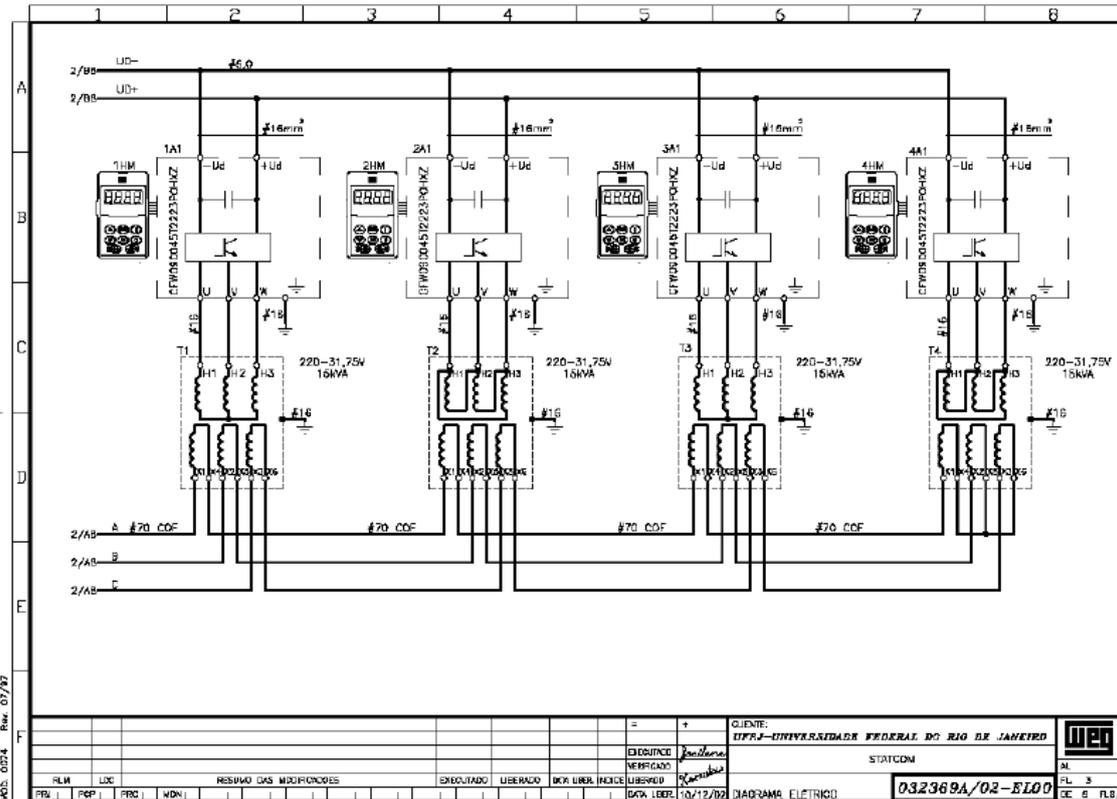
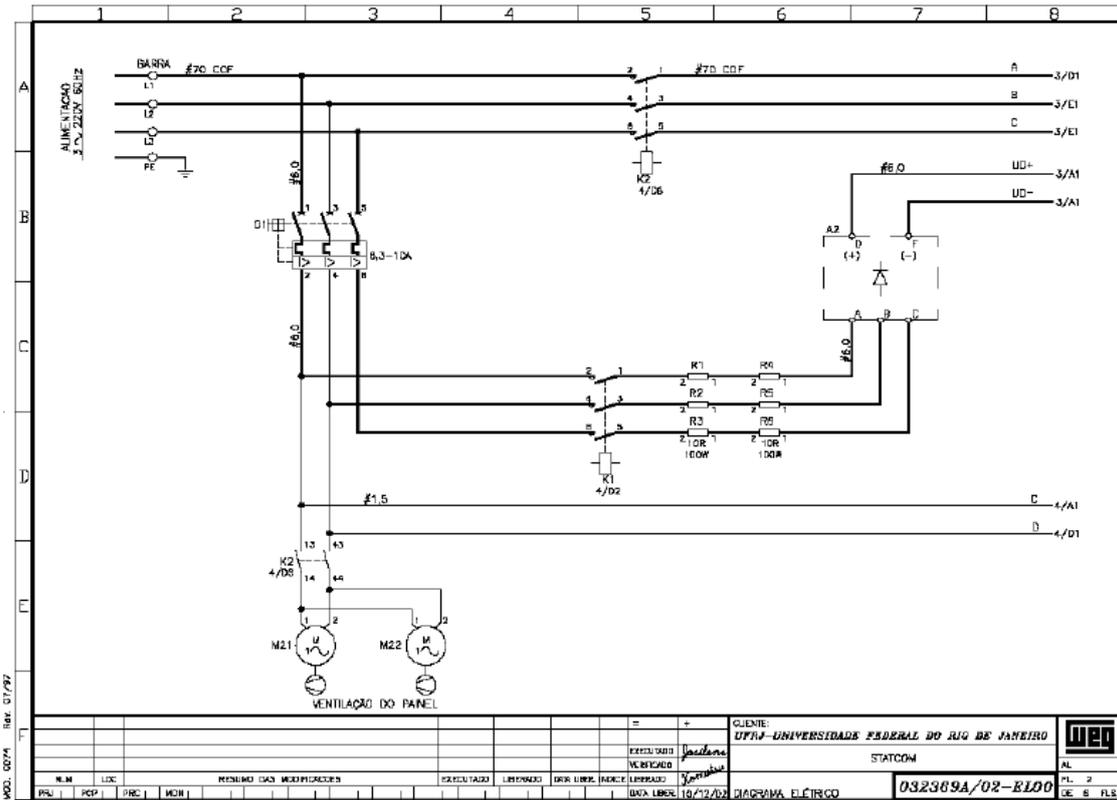
Figura 56 – (a) Tensão de saída no STATCOM 24 pulsos; (b) Espectro harmônico respectivo

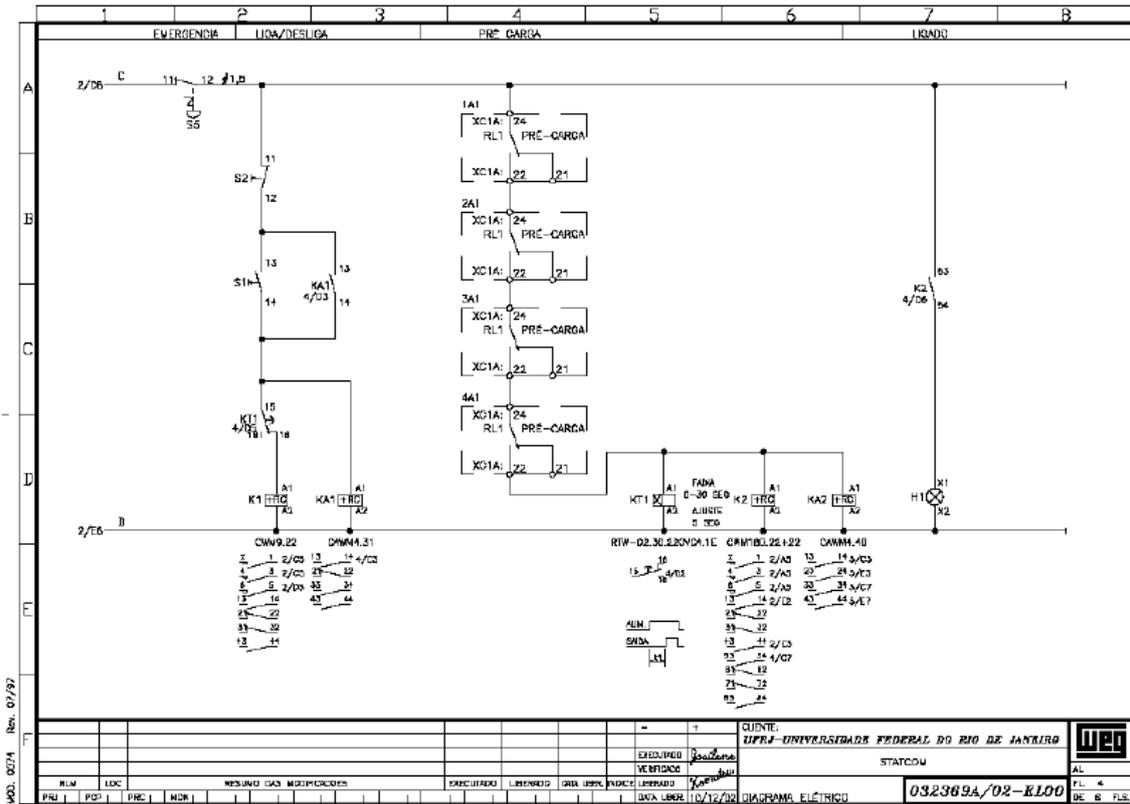
O DHT calculado para esta forma de onda é de 7,56%. Este valor encontra-se bastante próximo do limite já mencionado de 5%.

Apêndice C

Diagramas esquemáticos do STATCOM experimental.







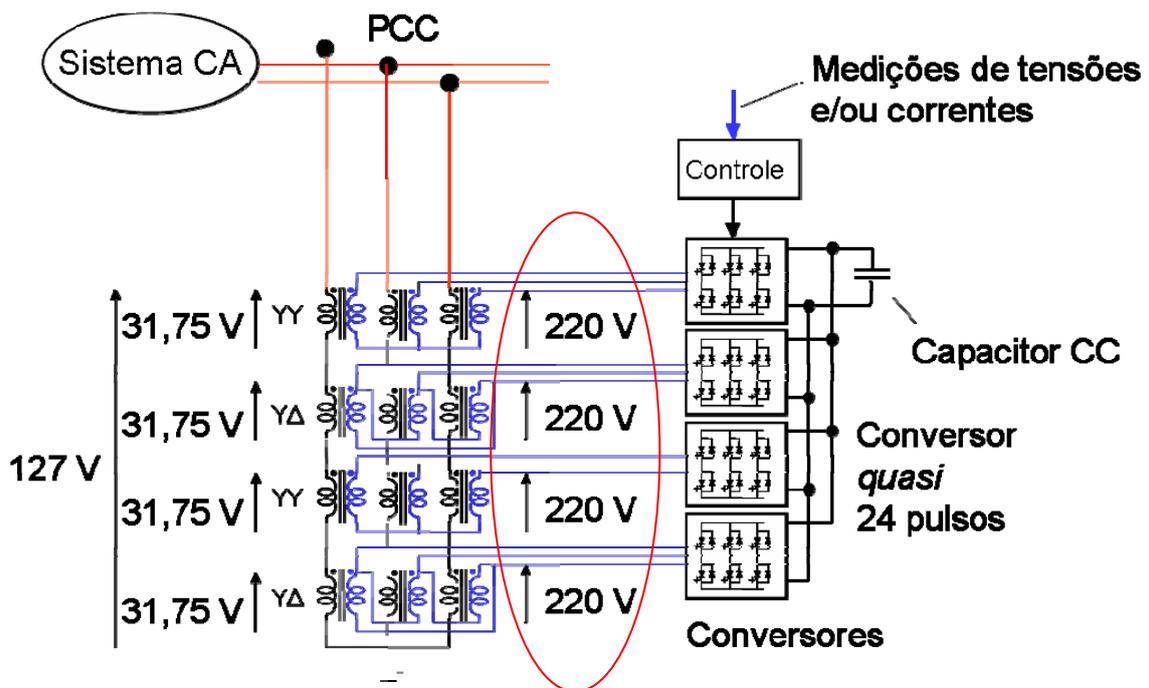
MO. 0274 Rev. 07/97

										QUENTE: UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO STATCOU			
										EXECUTADO: <i>[assinatura]</i> VERIFICADO: <i>[assinatura]</i>		AL:	
RESUMO DAS MODIFICACOES										DATA LABOR: 10/12/02		DIAGRAMA ELÉTRICO	
PRJ	POS	PRE	MOD							032369A/02-EL00		FL. 4 DE 8 FLS.	

Apêndice D

Neste apêndice será demonstrado a relação em (4.19).

Como a relação de transformação dos transformadores no projeto do STATCOM valem $YY = 1:4$ e $Y\Delta = 1:4 \cdot \sqrt{3}$, a tensão fase-neutro na saída dos conversores (127V) é igual à tensão fase-neutro no PCC. Com isso, a relação entre o pico da tensão fase-neutro no PCC e a tensão no lado CC vale $V_{PCC} = \frac{2}{\pi} \cdot v_{CC}$.



Apêndice E

Controle baseado na tensão CC:

Uma forma de obter o ângulo de potência δ consiste na medição da tensão CC do conversor. Uma vez que a potência reativa nos terminais do STATCOM depende do módulo de sua tensão CA e que esta tensão é diretamente proporcional à tensão CC, pode-se controlar indiretamente a potência reativa em seus terminais, controlando-se a tensão CC. Este tipo de controle tem a vantagem de minimizar o número de sensores em um circuito experimental. Ao invés de se utilizar três sensores para corrente e três para tensão como no controle da potência imaginária q , totalizando seis sensores, o controle baseado na tensão CC necessita de apenas um sensor para medir a tensão CC e três para medir as tensões da rede, utilizadas no PLL, totalizando quatro sensores. O diagrama de blocos do sistema de controle baseado na medida da tensão CC é mostrado na Figura 57.

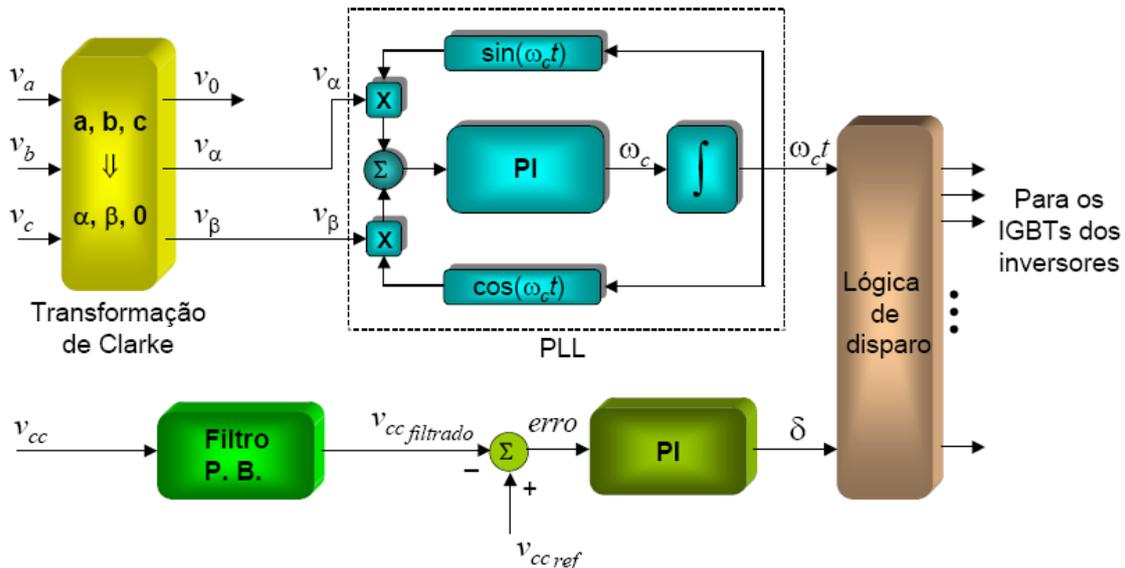


Figura 57

Figura 57 - Diagrama de blocos do controle baseado na tensão CC.