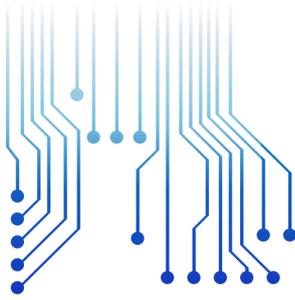


CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

JOAQUIM NILSON DE LIMA JUNIOR

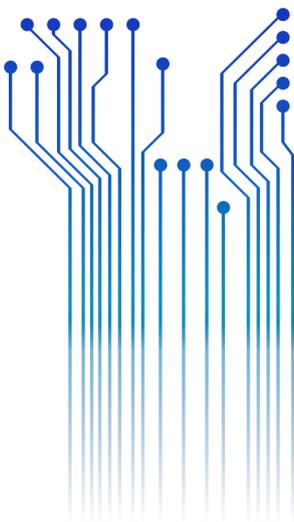
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO STATCOM DURANTE FALTAS EM UM SISTEMA DE POTÊNCIA



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

JOAQUIM NILSON DE LIMA JUNIOR

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO STATCOM DURANTE
FALTAS EM UM SISTEMA DE POTÊNCIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D. Sc.

Orientador

Campina Grande

2017

JOAQUIM NILSON DE LIMA JUNIOR

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO STATCOM DURANTE FALTAS EM UM SISTEMA DE
POTÊNCIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, por sempre ter me dado apoio e suporte, e também à minha namorada por estar sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e que me permitiu concluir este trabalho.

Agradeço também a minha mãe, Maria, e ao meu pai, Joaquim por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por fazerem de nossa família um ótimo ambiente, que foi essencial para meu crescimento, também agradeço aos meus irmãos, Carlos e Saturnino, por me apoiarem e sempre se preocuparem com meu bem estar.

Agradeço também a minha namorada Nadisna, por estar ao meu lado não só nos momentos de alegria mas também naqueles em que nada parece ter sentido.

Não posso deixar de agradecer também, aos meus colegas, Luís Gustavo, Hiago e Vinícius, que me ajudaram na confecção desse trabalho, e ao Departamento de Engenharia Elétrica juntamente ao LSP por terem disponibilizado a estrutura do laboratório, local onde foram feitas todas as simulações.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Ter desafios é o que faz
a vida interessante e
superá-los é o que faz a
vida ter sentido.”*

Joshua J. Marine.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso contempla o estudo e desenvolvimento de simulações em tempo real de um STATCOM. O objetivo principal é estudar a modelagem e desempenho de compensadores síncronos estáticos ou STATCOM (*STATIC synchronous COMPensator*) em sistemas elétricos de potência em situações de distúrbio, para regulação de tensão do barramento de acoplamento de tal dispositivo com o sistema, por meio de simulações digitais em tempo real, utilizando o RTDS™ (*Real Time Digital Simulator*), cujas funcionalidades e princípios de funcionamento serão abordados, e uma rápida introdução a história do equipamento em estudo. Ainda, será realizada uma apresentação do sistema de controle do compensador estático localizado na biblioteca do *software* do RTDS™.

Palavras-chave: Compensadores estáticos, Sistema de potência, STATCOM, RTDS™, Regulação de tensão, compensadores em paralelo.

ABSTRACT

This work contemplates the study and development of real-time digital simulations of a STATCOM. The main purpose is the study of modeling and performance of *STATIC synchronous COMPensator* or STATCOM in electric power systems in situations of disturbance, for voltage regulation, through real-time digital simulations, Using RTDS™, whose functionalities and operating principles and approaches, and a quick introduction in the history of the equipment under study. Furthermore, a presentation of the static compensator control system located in the RTDS™ software library.

Keywords: Static Compensators, Power System, STATCOM, RTDS™, Voltage Regulation, Shunt Compensators.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
1.1	Objetivos.....	13
1.2	Organização do Texto.....	14
2	<i>Static Synchronous Compensator</i> - STATCOM.....	15
2.1	Histórico do STATCOM.....	16
2.2	Princípio de Funcionamento.....	17
2.3	Topologias do VSC.....	21
2.4	Estratégias de controle.....	23
3	<i>Real-Time Digital Simulator</i> – RTDS™.....	25
3.1	<i>Hardware</i> do RTDS™.....	26
3.2	<i>Software</i> do RTDS™.....	26
4	Sistema de Controle do STATCOM.....	29
4.1	Regulador de Tensão de Saída.....	29
4.2	Regulador de tensão dos capacitores.....	30
4.3	Modulação por Largura de Pulso.....	31
5	Simulações e Resultados.....	33
5.1	Modelo do STATCOM.....	33
5.2	Resultados.....	34
6	Conclusão.....	39
	Referências.....	40

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição básica do STATCOM.	17
Figura 2 - STATCOM.	18
Figura 3 - Compensador paralelo ideal conectado ao SEP.	19
Figura 4 - Característica V-I do STATCOM.	21
Figura 5 - Inversor trifásico em ponte.	22
Figura 6 - Inversor trifásico de três níveis.	22
Figura 7 - Inversor trifásico composto por três inversores monofásicos.	23
Figura 8 - Controle de corrente por histerese (HCC).	24
Figura 9 - Rack do RTDS TM	25
Figura 10 - Módulo <i>Draft</i> do RSCAD.	27
Figura 11 - Interface do módulo <i>RunTime</i>	27
Figura 12 - Interface do módulo <i>CBuilder</i>	28
Figura 13 - Diagrama de blocos do regulador de tensão V_2	29
Figura 14 - Diagrama de blocos completo do regulador de Tensão.	30
Figura 15 - Diagrama de blocos para o controle da tensão V_{DC}	30
Figura 16 - Braço do inversor.	31
Figura 17 - formas de onda triangular e senoidal.	31
Figura 18 - Modelo do STATCOM no módulo <i>draft</i>	33
Figura 19 - Diagrama unifilar da linha de transmissão junto ao STATCOM.	34
Figura 20 - Tensões no barramento em que o STATCOM está conectado.	35
Figura 21 - Tensões durante a ocorrência de uma falta (STATCOM ausente, $R_f = 1 \Omega$).	35
Figura 22 - Tensões durante a ocorrência de uma falta (STATCOM presente, $R_f = 1 \Omega$).	36
Figura 23 - Tensões durante a ocorrência de uma falta (STATCOM ausente, $R_f = 50 \Omega$).	37
Figura 24 - Tensões durante a ocorrência de uma falta (STATCOM ausente, $R_f = 50 \Omega$).	37
Figura 25 - Corrente de falta com o STATCOM ausente no sistema.	38
Figura 26 - Corrente de falta com o STATCOM presente no sistema.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
STATCOM	<i>STATic Synchronous COMPensator</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
HCC	<i>Hysteresis Current Control</i>
RTDS	<i>Real-Time Digital Simulator</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
TNA	<i>Transient Network Analysers</i>
RMS	<i>Root Medium Square</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de defasagem entre o SEP e o compensador ideal
Ω	Unidade de medida da resistência elétrica
R_f	Resistência de falta
S_s	Fluxo de potência total entre o SEP e o compensador ideal
P_s	Fluxo de potência ativa entre o SEP e o compensador ideal
Q_s	Fluxo de potência reativa entre o SEP e o compensador ideal
V_s	Valor de tensão no SEP
V_I	Valor de tensão no compensador ideal
I_L^*	Conjugado da corrente no sentido SEP para o compensador ideal
X_s	Impedância equivalente entre o SEP e o compensador ideal

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP), são circuitos destinados a levar grandes blocos de energia elétrica da geração até os consumidores. No entanto, há obstáculos quanto a operação estável do SEP, sendo um desses a instabilidade de tensão que é caracterizada por um declínio lento e progressivo das magnitudes de tensão das barras da carga.

Para o bom funcionamento do sistema é fundamental que a energia reativa esteja adequada à demanda da carga, ou seja, que a oferta de energia reativa pelos sistemas de geração atenda à demanda da carga. Se a demanda de energia reativa pela carga for maior que a quantidade enviada pela geração, ou, ao contrário, se a oferta é maior que a demanda, o sistema poderá apresentar diversos problemas operacionais como instabilidade de tensão, perda de sincronismo de máquinas elétricas, sobreaquecimento de geradores e perdas na transmissão.

O controle da compensação de reativos no SEP é feito através de estudos de fluxo de carga para injeção ou absorção de reativos no sistema em uma quantidade ideal. Existem alguns métodos para a compensação desses reativos, tais como, a utilização de bancos de capacitores e reatores, e também, a utilização de compensadores síncronos rotativos (máquinas síncronas) e estáticos.

Com o avanço da eletrônica de potência, métodos mais eficientes vêm sendo estudados para a compensação de potência reativa a partir da utilização de semicondutores auto comutados. A esses equipamentos, foi dado o nome de *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS), (HINGORANI, 1988).

Entre os equipamentos FACTS, os compensadores conectados em paralelo têm mostrado viabilidade em termo de custo benefício em uma ampla variedade de resolução de problemas da transmissão até a distribuição de energia elétrica.

Nesse trabalho será estudado o compensador em paralelo conhecido como STATCOM do inglês *STATic Synchronous COMPensator*, sendo seu conceito proposto por Gyugyi em 1976 (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

O STATCOM é conectado em paralelo ao sistema, que utiliza de inversores de tensão capazes de gerar tensões trifásicas senoidais e equilibradas, na frequência fundamental, de módulo e ângulo de fase controláveis, conseqüentemente, é produzido o fluxo de potência

ativa e reativa entre o compensador e a linha de transmissão. Essa máquina ideal não tem inércia. Sua resposta é praticamente instantânea e não altera significativamente a impedância equivalente do sistema de potência.

A modelagem e teste do STATCOM para realização de testes será feita utilizando o RTDS™. Este se configura como uma combinação de hardware e software funcionando como um TNA (*Transient Network Analysers*) digital (DANTAS, 2009). O RTDS™ utiliza os mesmos algoritmos e equações encontradas em programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) (DOMMEL, 1996). A simulação é considerada em tempo real devido às soluções do sistema elétrico serem obtidas em um intervalo de tempo muito menor que as constantes de tempo do sistema.

1.1 OBJETIVOS

Diante o que foi exposto, o objetivo geral deste trabalho é uma revisão bibliográfica do equipamento STATCOM, com foco no estudo de seu princípio de funcionamento e seu comportamento em situações de faltas no SEP, em seguida fazer uso do RTDS para simulações em tempo real e obtenção dos resultados. Como objetivos específicos, pode-se destacar os seguintes tópicos:

- Estudo do princípio de funcionamento do STATCOM;
- Estudo do simulador do RTDS™, em que será feita a modelagem e simulações do STATCOM junto ao sistema elétrico modelado;
- Modelagem de um sistema elétrico no RSCAD, e também do equipamento STACOM;
- Simulação para duas situações de falta fase-terra no sistema elétrico modelado (no meio da linha de transmissão, e no barramento de conexão do equipamento) e atuação do STACOM em tempo real via RTDS™.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, assim, como os objetivos propostos do trabalho de conclusão de curso intitulado “Análise do comportamento do STATCOM durante faltas no Sistema de Potência”, do aluno Joaquim Nilson de Lima Junior. No capítulo 2, será apresentada de maneira sucinta as gerações dos equipamentos FACTS, e também em qual categoria o STATCOM é classificado, em seguida será mostrado de forma breve o histórico do equipamento em estudo, ainda no mesmo capítulo serão apresentadas as partes constituintes do STATCOM, bem como suas funções e topologias. No Capítulo 3 será apresentada de forma simples o equipamento denominado de RTDSTM, que foi utilizado para realizar a modelagem e simulações do equipamento proposto no trabalho. No Capítulo 4 está contido o sistema de controle de tensão e como é feito o chaveamento do conversor de tensão utilizado no modelo do STATCOM. No Capítulo 5 serão descritas as simulações realizadas e analisados os resultados, e por fim, as conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 6.

2 *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR - STATCOM*

FACTS, sigla de *Flexible Alternating Current Transmission Systems* identifica os sistemas de transmissão de corrente alternada que incorporam dispositivos baseados em componentes semicondutores de alta potência, capazes de controlar algumas grandezas elétricas, tais como: tensão, corrente, e fluxo de potência, e tem por objetivo aumentar o controle e capacidade de transmissão de potência.

Estabilidade, limites térmicos, segurança e eficiência na transmissão de grandes blocos de energia, são alguns problemas relacionados com o SEP, e por isso, o estudo sobre FACTS vem sendo estudado cada vez mais (FRONTIN, 2013).

Por existirem diversos equipamentos do tipo FACTS, existem algumas formas de fazer sua classificação (RODRIGUES, 2010):

Classificação por gerações:

- 1ª Geração: FACTS comutados por tiristores;
- 2ª Geração: FACTS comutados por transistores IGBT ou tiristores GTO;
- 3ª Geração: FACTS constituídos pela integração de compensação série e paralelo em uma mesma linha de transmissão;
- 4ª Geração: FACTS constituídos pela integração de compensação série e paralelo em linhas de transmissão diferentes.

Classificação pelo tipo de comutação:

- Comutados pela rede, baseado em tiristores;
- Auto comutáveis, baseados em semicondutores mais modernos, auto comutáveis.

Classificação pelo tipo de compensação:

- Compensadores série;
- Compensadores paralelo;
- Compensadores série-paralelo;
- Compensadores série-série.

O STATCOM, sigla de *STATIC Synchronous COMPensator*, é um dispositivo FACTS classificado como um compensador em paralelo. Ele gera um conjunto de tensões trifásicas senoidais na frequência fundamental, com amplitude e ângulo de fase controláveis. Este tipo de controlador pode ser implementado utilizando vários tipos de topologias.

2.1 HISTÓRICO DO STATCOM

Desde 1980, quando um grupo de pesquisa japonesa pôs em operação um STATCOM com capacidade de 20 MVA, utilizando tiristores com circuitos auxiliares com comutação forçada (SUMI; HARUMOTO; HASEGAWA, 1981), muitos exemplos têm sido instalados e testados.

Em 1992, um STATCOM pertencente à *Kansay Electric Co., Ltd.*, com capacidade de 80 MVA e tensão de 154 kV entrou em operação na subestação de Inuyama (MORI; MATSUNO; TAKEDA; SETO, 1993).

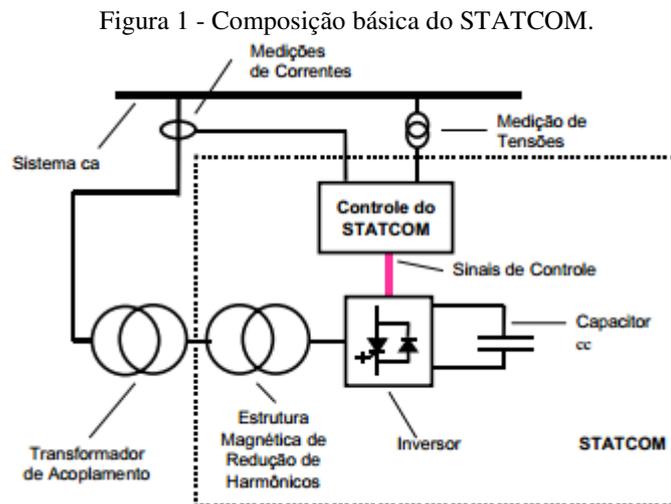
No ano de 1995, nos EUA foi desenvolvido um STATCOM de 100 MVA pertencente à *Tennessee Valley Authority* para a subestação de *Sullivan*, conectado à uma linha de 161 kV (SCHAUDER; GERNHARDT; STACEY; LEMAK; GYUGYI, 1995). Ele foi implementado com uma estrutura de 48-pulsos com o intuito de reduzir harmônicos.

Já em 1998, foi desenvolvido pela *American Electric Power (AEP)*, e instalado na subestação de Inez, localizado no estado de *Kentucky*, o UPFC do inglês – *Unified Power Flow Controller*, com capacidade de 320 MVar (SCHAUDER; STACEY; LUND; GYUGYI; KOVALSKY, 1998). Esse projeto aconteceu em duas fases, sendo a primeira a instalação e comissionamento de um STATCOM com capacidade de 160 MVA no ano de 1997, e em seguida a instalação de outro STATCOM com capacidade semelhante.

Com o passar dos anos, o STATCOM foi conseguindo mais credibilidade por conseguir levar melhorias tanto no sistema de transmissão quanto no sistema de distribuição de energia. Assim, foram propostas novas estratégias de controle para o acionamento dos inversores e também alterações nas topologias, com o intuito de melhorar seu desempenho.

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Este equipamento é composto por conversores de tensão DC/AC, transformador de acoplamento, capacitor ou banco de capacitores e um sistema de controle, como mostrado na Figura 1, e tem como função controlar a potência reativa capacitiva ou indutiva (CAVALIERE, 2001).



Fonte: CAVALIERE, 2001.

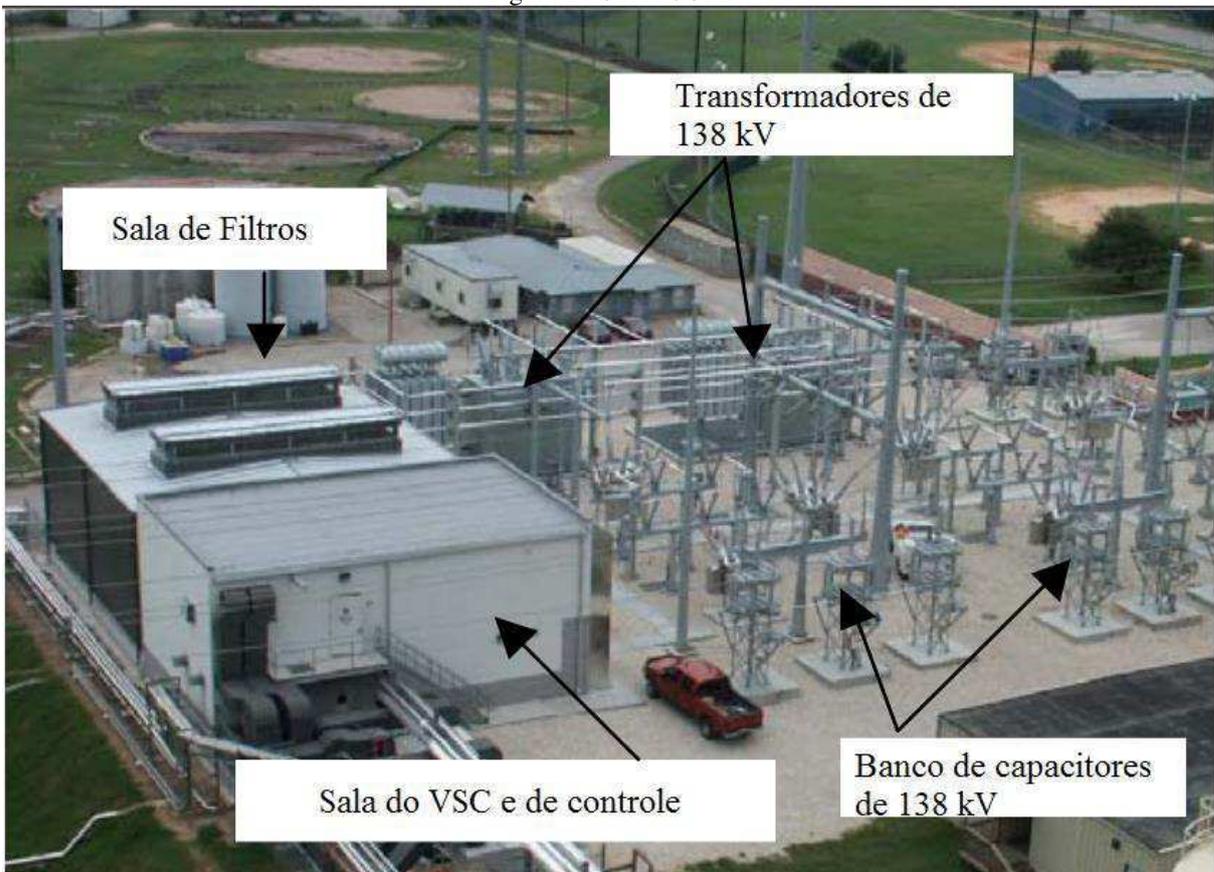
O VSC, sigla de *Voltage Source Converter*, é uma combinação de chaves semicondutoras auto comutáveis, tais como (GTO, IGBT, IGCT, entre outras), capaz de gerar tensões alternadas com amplitude e fase variáveis a partir da tensão de corrente contínua nos terminais do (s) capacitor (es) do lado de corrente contínua.

O (s) capacitor (es) serve (m) como fonte de armazenamento de energia para possibilitar o funcionamento do VSC. Como a principal função do STATCOM é a troca de energia reativa com o sistema, tem-se que a troca de energia ativa é feita somente para manter o nível de tensão nos capacitores capaz de garantir o funcionamento do equipamento.

Os transformadores são os responsáveis por fazer a ligação do equipamento com o SEP, fazendo com que os níveis de tensão de saída do STATCOM estejam adequadas para serem enviadas ao sistema. Outra função dos transformadores é eliminar alguns dos harmônicos gerados pelas chaves do conversor reduzindo o conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico, através de formas especiais de ligação (CAVALIERE, 2001).

O sistema de controle é responsável por comandar o chaveamento dos semicondutores. As técnicas utilizadas para o funcionamento desse sistema serão apresentadas mais adiante neste trabalho. Na Figura 2 têm-se a imagem de uma subestação para um STATCOM instalado na cidade de Austin, Texas, Estados Unidos.

Figura 2 - STATCOM.

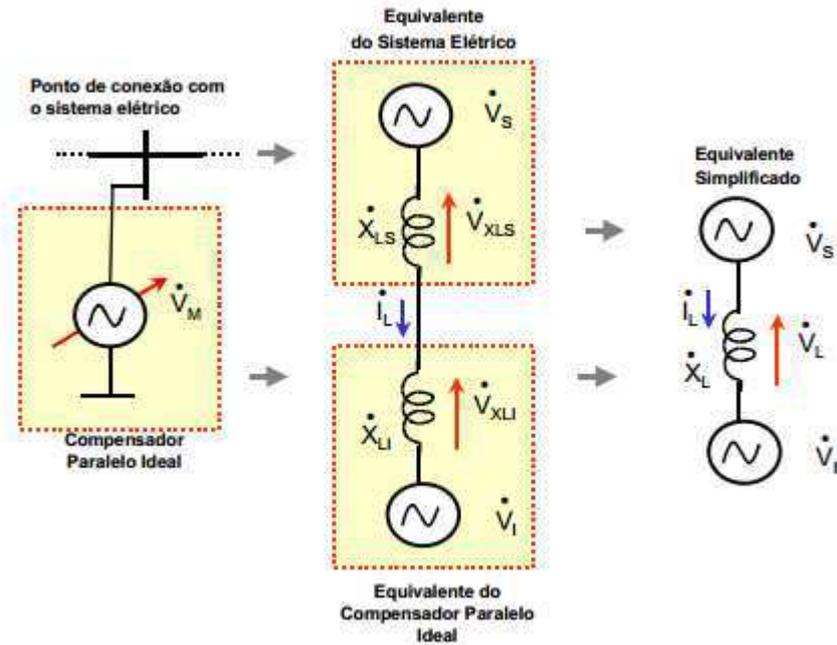


Fonte: OSKOUI, 2006.

O objetivo primário do STATCOM é obter na saída uma forma de onda de tensão trifásica alternada controlável e com baixo índice de harmônico no ponto de conexão com o sistema elétrico, de forma que, regule o fluxo de corrente reativa por meio da geração e absorção da potência reativa controlada pela comutação do VSC (SINGH; SAHA; CHANDRA; AL-HADDAD, 2009).

O funcionamento do equipamento em estudo pode ser melhor explicado considerando um compensador paralelo ideal conectado em paralelo ao sistema por meio de uma reatância equivalente, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Compensador paralelo ideal conectado ao SEP.



Fonte: CAVALIERE, 2001.

Considerando que o compensador ideal é defasado com um ângulo ϕ em relação ao SEP, pode-se determinar as expressões para o fluxo de potência em função da amplitude e defasagem do compensador, como pode ser visto nas expressões de (1) a (3).

$$S_S = \dot{V}_S \cdot \dot{I}_L^* \quad (1)$$

$$P_S = \frac{V_I \cdot V_S \cdot \text{sen}\phi}{X_L} \quad (2)$$

$$Q_S = \frac{V_S^2 - V_I \cdot V_S \cdot \text{cos}\phi}{X_L} \quad (3)$$

Tomando como base as expressões anteriores, pode-se fazer algumas análises, tais como:

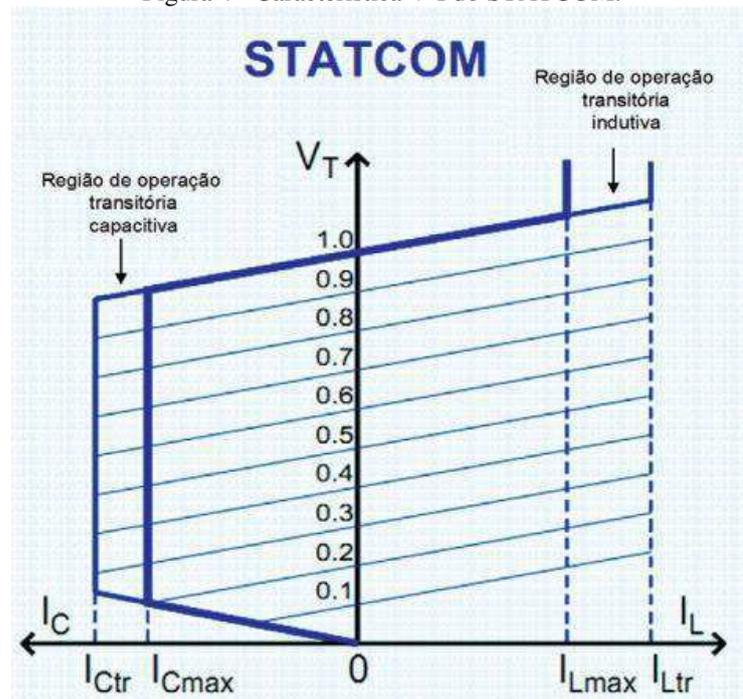
- Se a tensão do sistema estiver adiantada da tensão do compensador, tem-se que $0 < \phi < 90^\circ$, existe fluxo de potência ativa do sistema para o compensador;
- Se a tensão do sistema estiver atrasada da tensão do compensador, tem-se que $90^\circ < \phi < 0$, existe fluxo de potência ativa do compensador para o sistema;
- Se a tensão do sistema estiver em fase e com mesma amplitude que a tensão do compensador, não existe fluxo de potência ativa e nem reativa;
- Se $\phi = 0$, e o módulo da tensão do sistema for maior que o módulo da tensão do compensador, $P_S = 0$, no entanto, existe fluxo de potência reativa indutiva, ou seja, $Q_S > 0$;
- Se $\phi = 0$, e o módulo da tensão do sistema for menor que o módulo da tensão do compensador, $P_S = 0$, no entanto, existe fluxo de potência reativa capacitiva, ou seja, $Q_S < 0$.

De acordo com as expressões (2) e (3), percebe-se que pode ser feito o controle do fluxo de potência ativa e reativa entre o compensador e o sistema, controlando a fase e amplitude do compensador

Logo, pode-se controlar o fluxo de potência entre o sistema e o compensador, controlando a fase e amplitude do compensador.

Para aperfeiçoar ainda mais o entendimento sobre o funcionamento do STATCOM é mostrado na Figura 4 a característica V-I (Tensão em função da corrente) do equipamento em questão. Caso a tensão do ponto em conexão com o compensador fique abaixo do valor de nominal, o STATCOM gera potência reativa capacitiva para elevar a tensão do barramento, caso contrário, o compensador gera potência reativa indutiva para diminuir a tensão para o valor nominal.

Figura 4 - Característica V-I do STATCOM.



Fonte: FRONTIN, 2013.

Ainda com base na Figura 4, pode-se analisar ainda que o STATCOM, além de poder fornecer tanto potência reativa indutiva quanto potência reativa capacitiva, consegue também controlar sua corrente de saída sobre toda a faixa controlável independente da tensão, ou seja, o compensador pode fornecer corrente com uma tensão próxima de zero (RODRIGUES, 2010).

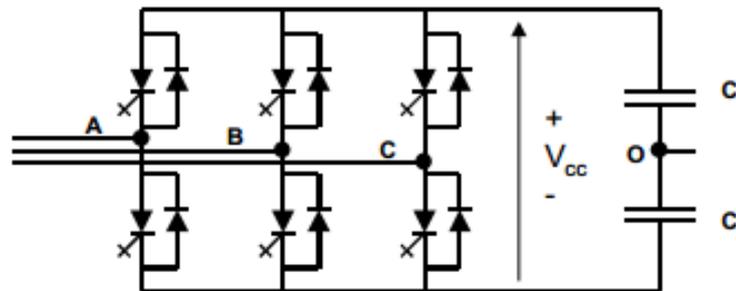
Para um melhor detalhamento, tem-se que, a máxima corrente na região de operação transitória capacitiva é determinada pela máxima corrente de desligamento que as chaves semicondutoras podem suportar. Para a máxima corrente na região de operação transitória indutiva, teoricamente, é determinada pelo limite máximo da temperatura de junção das chaves (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

2.3 TOPOLOGIAS DO VSC

Como o VSC é considerado a espinha-dorsal do STATCOM, será apresentado algumas das topologias mais utilizadas. Primeiramente, tem-se o inversor trifásico em ponte, pode ser visto na Figura 5, esse inversor utiliza de duas chaves por fase, com um diodo em paralelo com cada chave. O controle independente de fase é dificultado para esse tipo de

inversor, pois na tensão fase-fase de saída é inserido automaticamente um ângulo de defasagem de 30° .

Figura 5 - Inversor trifásico em ponte.

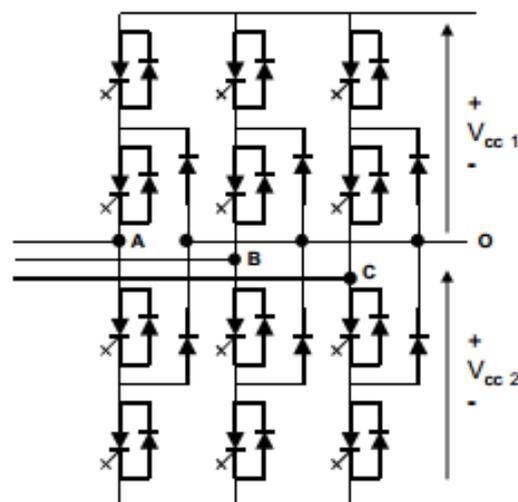


Fonte: CAVALIERE, 2001.

Um tipo semelhante de inversor é adotado no STATCOM de capacidade de 100 MVA pertencente à *Tennessee Valley Authority* para a subestação de *Sullivan*, conectado à uma linha de 161kV.

Outro tipo de inversor, é o trifásico de três níveis, nesse são utilizados quatro chaves para cada fase, a vantagem desse com relação ao inversor trifásico em ponte é que em sua saída a forma de onda tem um maior número de níveis. Seu esquema pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Inversor trifásico de três níveis.

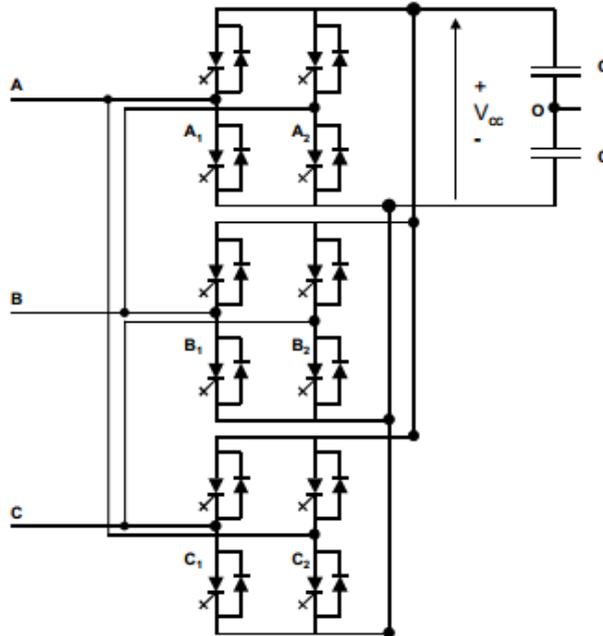


Fonte: CAVALIERE, 2001.

Também tem os inversores monofásicos compondo uma estrutura trifásica, ver Figura 7, compõe quatro chaves por fase, resultando em 12 chaves no total. Esse inversor

pode controlar cada fase independentemente, pois permite o controle da largura pulso, utilizando da técnica de chaveamento unipolar, assim, tem-se uma quantidade menor de harmônicos na saída.

Figura 7 - Inversor trifásico composto por três inversores monofásicos.



Fonte: CAVALIERE, 2001.

2.4 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

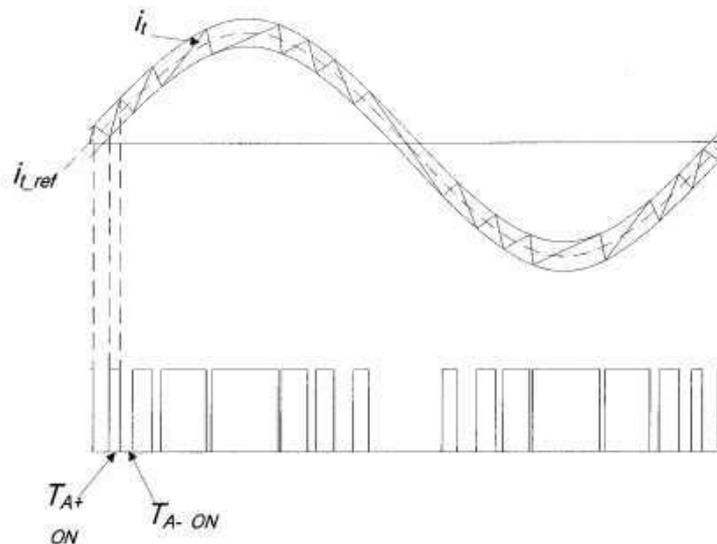
Para que haja o controle apropriado dos momentos de ligamento e desligamento das chaves do VSC, são utilizadas algumas estratégias de controle, que a partir da leitura de alguns parâmetros do sistema é possível designar os comandos para as chaves. A modulação por largura de pulso (PWM), do inglês, *Pulse Width Modulation*, e o controle de corrente por histerese (HCC), sigla de *Hysteresis Current Control*, são duas estratégias bastante utilizadas para o chaveamento.

PWM é a estratégia mais utilizada no chaveamento do VSC. Funciona basicamente comparando o sinal de entrada com uma onda triangular de frequência fixa, a fase e magnitude do componente fundamental da tensão de saída pode ser controlada variando a fase e magnitude do sinal modulante (DENG, 2007). Esse esquema será melhor apresentado mais adiante, sendo que ele foi o utilizado no STATCOM utilizado nas simulações.

HCC é outra conhecida estratégia usada no chaveamento do inversor. Diferentemente do PWM, o HCC controla a variação de corrente em vez, da variação de tensão. Nessa tecnologia, a fase da corrente de saída do VSC é comparada com uma corrente senoidal de referência. Com a ajuda de uma tolerância pré-definida, a fase da corrente é limitada e aproximadamente vista como uma corrente de referência tem seus componentes harmônicos negligenciados. Assim, controlando a magnitude e fase da corrente de referência, o inversor gera uma corrente trifásica senoidal para que possa ocorrer a troca de potência reativa entre o sistema e o STATCOM (BOYS; GREEN, 1989).

Para melhor explicar o funcionamento o controle de corrente por histerese, tem-se que a corrente de saída i_t com uma faixa em torno da corrente de referência i_{t_ref} . Uma vez que i_t ultrapasse a parte superior da faixa a chave S1 é acionada e, conseqüentemente, a chave S2 é desativada (ver Figura 14). A situação contrária também é válida, a Figura 8 ilustra melhor a explicação.

Figura 8 - Controle de corrente por histerese (HCC).



Fonte: DENG, 2007.

Alguns métodos utilizam da estratégia HCC, por exemplo, o método da teoria ativa e reativa instantânea (AREDES; HÄFNER; HEUMANN, 1997 e AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

3 *REAL-TIME DIGITAL SIMULATOR – RTDS™*

Para a implementação de algoritmos para solução digital de transitórios eletromagnéticos em tempo real, se fazia necessário na maioria dos casos, a implementação analógica de modelos de sistemas elétricos em miniatura, denominados Analisadores de Rede ou *Transient Network Analysers* (TNA). Com a evolução tecnológica de dispositivos para o processamento digital, foram desenvolvidos equipamentos para a simulação digital de sistemas elétricos de potência em tempo real, estes, combinações de *hardware* e *software*, se comportam como um TNA digital e permitem flexibilidade muito maior às simulações (DANTAS, 2009).

Como exemplo dos equipamentos que combinam *hardware* e *software*, tem-se o RTDS™, este permite que a simulação de sistemas elétricos realizada com a ajuda do *software* RSCAD seja considerada em tempo real, pois as soluções do sistema são obtidas em um intervalo de tempo menor que as constantes de tempo do sistema. O equipamento também permite comunicação com equipamentos externos, e assim, possibilitando o teste de dispositivos de proteção e controle no sistema.

Outra funcionalidade do RTDS™ que chama atenção, é a implementação e incorporação de modelos e algoritmos próprios dos usuários que possam interagir com os modelos já existentes no equipamento. Com essa funcionalidade é que foi possível implementar um novo sistema de controle para o STATCOM e fazer os testes com alguns modelos já existentes no RTDS™.

Pode ser visto na Figura 9 o rack do RTDS™.

Figura 9 - Rack do RTDS™.



Fonte: DANTAS, 2009.

3.1 *HARDWARE* DO RTDS™

O *hardware* do RTDS™, é baseado na utilização de Processadores de Sinais Digitais ou *Digital Signal Processors* (DSP), com uma arquitetura de processamento, sendo desenvolvido especificamente para solução de transitórios eletromagnéticos baseados em algoritmos implementados em programas do tipo EMTP (DOMMEL, 1986).

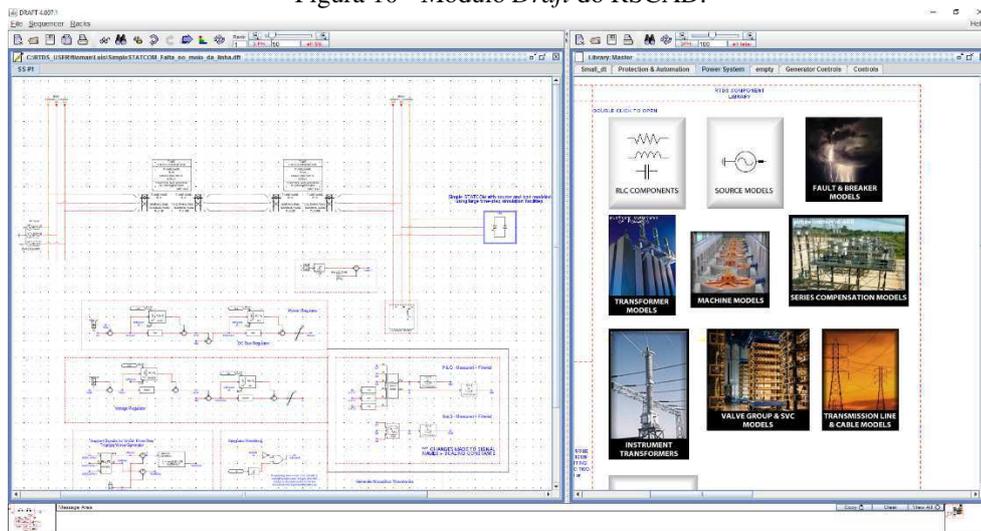
A estrutura do equipamento estudado nesse capítulo é baseada em unidades denominadas *racks*. Cada *rack* possui cartões de processamento e comunicação podendo simular sistemas elétricos com um número limitado de barras e equipamentos. Para sistemas com mais de 54 nós, que é o número máximo de nós que um *rack* pode gerar, é necessária a utilização de mais *racks*, estes trabalham em conjunto, subdividindo o sistema em várias partes (DANTAS, 2009).

Para que a funcionalidade de o RTDS™ poder se comunicar com equipamentos externos seja alcançada, são utilizados uma família de cartões do tipo *Gigabit Transceiver – Input/Output* (GT-I/O), estes cartões permitem a comunicação através do envio/recepção de sinais analógicos e digitais.

3.2 *SOFTWARE* DO RTDS™

O *software* do RTDS™ é composto por vários níveis, sendo que no nível mais alto encontra-se o RSCAD, sendo este uma interface que permite a construção de circuitos e componentes do sistema, e além disso, permite a simulação do que foi construído. O RSCAD contém alguns módulos que possibilitam a elaboração e simulação de circuitos, para a implementação deste trabalho foram utilizados os módulos *Draft*, *CBuilder* e *RunTime*.

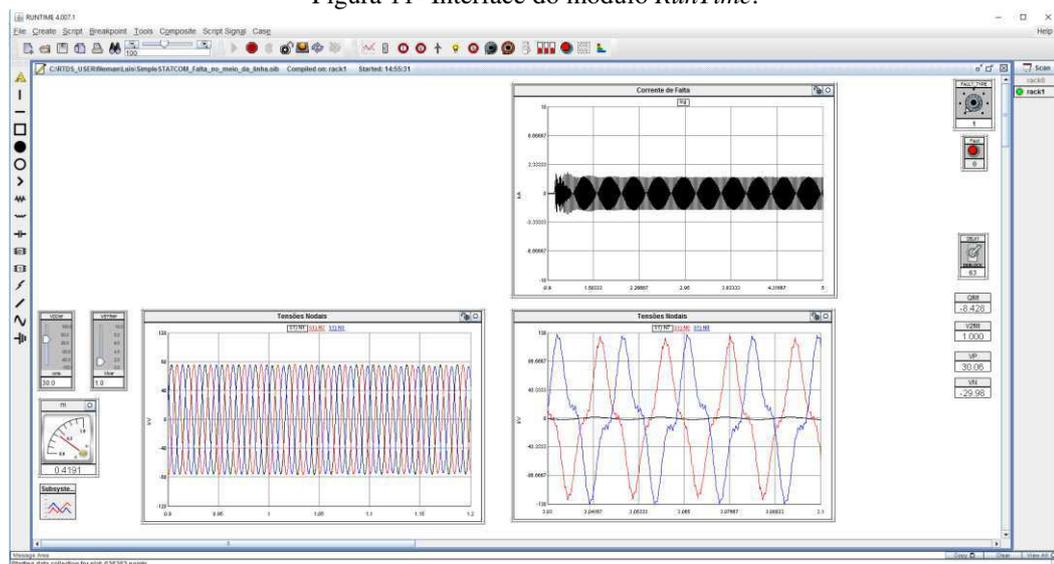
O módulo *Draft* é responsável pela construção gráfica do sistema a ser simulado, este módulo contém várias bibliotecas que contém os componentes a serem utilizados na construção do sistema elétrico, e depois de pronto o sistema é compilado pelo *software*. Na Figura 10 pode-se ver a interface do módulo *Draft* do RSCAD.

Figura 10 - Módulo *Draft* do RSCAD.

Fonte: Próprio autor.

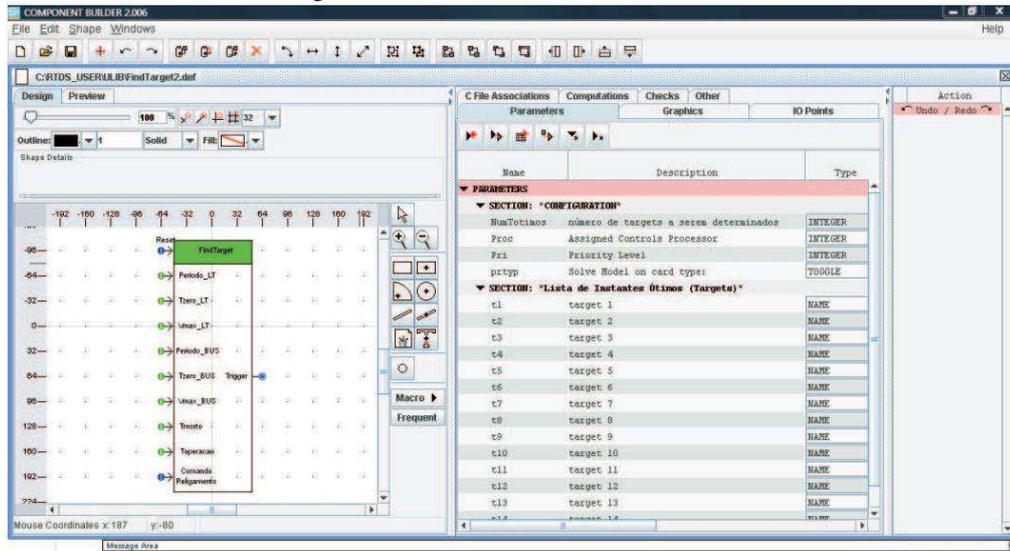
O módulo *Computer Builder (Cbuilder)* é responsável pela criação de blocos de componentes do sistema elétrico e de controle utilizando a linguagem de programação C. Esses blocos podem ser inseridos nas simulações e interagir com os elementos já existentes.

O módulo *RunTime* permite acompanhar as variáveis de interesse durante a simulação, tais como: tensão, corrente e potência, mesmo que durante o processo seja mudado a topologia do sistema, como por exemplo, mudança de posição de chaves. As Figuras 11 e 12 ilustram as interfaces dos módulos *RunTime* e *Cbuilder*, respectivamente.

Figura 11- Interface do módulo *RunTime*.

Fonte: Próprio autor.

Figura 12- Interface do módulo CBuilder.



Fonte: DANTAS, 2009.

4 SISTEMA DE CONTROLE DO STATCOM

A malha de controle do STATCOM é basicamente constituída de dois reguladores, o primeiro controla a tensão na sua saída, e o segundo controla a tensão dos capacitores que tem como função fornecer uma tensão contínua para o funcionamento do inversor de tensão.

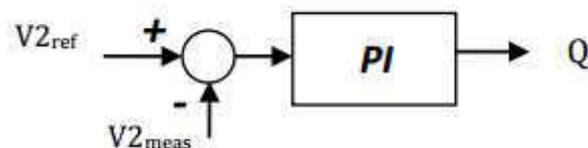
A base para o controle dessas tensões está relacionada com as expressões (2) e (3) já discutidas no Capítulo 2. Sendo que o fluxo de potência ativa entre o compensador e o sistema a ser controlado está correlacionado com o ângulo de defasagem ϕ , assim como, o fluxo de potência reativa tem correlação com as magnitudes de tensão V_1 e V_S .

4.1 REGULADOR DE TENSÃO DE SAÍDA

O objetivo desse regulador de tensão é regular o valor de tensão do barramento em que o STATCOM está conectado junto ao SEP. Sabendo que essa tensão pode ser regulada facilmente através do controle da quantidade de potência reativa absorvida ou fornecida pelo compensador ao sistema.

Na Figura 13, é apresentado o diagrama de blocos simplificado para o controle da tensão do barramento de saída, sendo que “ V_{2ref} ” representa a tensão de referência em “por unidade” no barramento, “ V_{2meas} ” a tensão medida e Q a potência a reativa.

Figura 13 - Diagrama de blocos do regulador de tensão V_2 .



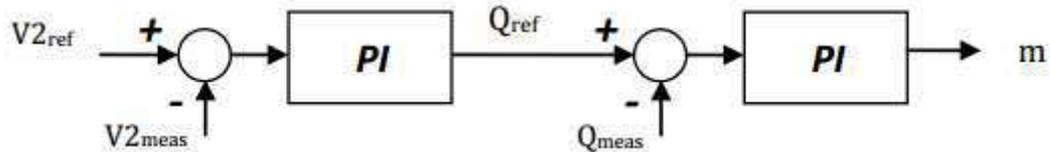
Fonte: RTDS Technologies.

No entanto, essa tensão do barramento pode ser controlada indiretamente pelo índice de modulação em amplitude m , que faz referência a modulação PWM utilizada para o correto funcionamento do chaveamento do inversor e será apresentada mais adiante.

Assim, outro controlador PI é conectado em cascata com o controlador apresentado acima, e assim, tem-se o controle da tensão de saída do STATCOM.

Na Figura 14 ilustra-se o diagrama de blocos completo para o controle da tensão.

Figura 14 - Diagrama de blocos completo do regulador de Tensão.



Fonte: RTDS Technologies.

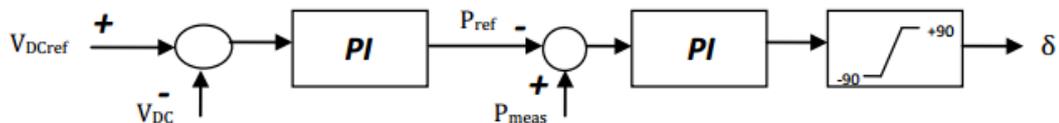
4.2 REGULADOR DE TENSÃO DOS CAPACITORES

A tensão vista no barramento composto pelos capacitores também conhecido como barramento CC é determinada pela quantidade de corrente que pode ser trocada com o barramento em comum com o sistema. Isso fornece uma relação simples entre a tensão do barramento DC, V_{DC} e a potência ativa trocada com o sistema. Para aumentar V_{DC} , injete mais potência ativa, e portanto corrente, para o STATCOM. Portanto, o barramento CC pode ser regulada pelo controle da troca potência ativa.

Entretanto, a potência ativa pode ser controlada pelo ângulo de defasagem ϕ , nesse caso chamado de δ , caso este esteja compreendido entre $\pm 90^\circ$.

Na Figura 15 ilustra-se o diagrama de blocos completo necessário para regular a tensão no barramento CC.

Figura 15 - Diagrama de blocos para o controle da tensão V_{DC} .



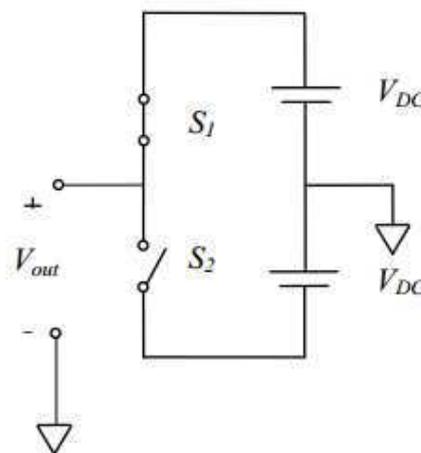
Fonte: RTDS Technologies.

4.3 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO

Dois reguladores separados foram projetados cujas saídas definem a amplitude e a fase da tensão que deve aparecer na saída do compensador para alcançar os objetivos de projeto duplos de regular a tensão do barramento de conexão em comum com o sistema e regular a potência a tensão do barramento CC. O próximo passo é gerar essa tensão desejada. PWM sinusoidal (SPWM) é usado para alcançar este objetivo.

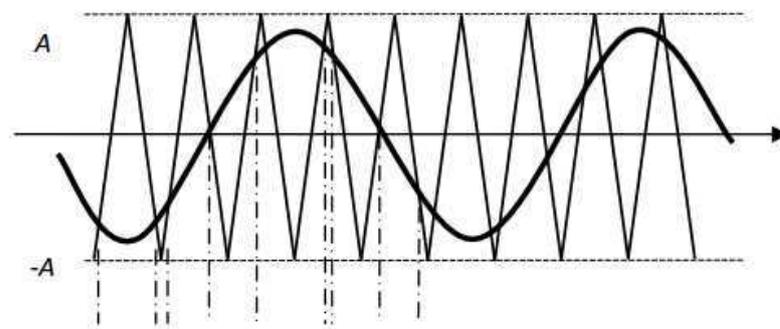
O funcionamento da modulação em PWM é basicamente a comparação entre uma onda triangular e uma onda senoidal, sendo que essa onda senoidal é formada utilizando o ângulo δ e o índice de modulação m . Nas Figuras 16 e 17, são apresentados um braço do inversor e as formas de onda triangular e senoidal, respectivamente.

Figura 16 - Braço do inversor.



Fonte: RTDS Technologies.

Figura 17 - formas de onda triangular e senoidal.



Fonte: RTDS Technologies.

Quando o valor da onda triangular exceder o da onda senoidal a chave S_1 será desligada e a chave S_2 ligada, quando o valor da onda senoidal exceder o da onda triangular a posição das chaves será invertida, sendo que o sistema em questão é trifásico, o inversor contará com mais dois braços e a onda triangular será comparada com três ondas senoidais defasadas de 120° .

Assim, na saída no conversor tem-se um sinal semelhante à uma onda quadrada, que ao passar por um filtro, eliminará os harmônicos de ordem superior fazendo com que o sinal assemelhe-se a uma onda senoidal.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

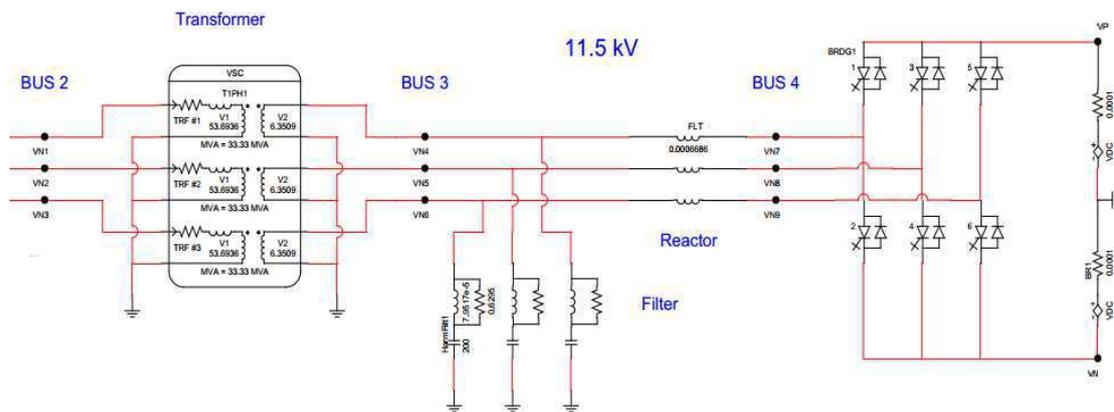
Para a realização das simulações com que diz respeito ao STATCOM, foi utilizado o RTDS encontrado no Laboratório de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Campina Grande.

Foi utilizado o STATCOM que está contido no RSCAD e também foi modelada uma linha de transmissão. Inicialmente foram aplicadas alguns tipos de faltas tanto no barramento em que o compensador está acoplado quanto no meio da linha de transmissão, e comparou-se os resultados obtidos com e sem a aplicação do STATCOM. Os módulos utilizados foram o *Draft* e o *RunTime*, fazendo possível a implementação do sistema elétricos e seus controles.

5.1 MODELO DO STATCOM

O STATCOM modelado pode ser visto na Figura 18, este pode ser encontrado no módulo *Draft* do RSCAD, sendo que todos os seus componentes podem ser encontrados na biblioteca do *software*.

Figura 18 - Modelo do STATCOM no módulo *draft*.

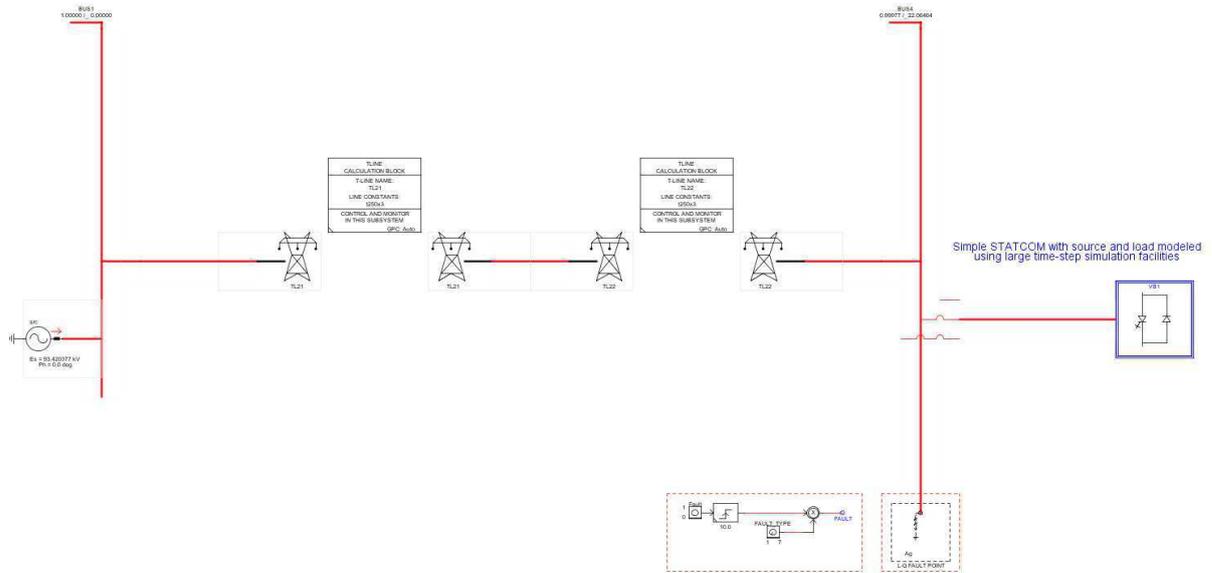


Fonte: *Small Time-Step Simulation – An Introductory Tutorial*.

O sistema é de 93 kV de tensão de linha RMS no lado de alta tensão, e 11,5 kV no lado de baixa, possuindo uma potência base de 100 MVA. Sendo que uma linha de transmissão de 200 km de comprimento está conectada pelo lado de alta tensão no barramento denominado “BUS 2”. O digrama unifilar da linha de transmissão pode ser vista na Figura 19.

Os elementos encontrados entre os pontos “BUS 3” e “BUS 4”, formam um filtro para eliminar os harmônicos contidos na saída do conversor, como já foi discutido no capítulo anterior. O conversor denominado no RSCAD de “*six pulse bridge*”, é o responsável por fazer o chaveamento e proporcionar uma saída alternada utilizando a tensão contínua dos capacitores. Sendo a tensão desses capacitores setada em 30 kV (+15 kV do ponto VP ao terra, e -15 kV no lado oposto).

Figura 19 - Diagrama unifilar da linha de transmissão junto ao STATCOM.



Fonte: Próprio autor.

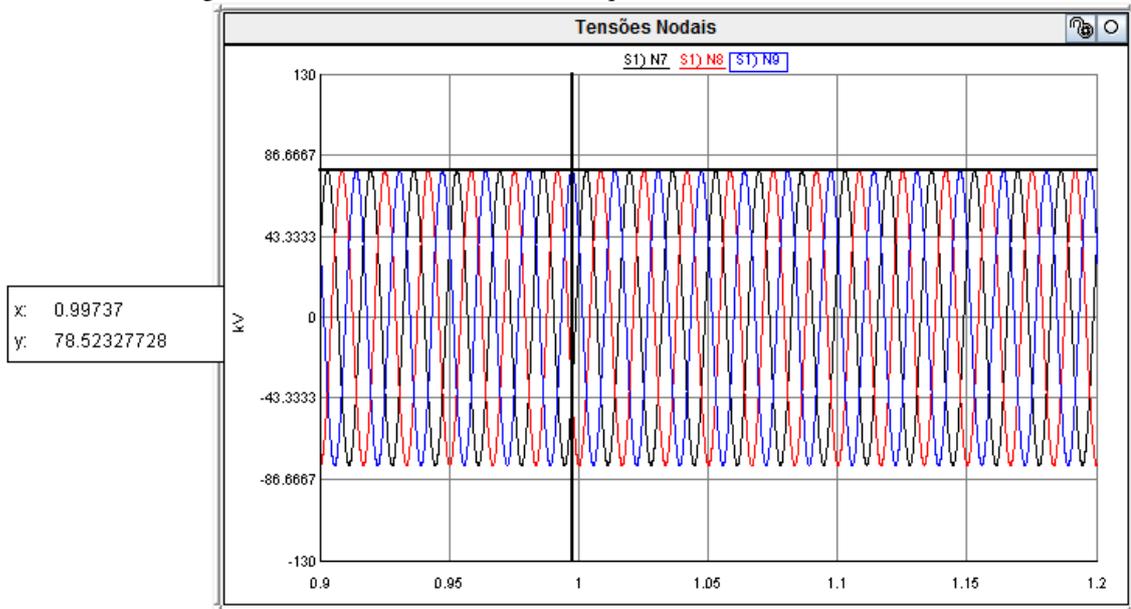
Também pode ser visto na parte inferior da Figura 16, o bloco que faz o controle da falta aplicada ao barramento.

5.2 RESULTADOS

O intuito desse trabalho é de analisar como o STATCOM se comporta quando há uma falta no sistema de potência. Assim, foram criadas algumas situações, inicialmente, uma falta fase-terra com resistência de falta igual a 1,0 ohm são ocasionadas no meio da linha de transmissão, em seguida o mesmo tipo de falta é ocasionada para resistência de falta 50,0 ohms. Sendo que essas faltas acontecem tanto para quando o STATCOM está presente ou não no sistema.

Na Figura 20, tem-se as tensões em regime no barramento em que o compensador está conectado e, pode-se ver que os valores de pico das tensões são iguais a 78,5 kV.

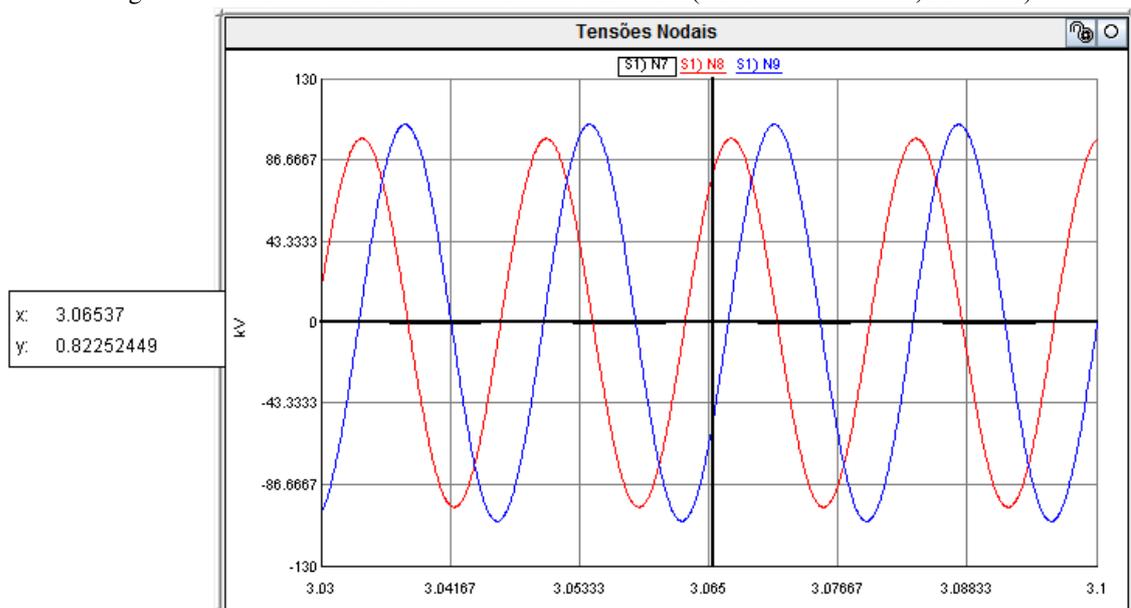
Figura 20 - Tensões no barramento em que o STATCOM está conectado.



Fonte: Próprio autor.

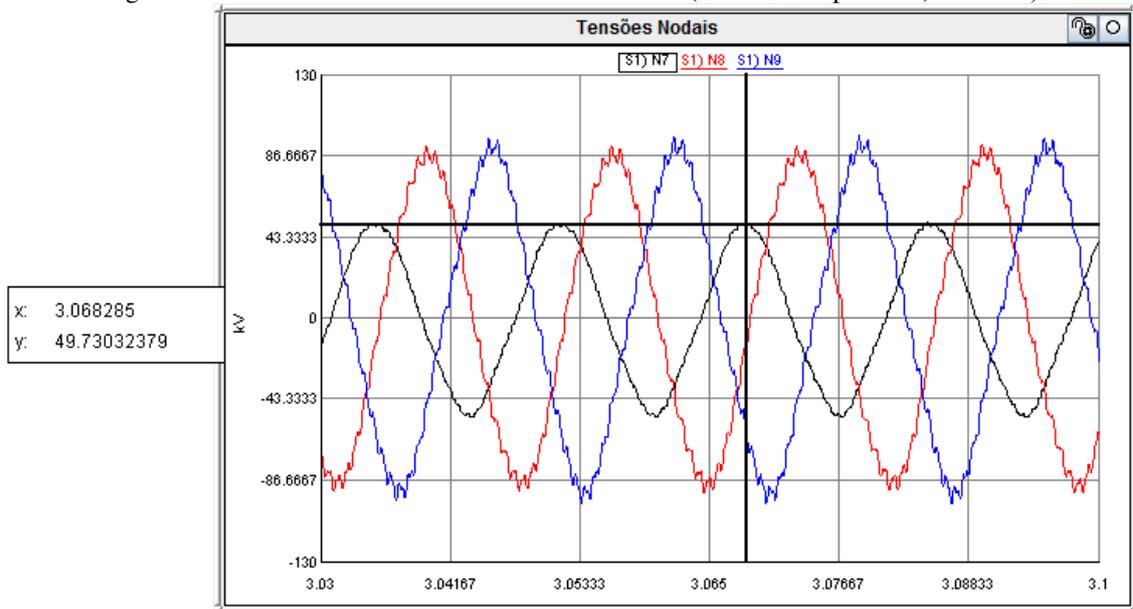
Nas Figuras 21 e 22, são ilustradas as tensões no barramento de conexão do STATCOM, durante o acontecimento de uma falta com resistência de $1,0 \Omega$ no meio da linha de transmissão, para quando o compensador estático está ausente e presente no sistema, respectivamente. As tensões de pico para quando o STATCOM está ausente nas fases A, B e C são, respectivamente, 822 V, 98,32 kV e 105,74 kV. Para quando o STATCOM está presente no sistema os picos de tensões são, para a fase A 49,73 kV, fase B 91,84 kV e fase C 95,40 kV.

Figura 21 - Tensões durante a ocorrência de uma falta (STATCOM ausente, $R_f = 1 \Omega$).



Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Tensões durante a ocorrência de uma falta (STATCOM presente, $R_f = 1 \Omega$).

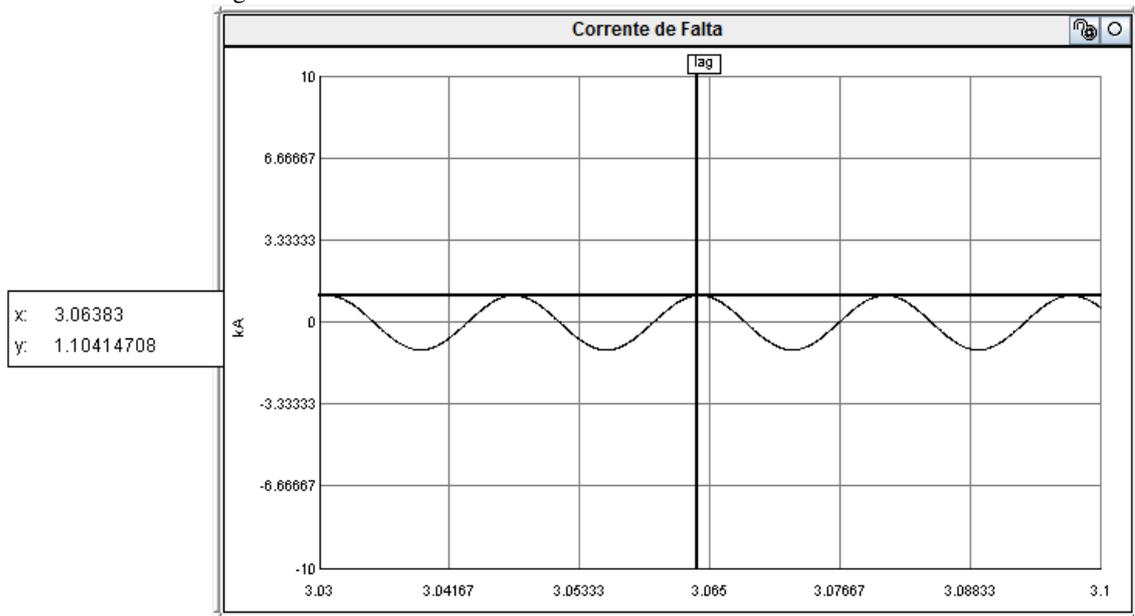


Fonte: Próprio autor.

As Figuras 23 e 24 contêm os perfis de tensões no mesmo barramento em que o STATCOM está conectado durante a ocorrência de uma falta ($R_f = 50 \Omega$). Percebe-se que durante o acontecimento da falta e com o STATCOM ausente do sistema os níveis de tensões para as fases A, B e C são, respectivamente, 40,95 kV, 101,22 kV e 87,35 kV. Já para quando o STATCOM está presente no sistema esses níveis de tensões passam para 71,07 kV, 81,84 kV e 86,02 kV.

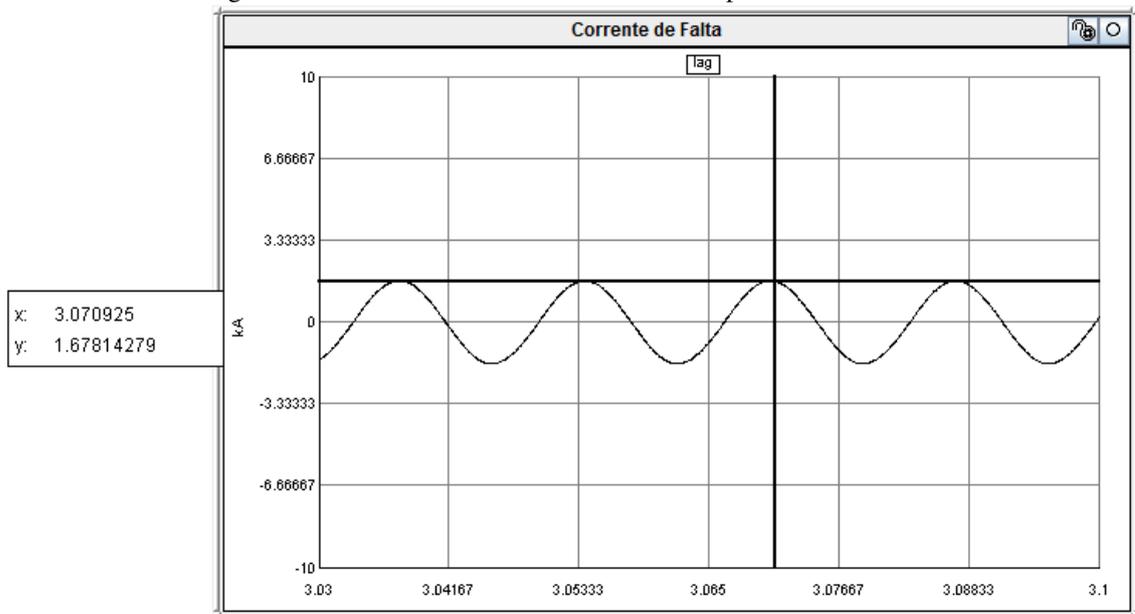
Pela análise das Figuras 21 a 24, que o compensador estático modelado desempenha sua função de levar os níveis tensões do barramento em que está conectado para valores próximos à 78,5 kV (valor de regime) durante a falta. No entanto, por uma falta ser uma situação crítica para o sistema o STATCOM não conseguiu manter os valores de tensão em seu barramento em um mesmo nível que a tensão de regime.

Figura 25 - Corrente de falta com o STATCOM ausente no sistema.



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Corrente de falta com o STATCOM presente no sistema.



Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÃO

Os compensadores estáticos de potência provém um maior aproveitamento do sistema de transmissão, através da compensação de reativos e harmônicos presentes nas cargas. Podendo existir uma ampla diversidade de aplicação desses equipamentos, sendo estes imprescindíveis na flexibilização dos sistemas elétricos.

Por meio dos resultados apresentados, o STATCOM presente no *software* do RTDS™ desempenha sua função de levar os níveis de tensão do barramento no qual está conectado para níveis próximos ao de regime durante um distúrbio no sistema, para quando esse distúrbio não acontece no barramento no qual está localizado o compensador.

No entanto, detectou-se que o desempenho do compensador utilizado pode ainda ser melhorado. Dando espaço para que trabalhos futuros possam aprimorar o filtro utilizado na saída do conversor de tensão, utilizar de outras topologias do VSC com o intuito de prover um sinal de tensão mais limpo para o sistema, e também desenvolver diferentes estratégias de controle para que o equipamento responda a algum distúrbio de forma mais rápida.

Outro ponto importante a ser destacado, foi o fato de diversas disciplinas cursadas na graduação, tais como, Sistemas Elétricos, Eletrônica de Potência e Operação e Controle de Sistemas Elétricos, terem sido de muita importância para que este trabalho tenha sido realizado.

REFERÊNCIAS

- AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson H.; AREDES, Mauricio. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. John Wiley & Sons, 2007.
- AREDES, Mauricio; HAFNER, Jurgen; HEUMANN, Klemens. **Three-phase four-wire shunt active filter control strategies**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 12, n. 2, p. 311-318, 1997.
- BOYS, J. T.; GREEN, A. W. “*Current-forced Single-phase Reversible Rectifier.*” IEEE Proceedings, Vol. 136, pp. 205-211, September 1989.
- CAVALIERE, Carlos André Carreiro. **Análise de STATCOM operando em sistemas desbalanceados**. 2001. Tese de Doutorado. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DANTAS, K. M. C. “**Introdução ao real-time digital simulator rtds.**” 2009.
- DENG, Yongan. **A comparison between STATCOMs using PWM voltage control and hysteresis current control (HCC)**. 2007. Tese de Doutorado. Concordia University.
- DOMMEL, Hermann W. **Electromagnetic Transients Program: Reference Manual:(EMTP theory book)**. Bonneville Power Administration, 1986.
- ELGERD, Olle Ingemar. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica**. McGraw-Hill do Brasil, 1976.
- FRONTIN, Sergio O. et al. **Equipamentos de alta tensão–prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Finatec UNB, 1ª Edição, Brasília, 2013.
- GANESH, Aman; DAHIYA, Ratna; SINGH, G. K. **Enhanced parametric STATCOM decoupled current control scheme for voltage regulation**. In: Power Systems Conference (NPSC), 2016 National. IEEE, 2016. p. 1-6.
- GYUGYI, Laszlo. **Dynamic compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 2, p. 904-911, 1994.
- HINGORANI, Narain G. **Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems**. Proceedings of the IEEE, v. 76, n. 4, p. 481–482, 1988.
- HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Laszlo; EL-HAWARY, Mohamed. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. New York: IEEE press, 2000.
- LACERDA, M. V. M. **Análise de STATCOM Baseado em VSI Multipulso e Quasi Multipulso Visando Simulação em Tempo Real**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Outubro 2001.
- MORI, Shosuke et al. **Development of a large static var generator using self-commutated inverters for improving power system stability**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 8, n. 1, p. 371-377, 1993.
- OSKOUI, A. et al. **Holly STATCOM-FACTS to replace critical generation, operational experience**. In: IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, Texas. 2006. p. 1393-1398.
- RAO, Pranesh; CROW, M. L.; YANG, Zhiping. **STATCOM control for power system voltage control applications**. IEEE Transactions on power delivery, v. 15, n. 4, p. 1311-1317, 2000.
- RODRIGUES, J. M. F. **Análise e modelação de dispositivos FACTS aplicados nas redes de transporte e de distribuição de energia eléctrica**. 2010, Porto:[sn]. XXII, 161 p.
- RTDS Technologies. **Small Time-Step Simulation: An Introductory Tutorial**.

- SANTOS, C. H. R. R. **Influência do STATCOM na estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG, 2003.
- SCHAUDER, Collin et al. **Development of a/spl plusmn/100 MVar static condenser for voltage control of transmission systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 3, p. 1486-1496, 1995.
- SCHAUDER, Collin et al. **AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the/spl plusmn/160 MVA STATCOM (phase I)**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 4, p. 1530-1535, 1998.
- SINGH, B. et al. **Static synchronous compensators (STATCOM): a review**. IET Power Electronics, v. 2, n. 4, p. 297-324, 2009.
- SUMI, Yoshihiko et al. **New static var control using force-commutated inverters**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, n. 9, p. 4216-4224, 1981.
- PINA, A, P. **Comparação entre Modelos do Dispositivo FACTS STATCOM para o Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Maio 2010.
- AREDES, M.; WATANABE, E. H. **Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações-Filtros Ativos e FACTS**. In: CBA98-XII Congresso Brasileiro de Automática. 2003.