

QUALIDADE DE ENERGIA NAS LINHAS DE TRANSMISSÕES: UM ESTUDO SOBRE O DISPOSITIVO STATCOM

ENERGY QUALITY IN TRANSMISSION LINES: A STUDY ON THE STATCOM DEVICE

Caio Giovani Silva dos Santos¹

Edgar Alves Neto²

Lucas Antônio Alves de Godoi³

RESUMO

Este artigo sobre a área de qualidade da Engenharia Elétrica tem como proposta apresentar meios tecnológicos, a fim de resolver problemas nas linhas de transmissão, em que elas sofrem muitas perdas pela alta demanda em que o mercado energético se encontra. Os FACTS, do termo em inglês Flexible AC Transmission Systems, são sistemas de controle de fluxos de potência, que conseguem controlar as restrições de transmissão e de potência relacionadas com a estabilidade. O presente trabalho contempla o uso de um compensador estático síncrono o STATCOM, que controla por sua vez potência reativa, capacitiva ou indutiva, a fim de aumentar a margem de estabilidade do sistema elétrico. Em operação, o STATCOM atua como compensador estático de reativos, que é conectado em shunt com a linha de transmissão, e a sua corrente de saída capacitiva ou indutiva pode ser controlada, independente da tensão alternada do sistema. O STATCOM regula a tensão no seu terminal por meio do controle da quantidade de potência reativa injetada ou absorvida do sistema de potência. Para tanto, foram feitas modelagens matemáticas dos componentes do compensador conectado a um barramento infinito através de uma linha de transmissão.

¹ Graduando em Engenharia Elétrica no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: caiogiovani@hotmail.com

² Graduando em Engenharia Elétrica no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: edgarneto_cs@hotmail.com

³ Docente no Curso de Engenharia Elétrica no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: luksg@hotmail.com

Palavras-chave: FACTS, Linhas de Transmissão, Qualidade de Energia, STATCOM

ABSTRACT

This paper from the quality area of Electrical Engineering proposes to present technological means in order to solve problems in the transmission lines, where they suffer many losses due to the high demand in the energy market. Flexible AC Transmission Systems (FACTS) are power flow control systems that can control stability-related transmission and power constraints. The present work contemplates the use of a STATCOM synchronous static compensator, which in turn controls reactive, capacitive or inductive power, in order to increase the stability margin of the electrical system. In operation the STATCOM acts as a static reactive compensator that is shuntly connected to the transmission line, which its capacitive or inductive output current can be controlled regardless of the alternating voltage of the system. STATCOM regulates the voltage at its terminal by controlling the amount of reactive power injected or absorbed from the power system. For this, mathematical modeling of the compensator components connected to an infinite bus through a transmission line was made.

Keywords: FACTS, Transmission lines, Energy quality. STATCOM

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais meios de transporte de energia elétrica no Brasil e no mundo são as Linhas de Transmissão. Sua função é levar a energia elétrica do centro de geração aos centros de cargas, geralmente separados por longas distâncias, com o mínimo de perdas possíveis e com o máximo de potência fornecido.

Grandes centros precisam desse meio para que possam realizar suas atividades de forma eficaz e ter o consumo de energia elétrica, como: metrópoles, indústrias, hospitais. Estas linhas de transmissão são capazes de levar energia elétrica até mesmo a pontos remotos e de difícil acesso ou locomoção, por isso é o principal meio de transporte de energia.

Uma linha de transmissão é formada, basicamente, por condutores, torres, cabos para-raios e isoladores. O circuito de uma linha pode ser simples, duplo ou múltiplo. Por esse formato as linhas são capazes de transmitir uma carga elevada de tensão podendo atingir até 765 KV (Quilovolts), que neste caso é chamada de linhas de ultra-alta-tensão (PINTO, 2014).

Porém com a globalização em massa, a alta demanda de energia elétrica houve um impacto no setor energético, e até mesmo essas transmissões de grandes tensões, para os grandes centros, não estavam suportando suprir essa demanda. Precisando então de uma flexibilização do sistema elétrico, ou seja, o auxílio de tecnologia para controlar estas altas tensões e monitorar o fluxo de potência, garantindo então uma qualidade de energia nas linhas de transmissão (POMILIO, 2009).

Para isso um sistema foi implantado, usando a eletrônica de alta potência afim de atender esta solução tecnológica. Os chamados FACTS (Flexible AC Transmission System); abriu um enorme campo para aplicação da tecnologia de controle de alta tensão, ao mesmo tempo permitiu utilizar melhor a infraestrutura de transmissão já disponível (LOPEZ, 2013).

Porém será estudado um dispositivo FACTS mais a fundo, o chamado STATCOM que é um Compensador Estático Síncrono. Esse dispositivo se destaca por sua rapidez na resposta do controle da tensão e por sua eficiência.

Este artigo apresenta uma solução para os problemas encontrados nos sistemas elétricos, especificamente nas linhas de transmissão. Com a ajuda da eletrônica de potência os FACTS controlam e flexibilizam as altas tensões que são transmitidas para os grandes centros mundiais. E para isso será observado a análise de operação do STATCOM.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O conceito FACTS nasceu em 1988 quando Hingorani (1988) publicou o artigo intitulado “Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems” propondo o uso extensivo de Eletrônica de Potência ou, como ele chamou, “Eletrônica de Mega-Watt” para o controle de sistemas de

potência CA (Corrente Alternada). A idéia básica de Hingorani era obter, no futuro, sistemas CA com alto nível de flexibilidade. Estas idéias foram baseadas no uso de tiristores de potência (Baliga, 1995). E também segundo Pomilio e Deckmann (2009) A tecnologia eletrônica FACTS permite controlar diretamente a reatância equivalente da linha através de compensação série.

2.1 Controladores FACTS

O conceito deste dispositivo é o uso de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência e que permite para o sistema uma maior flexibilidade de controle. Esta flexibilidade é entendida como a capacidade de rápida e contínua alteração dos parâmetros (nível de tensão, impedâncias de transferências e ângulo de transmissão) que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema elétrico (LOPEZ, 2013).

2.2 Histórico STATCOM

O STATCOM e seu desenvolvimento começou em 1976, devido ao trabalho de um grupo de estudos japonês ligados à Kansay Electric Co. Ltd. e a Mitsubishi Electric Corporation. O desenvolvimento deste novo equipamento utilizava inversores compostos por tiristores e complexos circuitos auxiliares para comutação forçada, tinha como objetivo aumentar a capacidade de corrente de compensação. Também, visava a redução do tamanho dos compensadores.

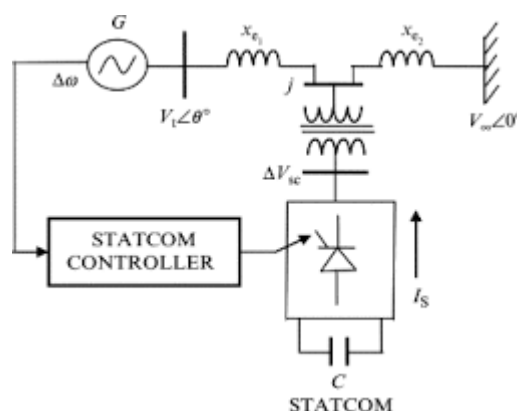
2.3 Descrição do STATCOM

É um dispositivo baseado em conversor de fonte de tensão. Ele consiste de um capacitor carregado com uma tensão CC (Corrente Contínua), que fornece a tensão de entrada para um conversor de fonte de tensão. O conversor alimenta uma corrente reativa na rede, o controle dessa corrente reativa, é obtido o controle da tensão.

A corrente reativa de saída do STATCOM não é limitada às condições de baixa ou de alta tensão, a corrente de saída é somente limitada pelas avaliações do conversor e não depende da tensão do sistema. Isso significa que o suporte de reativos, durante as condições extremas de tensão, é muito melhor do que em outros casos de dispositivos FACTS. Também, a sua resposta de controle é muito rápida e eficaz, pois esse controle é limitado pela frequência de chaveamento do conversor de fonte de tensão.

O capacitor do conversor de fonte de tensão representa um armazenador de potência ativa, por isso uma corrente ativa pode também ser injetada na rede. Assim, esse dispositivo pode ser usado para o controle de potência ativa, mas para deve ser instalada uma bateria no lado CC.

FIGURA 1 – Esquema básico do STATCOM.



FONTE: Santos; Montes, 2009

2.4 Funcionamento

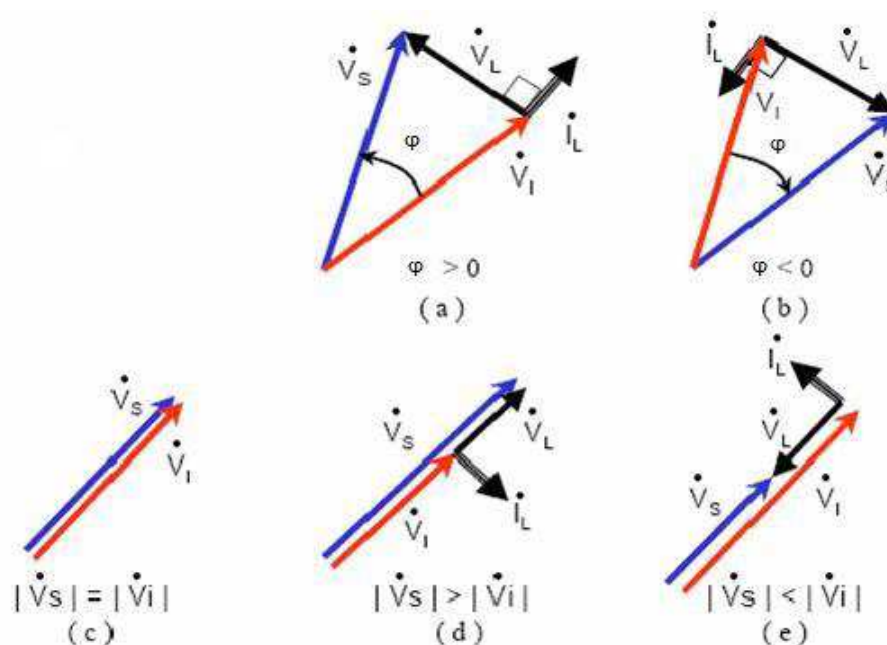
O princípio de funcionamento do STATCOM pode ser descrito considerando um equivalente de Thevenin, representando o sistema através de uma tensão V_S e uma reatância X_L , conectado ao mesmo, com uma tensão de referência V_I . Os fluxos de potência ativa e reativa podem ser representados, matematicamente, pelas seguintes equações:

$$P_S = \frac{V_S \cdot V_I}{X_L} \cdot \sin\varphi$$

$$Q_S = \frac{V_S^2}{X_L} - \frac{V_S \cdot V_I}{X_L} \cdot \cos\varphi$$

Representando, fasorialmente, as tensões e correntes do sistema e do STATCOM, verificam-se cinco possibilidades dependendo do módulo e fase de cada tensão:

FIGURA 2 - Diagramas fasoriais das tensões e correntes do sistema elétrico e do STATCOM.



FONTE: Santos; Montes, 2009

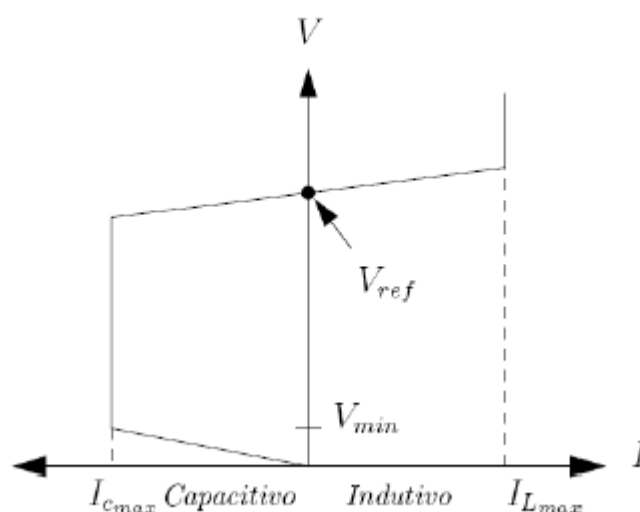
Considerando φ como o ângulo de defasamento entre as tensões do sistema e do STATCOM e analisando os diagramas da figura 2, tem-se:

- Quando $|V_S| = |V_I|$ e $\varphi \neq 0^\circ$, haverá fluxo de potência ativa entre o sistema e o STATCOM;

- Quando $|V_S| = |V|$ e $\varphi = 0^\circ$, não haverá nem fluxo de potência ativa nem fluxo de potência reativa entre o sistema e o STATCOM;

Considerado as conclusões relacionadas aos diagramas fasoriais representados anteriormente, uma fonte de tensão pode controlar o fluxo de potência ativa, direcionando-o da melhor forma que convém para obter maior eficiência na operação do sistema, através do controle de fase e, através do controle das amplitudes (módulos) das tensões, ela pode controlar a potência reativa no sistema, ou seja, quando as tensões do sistema e do STATCOM estão em fase ($\varphi = 0^\circ$), não há fluxo de potência ativa em nenhum sentido, mas quando essas tensões possuem módulos diferentes, há fluxo de potência reativa entre ambos (Santos; Montes, 2009).

FIGURA 3 - Curva característica V_xI do STATCOM.



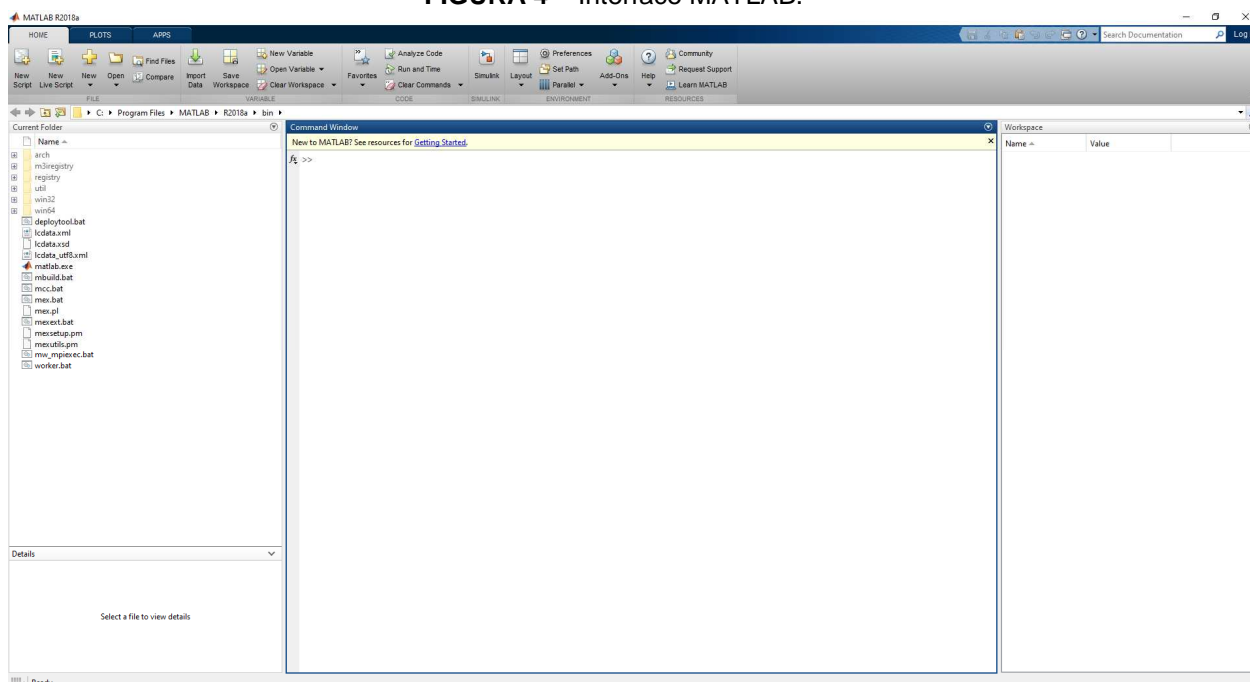
FONTE: Santos; Montes, 2009

3 METODOLOGIA

Neste trabalho, foi utilizado um software chamado MATLAB para fazer a simulação de uma linha de transmissão, nesta linha de transmissão utilizamos o STATCOM para solucionar os problemas que a mesma apresenta. Este software é uma poderosa ferramenta matemática, seu processamento é composto em suma por equacionamentos matriciais que lhe permite trabalhar com programação de alto nível por linguagem de blocos através do SIMULINK, que foi usada nesta simulação, também lhe permite trabalhar com uma linguagem derivada do C/C++ em suas interfaces de códigos. O Command Window que é uma de suas interfaces se assemelha a um terminal, onde você consegue gerenciar, desenvolver e "codar". O Script, é sua outra interface que é um ambiente de desenvolvimento muito similar às IDE's de C/C++, te possibilitando criar estruturas e funções simples e complexas.

Sua sintaxe é um pouco diferenciada, sua flexibilidade e sua capacidade de expansão, utilizando as conhecidas ToolBoxes, permite ao MatLab se tornar especialista em diversas áreas de conhecimento, desde análise de elementos finitos, inteligência artificial e análise de sinais até a depuração de processamento em tempo real (SALVADOR, 2016).

FIGURA 4 – Interface MATLAB.

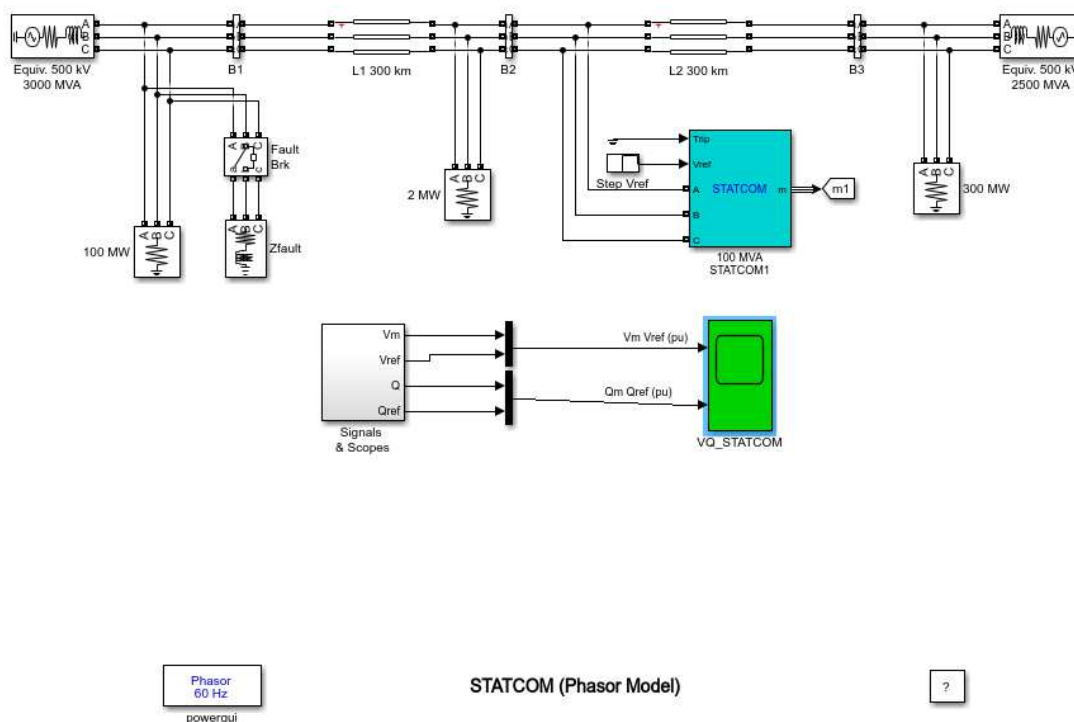


FONTE: Criação própria.

Simulação

Como apresentado na Figura 5 abaixo, mostra um compensador síncrono STATCOM usado para a regulação de tensão do ponto médio de uma linha de transmissão de 500 kV através da compensação de reativos.

FIGURA 5 – Circuito da linha de transmissão.



FONTE: MATLAB.

O Compensador Síncrono Estático (STATCOM) é um dos principais dispositivos FACTS. Com base em um conversor de voltagem, o STATCOM regula a voltagem do sistema absorvendo ou gerando energia reativa. Baseado em tiristor, a corrente de saída STATCOM (indutiva ou capacitiva) pode ser controlada independentemente da tensão do sistema CA.

A rede elétrica consiste em dois equivalentes de 500 kV (respectivamente 3000 MVA e 2500 MVA) conectados por uma linha de transmissão de 600 km. Quando o STATCOM não está em operação, o fluxo de energia "natural" na

linha de transmissão é de 930 MW do barramento B1 a B3. O STATCOM está localizado no ponto médio da linha (barramento B2) e tem uma classificação de +/- 100MVA. Este STATCOM é um modelo fasorial de um STATCOM PWM de três níveis típico. Ao abrir a caixa de diálogo STATCOM e selecionar "Exibir dados de energia", verá que o modelo representa um STATCOM com uma tensão nominal no link CC de 40 kV com uma capacitância equivalente a 375 uF. No lado AC, sua impedância equivalente total é de 0,22 pu em 100 MVA. Essa impedância representa a reatância de vazamento do transformador e o reator de fase da ponte IGBT de um PWM STATCOM real.

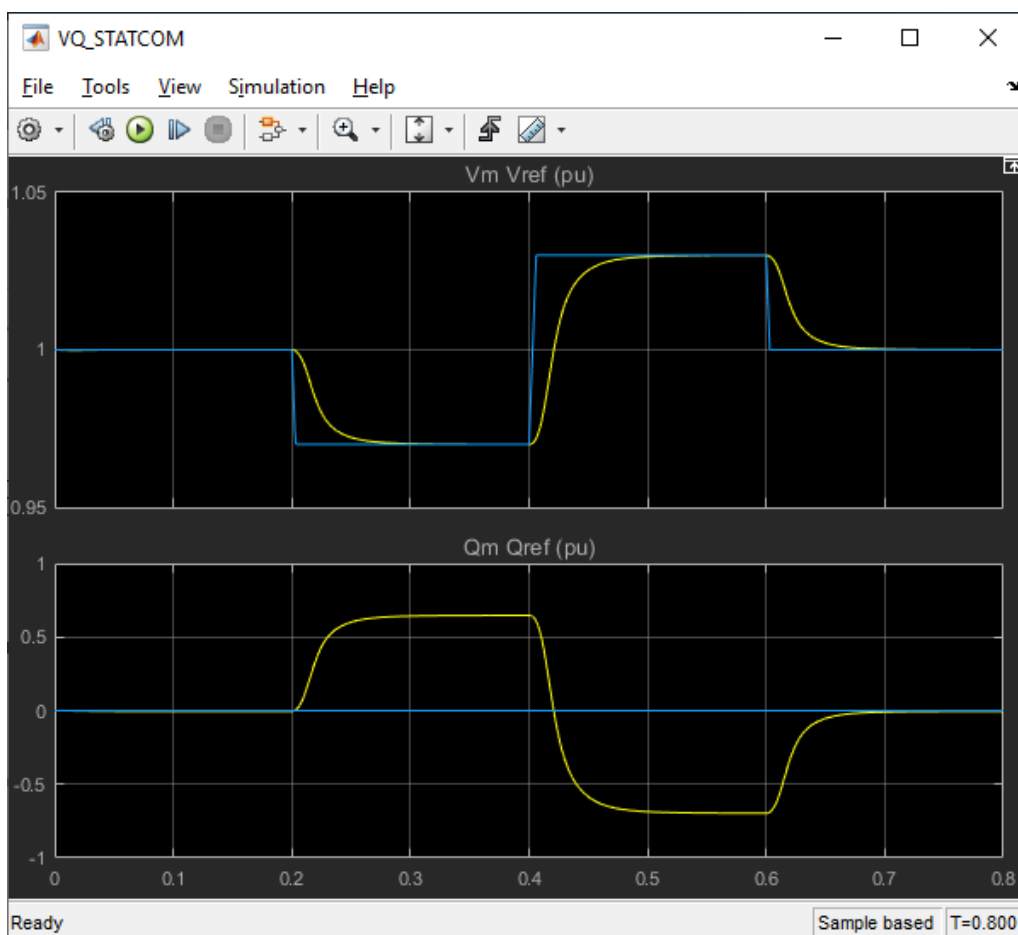
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Verificando a resposta dinâmica do nosso modelo. Aberto a caixa de diálogo STATCOM e selecionando "Exibir parâmetros de controle". Foi verificado que o "Modo de operação" está definido como "Regulação de tensão" e que "Controle externo da tensão de referência V_{ref} " está selecionado. Além disso, o parâmetro "droop" foi definido como 0 e o "Ganho do regulador de vac" para 5 (ganho proporcional K_p) e 1000 (ganho integral K_i). Ao abrir o bloco "Step V_{ref} " (o bloco vermelho do timer conectado à entrada " V_{ref} " do STATCOM). Este bloco deve ser programado para modificar a tensão de referência V_{ref} da seguinte forma: Inicialmente, V_{ref} é definido como 1 pu; em $t = 0,2$ s, V_{ref} é reduzido para 0,97 pu; então em $t = 0,4$ s, V_{ref} é aumentado para 1,03; e, finalmente, a 0,6 s, V_{ref} volta a 1 pu.

Executando a simulação e observando o escopo "VQ_STATCOM". O primeiro gráfico exibe o sinal V_{ref} (traço azul) junto com a tensão de sequência positiva medida V_m no barramento STATCOM (traço amarelo). O segundo gráfico exibe a potência reativa Q_m (traço amarelo) absorvida (valor positivo) ou gerada (valor negativo) pelo STATCOM. O sinal Q_{ref} (traço azul) não é relevante para a nossa simulação porque o STATCOM está em "Regulação de tensão" e não em "Controle de var".

Observando o sinal Q_m , podemos determinar que a constante de tempo em circuito fechado do sistema é de cerca de 20 ms. Essa constante de tempo depende principalmente da força do sistema de energia no barramento B2 e dos ganhos programados do Regulador de Vac do STATCOM. Observando os sinais V_m e V_{ref} , pode ser visto que o STATCOM funciona como um regulador de tensão eficaz. Isso ocorre devido à inclinação do regulador (inclinação de regulação) estar em 0 pu, ou seja, estar nula. Para uma determinada faixa capacitiva/indutiva máxima, essa inclinação é usada para estender a faixa de operação linear do STATCOM e também para garantir o compartilhamento automático de carga com outros compensadores de tensão (se houver).

FIGURA 6 – Grafico STATCOM.



FONTE: Criação própria.

5 CONCLUSÃO

Após ser feito o levantamento teórico do tema abordado neste artigo, foram feitas as simulações afim de avaliar o comportamento do STATCOM no sistema elétrico proposto.

As simulações do STATCOM conectada ao barramento infinito através das linhas de transmissão, permitiram encontrar uma compensação de potência reativa após o sistema sofrer uma falta, sofrida por conta de uma carga proposta a linha de transmissão.

A compensação reativa resulta em uma regulação de tensão ao sistema, e foi observado perfeitamente a tensão sendo regulada. O tempo de abertura para essa compensação foi de 0,2 segundos, ou seja, o tempo de resposta do STATCOM é bem eficaz para que não haja nenhum tipo de dano naquele ponto onde se encontra conectado.

O STATCOM garantiu o aumento da margem de estabilidade do sistema diante das condições simuladas, portanto conclui-se que o dispositivo consegue regular a tensão perdida e deixar com que fique bem próximo da tensão de referência. Caso esteja configurado com os parâmetros adequados para o seu local de instalação.

REFERÊNCIAS

MATLAB. **STATCOM (modelo fasorial)**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/statcom-phasor-model.html>>. Acesso em: 28 out. 2019.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Qualidade na Energia Elétrica: Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções**. 2. Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

PINTO, Milton de Oliveira. **ENERGIA ELÉTRICA: Geração, transmissão e sistemas interligados**. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

POMILIO, José Antenor; DECKMANN, Sigmar Maurer. **CONDICIONAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA E DISPOSITIVOS FACTS**. UNICAMP. 2009.

RASHID, Muhammad H. **Power electronics, circuits, devices, and applications**. Tradução Leonardo Abramowicz; revisão técnica Carlos Marcelo de Oliveira Stein. 4. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

SALVADOR. **O que é MATLAB?**. 2016. Disponível em: <<https://www.portalgsti.com.br/2016/08/o-que-e-o-matlab.html>>. Acesso em: 28 out. 2019.

SANTOS, Kristian Pessoa dos; MONTES, Augusto César Sousa Braga. **Compensação de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência**. Universidade Estadual do Piauí, 2009.

Recebido em 4/12/2019

Aprovado em 16/12/2019