
MODELAGEM E ANÁLISE DINÂMICA DE DISPOSITIVOS DSTATCOM USANDO O SIMPOWERSYSTEMS PARA MATLAB/SIMULINK

Walmir Freitas*

walmir@dsee.fee.unicamp.br

André Morelato França*

morelato@dsee.fee.unicamp.br

*Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas
Caixa Postal 6101, 13083-852, Campinas, São Paulo, Brasil

ABSTRACT

This work presents a study about dynamic modeling and analysis of DSTATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) devices. The objectives are to analyze the dynamic performance of these devices and mainly present simplified and detailed models. Such study is carried out utilizing the SimPowerSystems for use with Matlab/Simulink. The paper is written as a tutorial, thus, all necessary information to implement the models is explicitly presented. Two application examples of the models developed are discussed. In the first one, the detailed model model is employed to evaluate the influence of the capacitor size on the harmonic generation, whereas a study about the influence of a DSTATCOM on the stability performance of induction generators connected to distribution systems is carried out using the simplified model.

KEYWORDS: Custom Power, DSTATCOM, dynamic simulation, SimPowerSystems.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre modelagem e análise dinâmica de dispositivos tipo DSTATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*). Os objetivos são analisar o desempenho dinâmico desses equipamentos e sobretudo introduzir modelos computacionais detalhados e simplificados. Os modelos são implementados utilizando o pacote SimPowerSystems para uso com o Matlab/Simulink em razão da grande aceitação desta ferramenta computacional no ambiente acadêmico. O desenvolvimento é realizado na forma de um tutorial para facilitar

o uso desses modelos por pesquisadores, educadores e estudantes. Dois exemplos de aplicação desses modelos são apresentados. O modelo detalhado é empregado para analisar o impacto do dimensionamento do capacitor de corrente contínua na geração de harmônicos pelo DSTATCOM. Ao passo que um estudo sobre a influência de um DSTATCOM na estabilidade de geradores de indução conectados diretamente em redes de distribuição é realizado usando o modelo simplificado.

PALAVRAS-CHAVE: Custom Power, DSTATCOM, SimPowerSystems, simulação dinâmica.

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de componentes de eletrônica de potência e de técnicas de controle e supervisão, diversos novos equipamentos baseados em eletrônica de potência têm sido propostos para uso em redes de distribuição com o objetivo de melhorar a qualidade de energia elétrica e a confiabilidade desses sistemas. Tais equipamentos são denominados genericamente como dispositivos *Custom Power* (Hingorani, 1995; Song e Johns, 1999; Acha et al., 2002; CIGRÉ Working Group 14.31, 2002). Entre os diversos equipamentos existentes e propostos, aqueles que empregam o conceito de conversor fonte de tensão são os que apresentam maior flexibilidade e rapidez de resposta. O conversor fonte de tensão, de forma simplificada, é um equipamento que conecta um circuito de corrente contínua a um circuito de corrente alternada por intermédio de chaves autocomutadas, e.g. GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*) e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). A tensão obtida na saída do conversor, lado de corrente al-

ternada, pode ser ajustada através do controle dos ângulos de disparo e de corte das chaves. Controlando-se a tensão alterada na saída do conversor é possível realizar diversas modificações no desempenho dos sistemas de distribuição. Um equipamento pertencente a essa classe de dispositivos, cuja utilização tem aumentado recentemente, é o DSTATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*). Por conseguinte, esse é o dispositivo escolhido para ser analisado neste trabalho.

Antes da instalação desses equipamentos em uma determinada rede de distribuição de energia elétrica, é necessário realizar uma série de estudos dinâmicos. Diversas ferramentas de simulação de transitórios eletromagnéticos são adequadas para essa tarefa, por exemplo, ATP, PSCAD/EMTDC, SimPowerSystems. O SimPowerSystems é uma ferramenta computacional relativamente recente que acompanha, na forma de um *Blockset*, a plataforma computacional Matlab/Simulink (TransEnergie Technologies Inc., 2002). É inegável que o Matlab/Simulink tem se tornado bastante popular no ambiente acadêmico em razão da grande flexibilidade e facilidade de uso. Portanto, neste trabalho, modelos dinâmicos trifásicos de dispositivos DSTATCOM são implementados utilizando o SimPowerSystems. Tais modelos são desenvolvidos na forma de um tutorial. Todos os detalhes e diagramas são apresentados para possibilitar a utilização imediata dos modelos por outros pesquisadores, educadores e estudantes.

Neste trabalho, analisa-se um DSTATCOM empregado para controle de tensão ou de fator de potência. Além disso, o conversor do DSTATCOM é diretamente controlado, *i.e.* o ângulo e a magnitude da tensão de referência do conversor são fornecidos pelo controlador (Hingorani e Gyuyi, 1999). O conversor analisado aqui é constituído por IGBTs/diodos e a tensão na saída do conversor é controlada utilizando técnicas de modulação PWM (*Pulse-Width Modulation*). Modelos detalhados, em que as chaves estáticas, o capacitor de corrente contínua e o gerador de sinais PWM são explicitamente representados, e modelos simplificados, baseados em fontes trifásicas de tensão, são apresentados. A vantagem do modelo simplificado é permitir que passos de integração maiores sejam utilizados sem sacrificar a precisão, caso a análise de geração de componentes harmônicos não seja de interesse. Adicionalmente, o modelo simplificado pode ser utilizado tanto em estudos de transitórios eletromagnéticos, em que as variáveis nodais são representadas por valores instantâneos, quanto em estudos de estabilidade transitória com geradores de corrente alternada, em que as variáveis da rede são representadas por fasores. Dois exemplos de aplicação desses modelos são apresentados. O impacto do dimensionamento do capacitor de corrente contínua na geração de harmônicos pelo DSTATCOM é analisado usando o modelo detalhado. Enquanto que o modelo simplificado é empregado

para analisar o impacto de um DSTATCOM na estabilidade de geradores de indução conectados diretamente em redes de distribuição.

Este trabalho está organizado como segue. As principais características do SimPowerSystems são analisadas na Seção 2. Na Seção 3, discute-se o princípio de funcionamento de um DSTATCOM, assim como as estruturas dos controladores investigados. Na Seção 4, apresenta-se a implementação do modelo computacional de um DSTATCOM usando o SimPowerSystems juntamente com resultados de simulações. Um exemplo de aplicação do modelo detalhado é discutido na Seção 5. Na Seção 6, analisa-se o uso do modelo simplificado.

2 SIMPOWERSYSTEMS

Análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica através de simulação digital vem sendo investigada intensivamente desde a década de 60. Durante este período, várias metodologias de modelagem e solução das equações da rede elétrica têm sido propostas, sendo que, de forma simplificada, os principais métodos podem ser classificados como análise nodal, análise nodal modificada ou análise por variáveis de estado. Programas que empregam análise nodal são fundamentados na metodologia proposta por Dommel em seu clássico artigo (Dommel, 1969). Dois representantes dessa classe de ferramentas de análise são o ATP (*Alternative Transients Program*) e o EMTDC (*ElectroMagnetic Transients for DC*), os quais são denominados neste trabalho de forma genérica como programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transient Program*). Tais programas empregam o método trapezoidal de integração numérica com passo fixo. Outro programa bastante conhecido que emprega análise nodal modificada com passo de integração variável é o SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). Embora este programa seja bem adequado para simulações de complexos circuitos de eletrônica de potência, seu desempenho com sistemas de energia elétrica envolvendo diversas máquinas rotacionais não é tão adequado. Por outro lado, o SimPowerSystems emprega análise através de variáveis de estado para estudos de transitórios em sistemas elétricos e eletromecânicos (TransEnergie Technologies Inc., 2002). O SimPowerSystems é um conjunto de bibliotecas contendo diversos componentes de sistemas de potência para ser utilizado juntamente com o Matlab/Simulink. Em razão da grande aceitação do ambiente Matlab/Simulink no meio acadêmico, neste trabalho, os modelos de dispositivos DSTATCOM são desenvolvidos utilizando-se tal ferramenta.

O conjunto de bibliotecas do SimPowerSystems é bastante completo, fornecendo modelos de diversos componentes de rede, por exemplo, elementos RLC concentrados; cargas

não-lineares; diversos modelos de máquinas elétricas e controles associados; modelos de linhas de transmissão e cabos concentrados (modelo π -equivalente) e distribuídos (modelo de Bergeron); disjuntores (*circuit breakers*); componentes de eletrônica de potência e controles associados; etc. Tais componentes podem ser utilizados em conjunto com modelos existentes no Simulink, assim como com modelos desenvolvidos pelo usuário empregando Simulink, Matlab (arquivos .m), linguagem de programação Fortran ou C. Uma vantagem da versão 2.3 do SimPowerSystems, que é empregada neste trabalho, é permitir a realização de estudos tanto de simulação eletromagnética, em que as variáveis da rede são representadas por valores instantâneos, quanto de estabilidade transitória, em que as variáveis da rede são representadas por fasores. Além disso, ao contrário da maioria dos programas do tipo EMTP, há um mecanismo de inicialização das variáveis das máquinas elétricas e controles associados usando um fluxo de carga. A estrutura lógica do SimPowerSystems é simplificada e discutida a seguir.

Inicialmente, é necessário construir o circuito utilizando os componentes existentes nas bibliotecas do SimPowerSystems (*powerlib*) e do Simulink, assim como componentes definidos pelo usuário. A partir desse ponto, a simulação é automatizada conforme segue:

- a função *power2sys* divide os blocos que compõem o sistema em blocos pertencentes ao Simulink e blocos pertencentes ao SimPowerSystems. Então os parâmetros da rede são obtidos e a topologia é analisada. Os blocos pertencentes ao SimPowerSystems são divididos em blocos lineares e não-lineares e para cada nó elétrico é dado um número automaticamente.
- após a topologia da rede ter sido obtida, a função *circ2sys* constrói o modelo de variáveis de estado, como descrito em (1), considerando a parte linear do circuito. Todos os cálculos de regime permanente e inicialização das variáveis são efetuados neste instante, inclusive os dos controladores das máquinas elétricas, através de um fluxo de carga (*Load Flow*).

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad (1)$$

- se a opção de discretizar o sistema tiver sido escolhida, o modelo de variáveis de estado em (1) é discretizado utilizando o método Tustin (Chen, 1999).
- então a simulação é iniciada, interconectando os modelos lineares e não-lineares, existentes ou definidos pelo usuário, conforme representado na Figura 1.

Como pode ser observado na Figura 1, os componentes não-lineares do circuito são modelados através de relações

tensão-corrente ($v \times i$). Usualmente, elementos não-lineares são modelados por fontes de correntes não-lineares conectadas em derivação, porém, o uso de fontes de tensão também é possível, como será visto neste trabalho. A saída do programa são as variáveis elétricas, mecânicas e de controle escolhidas pelo usuário.

O modelo de variáveis de estado pode ser solucionado empregando tanto abordagens discretas quanto contínuas (Chen, 1999). Além disso, na versão 2.3, pode-se solucionar as equações que representam a rede elétrica utilizando o método fasorial, em que as variáveis nodais são representadas por fasores. Conseqüentemente, as equações de rede tornam-se algébricas, diminuindo drasticamente o tempo de simulação. As equações diferenciais podem ser solucionadas utilizando um dos diversos métodos de integração existentes no Simulink, os quais empregam tanto algoritmos com passo de integração fixo quanto variável. O melhor método de solução (discreto, contínuo ou fasorial), considerando precisão e tempo de processamento, depende das características do circuito e dos fenômenos a serem analisados. Comentário similar é válido para qual método de integração utilizar. Nas simulações apresentadas neste trabalho, optou-se por utilizar a abordagem de modelagem discretizada com o algoritmo de integração Runge-Kutta de quarta ordem. Essa opção mostrou-se eficiente do ponto de vista de precisão e tempo de simulação.

3 DISPOSITIVOS DSTATCOM

Um DSTATCOM consiste de um conversor fonte de tensão conectado em derivação na rede de distribuição via um transformador de acoplamento, como esquematicamente representado na Figura 2. Esta configuração permite que o dispositivo forneça ou consuma potência ativa e reativa de forma controlada. A troca de potência reativa com a rede é realizada variando-se a magnitude da tensão alternada gerada na saída do conversor, assim como ocorre em compensadores síncronos, enquanto que a troca de potência ativa é efetuada variando-se o ângulo da tensão gerada. No caso de não haver um elemento de armazenamento de energia do lado de corrente contínua, só é possível realizar compensação reativa,

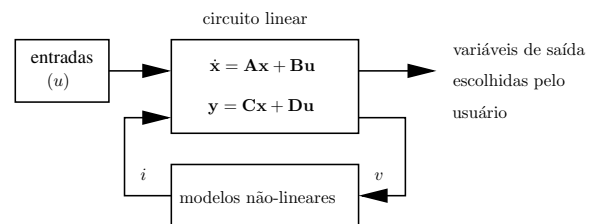


Figura 1: Interconexão entre os modelos lineares e não lineares.

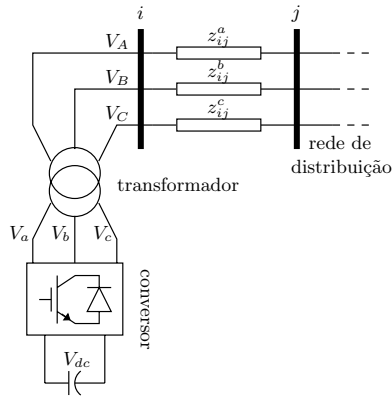


Figura 2: Diagrama esquemático de um DSTATCOM.

tanto indutiva quanto capacitiva, de forma contínua. Em redes de média tensão, geralmente, o tipo de chave autocomutada empregada no desenvolvimento de conversores fonte de tensão é o IGBT, diminuindo as perdas de chaveamento. Adicionalmente, a capacidade de potência destes equipamentos é relativamente baixa. Por conseguinte, técnicas de chaveamento PWM podem ser empregadas para diminuir a geração de componentes harmônicos de baixa ordem. As principais aplicações de um DSTATCOM são controle de tensão, controle de fator de potência, compensação de correntes harmônicas e redução de *flicker* (Hingorani, 1995; Song e Johns, 1999; Haque, 2001; Sensarma et al., 2001; Jung et al., 2002; Choma e Etezadi-Amoli, 2002; Anaya-Lara e Acha, 2002; Acha et al., 2002). Aqui, um DSTATCOM projetado para manter tensão terminal ou fator de potência constante é analisado. Além disso, o elemento do lado de corrente contínua do conversor é um capacitor. Observe que algumas variáveis nas figuras apresentadas neste trabalho são escritas utilizando uma notação em língua inglesa, por exemplo *dc* para *direct current*. Isso foi adotado para manter uma certa coerência na apresentação dos diagramas dos modelos implementados em SimPowerSystems, pois as bibliotecas são originalmente identificadas por nomes em inglês, os quais não foram alterados para permitir que tais componentes sejam prontamente identificados.

O modelo geral do controlador do DSTATCOM atuando como regulador de tensão analisado neste trabalho é mostrado na Figura 3, o qual é baseado na estrutura rotacional de referência dq0. Isso permite obter uma melhor precisão quando comparado com técnicas fundamentadas em estruturas estacionárias de referência (Acha et al., 2002). Nesta figura, V_{ABC} são as tensões trifásicas terminais, I_{abc} são as correntes trifásicas injetadas pelo DSTATCOM, V_{rms} é o valor rms (*root mean square*) trifásico da tensão terminal, V_{dc} é a tensão contínua no capacitor e os sobrescritos * representam valores de referência. Tal controlador emprega um PLL

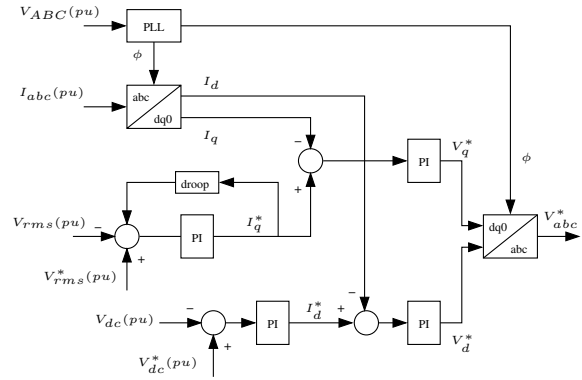


Figura 3: Controlador de um DSTATCOM atuando como regulador de tensão.

(*Phase Locked Loop*) para sincronizar a tensão alternada na saída do conversor com a componente fundamental da fase A da tensão terminal. Portanto, o PLL fornece o ângulo ϕ para a transformação abc-dq0 (e dq0-abc). Há quatro reguladores PI, cujas funções são descritas a seguir. O primeiro regulador PI é responsável por controlar a tensão terminal através da troca de potência reativa com a rede de corrente alternada. A saída desse regulador é a referência de corrente reativa I_q^* , a qual é limitada entre +1 pu capacitiva e -1 pu indutiva, assim a capacidade de compensação do DSTATCOM é considerada de forma simplificada. Este regulador tem uma característica em declive (*droop*), usualmente $\pm 5\%$, que permite a tensão terminal variar ligeiramente. Isso é adotado para evitar um comportamento oscilatório do controlador (Hingorani e Gyuyi, 1999). Um outro regulador PI é responsável por manter constante a tensão contínua V_{dc} no capacitor através da troca de uma pequena quantidade de potência ativa com a rede elétrica, compensando as perdas do conversor e do transformador de acoplamento. Este regulador PI fornece a referência de corrente ativa I_d^* . Os outros dois reguladores PI determinam as tensões de referência de eixo direto V_d^* e em quadratura V_q^* do conversor, as quais são enviadas para o gerador de sinal PWM após uma transformação dq0-abc. Finalmente, V_{abc}^* são as tensões trifásicas desejadas na saída do conversor em pu.

O modelo geral do controlador do DSTATCOM atuando como regulador de fator de potência investigado aqui é apresentado na Figura 4. Esse controlador é bastante similar ao controlador de tensão previamente apresentado. A principal diferença é o regulador de troca de potência reativa, o qual geralmente é ajustado para fornecer toda a demanda de potência reativa da instalação do consumidor, *i.e.* operação com fator de potência unitário. Por conseguinte, a potência reativa de referência Q^* é fixada igual a zero e Q é a potência reativa medida no ponto de fornecimento do consumidor. Os outros elementos deste controlador foram explicados previamente.

Um exemplo prático da instalação de um DSTATCOM para controle de fator de potência é um DSTATCOM com capacidade de compensação de 8 MVar instalado junto a uma parque eólico de 24 MW na Dinamarca, cujo sistema de controle é ajustado para garantir que o parque eólico opere com fator de potência unitário (Sobrink et al., 1998; Jenkins et al., 2000).

4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO DSTATCOM

Nesta seção, o DSTATCOM e os controladores associados são implementados utilizando o SimPowerSystems. Como mencionado, duas classes de modelos são analisadas. No primeiro caso, denominado modelo detalhado, o conversor fonte de tensão, o capacitor de corrente contínua e o gerador de sinais PWM são explicitamente representados. No segundo caso, denominado modelo simplificado, o conversor e o gerador de sinais PWM são representados por um conjunto de três fontes de tensão controláveis e a dinâmica do capacitor de corrente contínua é simulada através de um conjunto algébrico-diferencial de equações. A vantagem do modelo simplificado é permitir que passos de integração maiores sejam utilizados sem sacrificar a precisão, desde que análise harmônica não seja de interesse. Tal modelo é adequado tanto para estudos de transitórios eletromagnéticos quanto de estabilidade transitória.

4.1 Modelo Detalhado

O diagrama da implementação do modelo detalhado do DSTATCOM usando SimPowerSystems é mostrado na Figura 5, considerando o caso de um controlador de tensão. Tal modelo é composto por um conversor fonte de tensão de 6 pulsos usando IGBTs/diodos, um gerador de sinais PWM, um filtro passivo, um controlador de tensão e equipamentos

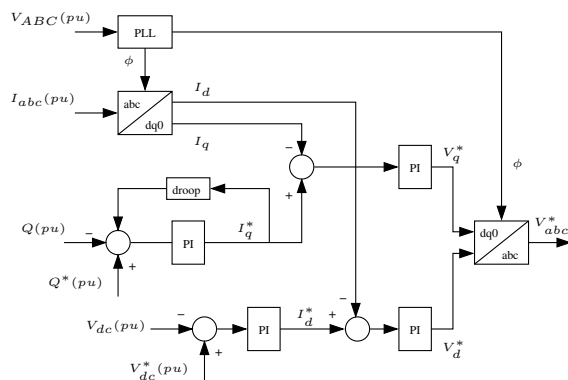


Figura 4: Controlador de um DSTATCOM atuando como regulador de fator de potência.

de medidas de corrente e tensão. O bloco Unit Delay entre o controlador de tensão e o conversor é necessário para eliminar o laço (loop) algébrico. Isso introduz um atraso de um passo de integração entre as variáveis do controlador e do conversor. Caso tal atraso não seja utilizado, o tempo de simulação crescerá consideravelmente. De fato, programas do tipo EMTP também introduzem um atraso de um passo de integração nos controladores implementados pelo usuário. É importante destacar que o modelo do conversor e do gerador de sinais PWM são pré-existent na biblioteca do SimPowerSystems.

A implementação do controlador de tensão utilizando blocos do Simulink e do SimPowerSystems é mostrado na Figura 8. A maioria desses blocos são pré-existent nas bibliotecas do SimPowerSystems e podem ser prontamente identificados a partir da figura. A multiplicação do sinal de corrente por -1 é para levar em consideração o sentido de injeção de potência ativa e reativa adotado neste trabalho. Valores negativos de potência reativa indicam que o DSTATCOM está injetando potência na rede, ao passo que, valores positivos indicam que o DSTATCOM está consumindo potência a partir da rede.

4.2 Modelo Simplificado

No caso do modelo simplificado, o conversor, o filtro passivo e o gerador de sinais PWM são substituídos por um conjunto de três fontes de tensão controláveis. Tais fontes de tensão são controladas pelo sinal V_{abc}^* fornecido pelo regulador escolhido (tensão ou fator de potência constante). Porém, o valor da tensão trifásica na saída do conversor, em Volts, é dependente da tensão no elemento de corrente contínua, i.e. $V_a = KV_{dc}V_a^*$, $V_b = KV_{dc}V_b^*$ e $V_c = KV_{dc}V_c^*$, em que K depende do tipo de conversor empregado. Por conseguinte, é importante representar adequadamente a dinâmica do elemento de corrente contínua. Isto pode ser realizado, aplicando-se o princípio de conservação de energia, pelo qual a potência instantânea nos terminais de corrente alternada do conversor deve ser igual à potência instantânea nos terminais de corrente contínua, desprezando-se as perdas do conversor (Hingorani e Gyuyi, 1999). Tal princípio pode ser matematicamente expresso por:

$$V_{dc}I_{dc} = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (2)$$

em que I_{dc} é a corrente no capacitor de corrente contínua. Além disso, a relação entre V_{dc} e I_{dc} é dada pela equação (3), sendo C o valor do capacitor de corrente contínua.

$$V_{dc} = -\frac{1}{C} \int I_{dc} dt \quad (3)$$

A solução do conjunto de equações algébricas-

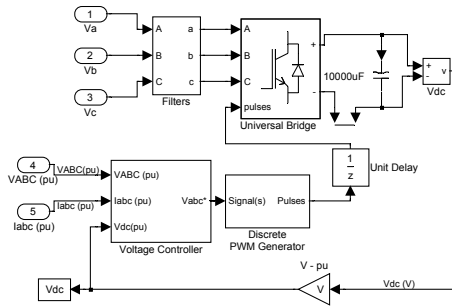


Figura 5: Modelo detalhado de um DSTATCOM usando SimPowerSystems.

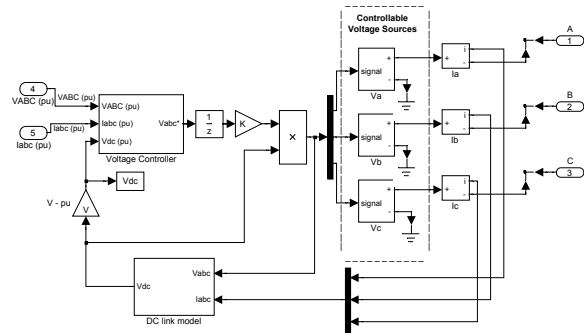


Figura 7: Modelo simplificado de um DSTATCOM usando SimPowerSystems.

diferenciais (2) e (3) pode ser obtida de forma iterativa usando o SimPowerSystems como mostrado na Figura 6. O bloco Unit Delay no laço de realimentação é necessário para eliminar o *loop* algébrico. O valor das condições iniciais do bloco Unit Delay e Discrete-Time Integrator deve ser fixado com o valor da tensão contínua em regime permanente.

A implementação do modelo simplificado do DSTATCOM usando o SimPowerSystem é mostrado na Figura 7, assumindo o caso de regulador de tensão. Nessa figura, há um controlador de tensão como descrito na Figura 8, um conjunto de três fontes de tensão controláveis e um modelo do elemento de corrente contínua como apresentado na Figura 6. Note que as correntes injetadas pelo DSTATCOM são medidas e os valores enviados para o modelo do elemento de corrente contínua. Além disso, entre o controlador de tensão e as fontes de tensão controláveis há um bloco Unit Delay para eliminar o *loop* algébrico, assim como o valor de referência da tensão trifásica é multiplicado por um fator K para levar em conta a relação entre o valor *rms* da tensão de saída, o índice de modulação (ma) e a tensão contínua de um conversor fonte de tensão de seis pulsos com modulação PWM.

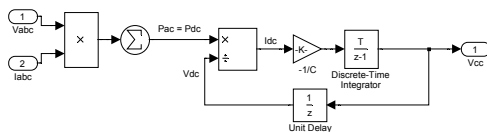


Figura 6: Modelo da dinâmica do capacitor de corrente contínua usando SimPowerSystems.

Os modelos do DSTATCOM controlado por fator de potência são completamente similares aos modelos discutidos anteriormente. A única mudança necessária é trocar o bloco *Voltage Controller* nas Figuras 5 e 7 por um controlador de fator de potência como descrito na Figura 4.

4.3 Resultados de Simulações

O diagrama da rede elétrica modelada usando o SimPowerSystems para analisar o desempenho de um DSTATCOM atuando como regulador de tensão é apresentado na Figura 9. Trata-se de uma rede de distribuição de 25 kV e 60 Hz com um alimentador. A subestação de 25 kV e nível de curto-circuito de 100 MVA é representada por uma fonte de tensão trifásica em série com uma impedância indutiva. Essa subestação alimenta uma carga variável através de um alimentador representado por três impedâncias RL séries com acoplamento mútuo. Um DSTATCOM é conectado na rede através de um transformador 25/2 kV ligado em Y_g/Δ . Os seguintes eventos dinâmicos são simulados. Inicialmente, a tensão fornecida pela subestação (*Programmable Source*) permanece em seu valor nominal, *i.e.* 25 kV, e não há nenhuma carga conectada no alimentador. No instante de simulação $t = 200$ ms a chave S1 é fechada e no instante $t = 500$ ms a chave S2 é fechada, diminuindo a tensão terminal da barra B2, sendo que ambas as chaves permanecem fechadas até o fim da simulação. No instante $t = 800$ ms, o valor da fonte de tensão da subestação é aumentado para 30 kV, permanecendo nesse valor até o fim da simulação. Com isso o valor da tensão na barra B2 eleva-se subitamente, sendo que tal evento pode representar o controle de tensão de uma subestação através da mudança de *tap's* de um transformador, por exemplo. É claro que sem a instalação de um DSTATCOM a tensão da barra de carga B2 variará bastante durante esses eventos. Portanto, o objetivo é instalar um DSTATCOM para minimizar tais variações de tensão nessa barra. A capacidade de compensação do DSTATCOM é 5 MVar, a frequência de chaveamento do PWM é 3 KHz, o valor do capacitor de corrente contínua é $10.000 \mu F$ e a tensão contínua é igual a 4 kV.

Na Figura 10, apresenta-se o comportamento dinâmico do valor *rms* da tensão terminal da barra de carga B2 para os casos sem DSTATCOM, com DSTATCOM representado pelo

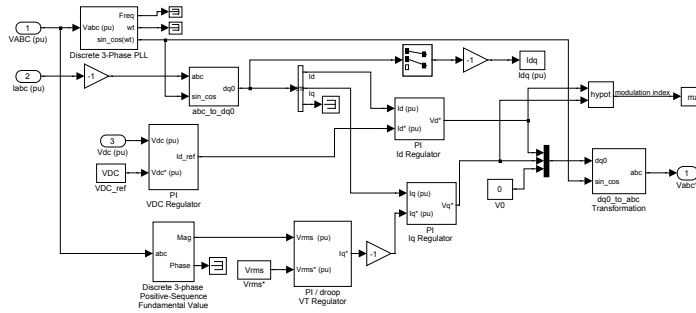


Figura 8: Controlador de um DSTATCOM atuando com regulador de tensão.

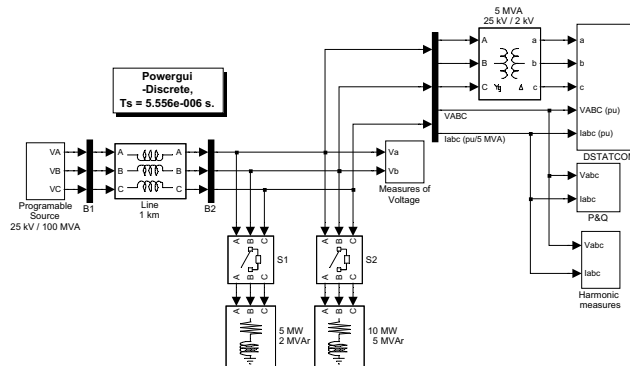


Figura 9: Diagrama da rede empregada para analisar o modelo do DSTATCOM controlado por tensão.

modelo detalhado e com DSTATCOM representado pelo modelo simplificado. As linhas tracejadas horizontais indicam o valor permissível de variação da tensão em regime permanente ($\pm 5\%$; 0,95/1,05 pu). É possível verificar que a presença do DSTATCOM minimiza as variações de tensão. Neste caso, excetuando-se breves transitórios, o valor rms da tensão terminal permanece dentro da faixa permitida. Porém, o fato mais importante aqui é verificar que o uso do modelo detalhado ou do modelo simplificado leva aos mesmos resultados. Na Figura 11, tem-se representado o comportamento da troca de potência ativa e reativa entre o conjunto transformador/DSTATCOM e a rede de corrente alternada. Como mencionado, convencionou-se que consumo de potência reativa pelo DSTATCOM é representado por valores positivos, ao passo que geração de potência reativa é representado por valores negativos. Durante toda a operação do DSTATCOM o consumo de potência ativa é bem reduzido, variando entre 80 kW e 150 kW, o suficiente para atender as perdas do conversor e do transformador. É possível verificar também que no início de cada transitório esse consumo varia para manter a tensão do capacitor constante. Em relação à troca de potência reativa, inicialmente não há troca, visto que o valor da tensão da barra B2 é 1 pu. Após o chaveamento da primeira carga, o DSTATCOM passa a injetar potência reativa na rede e quando a chave S2 é fechada a injeção de potên-

cia reativa chega ao limite de capacidade do DSTATCOM, sendo importante lembrar que parte dessa potência reativa é consumida pelo transformador de acoplamento. Por conseguinte, a capacidade efetiva de compensação de reativos capacitivos é de aproximadamente 4,8 MVar. Quando o valor de tensão da subestação aumenta, o DSTATCOM passa a consumir potência reativa (operação indutiva). Nesse caso, a capacidade de compensação de reativos indutivos, levando-se em consideração o transformador, é de aproximadamente 5,2 MVar. É interessante observar que o modo de operação do DSTATCOM passa de completamente capacitivo para completamente indutivo muito rapidamente – aproximadamente 3 ciclos. Nota-se que as respostas de potência ativa e reativa são praticamente as mesmas independentemente do modelo utilizado. O comportamento dinâmico da tensão do capacitor de corrente contínua é mostrado na Fig. 12, a qual permanece praticamente constante em 4 kV. Novamente, verifica-se que as respostas obtidas a partir de ambos os modelos são similares.

O instante de chaveamento dos IGBTs no modelo detalhado é determinado utilizando interpolação, ou seja, mesmo se um chaveamento ocorrer entre dois passos de integração, tal chaveamento é simulado com precisão. Porém, o tamanho do passo de integração deve ser escolhido suficientemente pe-

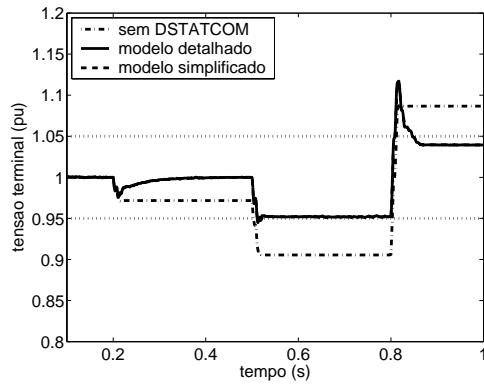


Figura 10: Comportamento dinâmico da tensão terminal.

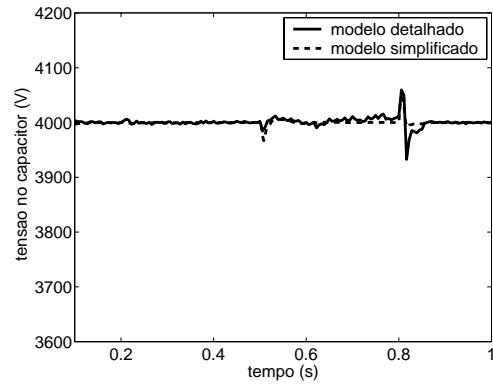


Figura 12: Comportamento dinâmico da tensão contínua.

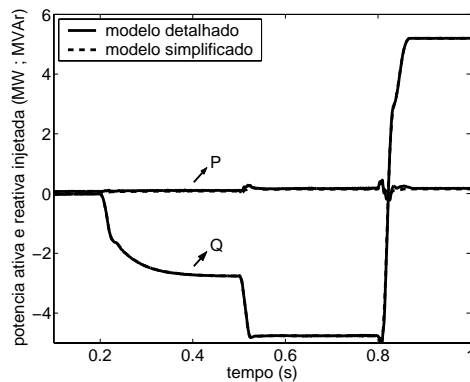


Figura 11: Potência ativa (P) e reativa (Q) trocada entre o conjunto DSTATCOM/transformador e a rede elétrica.

queno para evitar que vários chaveamentos ocorram entre dois passos de integração. A frequência da rede simulada é 60 Hz e a frequência de chaveamento do PWM foi adotada igual a 3000 Hz. Conseqüentemente, um chaveamento pode ocorrer a cada 5,556 microssegundos ($1/60/3000$ segundo). Assim, o modelo detalhado requer um passo de integração de cerca de 5,556 microssegundos para apresentar uma precisão adequada. Por outro lado, o modelo simplificado foi simulado utilizando um passo de integração 50 vezes maior, *i.e.* 277,778 microssegundos ($50/60/3000$ segundo). Portanto, teoricamente, é possível obter um ganho no tempo de processamento de cerca de 50 vezes utilizando o modelo simplificado. Outra vantagem do modelo simplificado é a possibilidade de utilizá-lo junto com o método de solução fasorial, característica introduzida na versão 2.3 do SimPowerSystems. Neste caso, o aumento da velocidade de processamento pode ser ainda maior.

Na figura 13, apresenta-se o diagrama da rede elétrica utilizada para realização dos testes com um DSTATCOM controlado por fator de potência, que é similar à rede analisada no exemplo anterior. A principal diferença são os eventos simu-

lados. Inicialmente há apenas uma carga conectada na barra B2 consumindo 1 MVar de potência reativa indutiva; no instante $t = 300$ ms a chave S1 é fechada e o consumo de potência reativa indutiva total na barra B2 passa a ser de 3 MVar. No instante $t = 600$ ms, a chave S2 é fechada e a barra B2 passa a injetar 2 MVar de potência reativa capacitiva na rede. Por simplicidade, todas as cargas são representadas por um modelo de impedância constante, portanto, na realidade, os valores de potência consumida/fornecida descritos acima variam com o quadrado da tensão terminal. Para evitar o pagamento de penalidades relacionadas com o consumo excessivo de potência reativa, um DSTATCOM controlado por fator de potência é instalado junto ao ponto de fornecimento do consumidor, o qual é conectado na rede através de um transformador de 25/2 kV ligado em Y_g/Δ . Esse DSTATCOM é controlado de forma a manter operação com fator de potência unitário na instalação do consumidor.

Na Figura 14, tem-se o comportamento da potência reativa fornecida (consumida) pela rede elétrica para a barra B2 nos casos sem DSTATCOM e com DSTATCOM representado pelo modelo detalhado e simplificado. Como pode ser visto, quando não há um DSTATCOM, a potência reativa requerida (ou fornecida) pela carga varia bastante e, conseqüentemente, o fator de potência também varia. Por outro lado, com a instalação de um DSTATCOM, a rede de distribuição não precisa mais fornecer reativos para a barra B2 ou consumir o excesso, exceto durante breves transitórios. Na Figura 15 são mostrados o comportamento da potência ativa e reativa consumidas da (ou fornecidas para a) rede elétrica pelo conjunto DSTATCOM/transformador. Nota-se que o consumo de potência ativa durante todo o período de simulação é pequeno, cerca de 100 kW. Em relação à potência reativa, inicialmente o DSTATCOM injeta 1 MVar de reativos capacitivos na rede para atender o consumo da carga da barra B2. No instante $t = 300$ ms, essa injeção aumenta para aproximadamente 3 MVar. Ao passo que no instante $t = 600$ ms, o DSTATCOM passa a fornecer cerca de 2 MVar de potên-

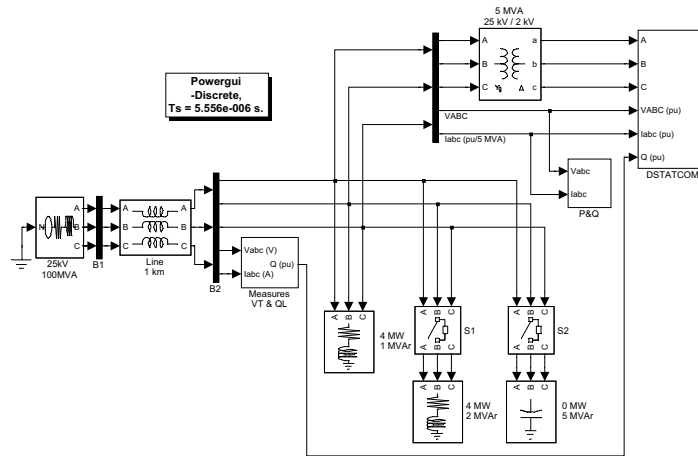


Figura 13: Diagrama da rede empregada para analisar o modelo do DSTATCOM controlado por fator de potência.

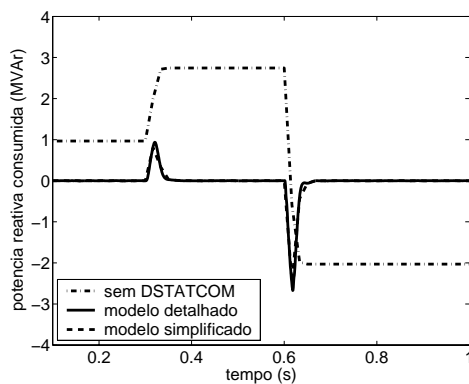


Figura 14: Potência ativa fornecida pela rede de distribuição.

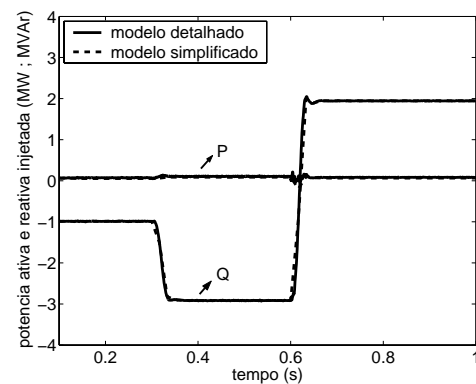


Figura 15: Troca de potência ativa (P) e reativa (Q) entre o conjunto DSTATCOM/transformador e a rede elétrica.

cia reativa capacitiva. Na Figura 16, apresenta-se a resposta de tensão no capacitor de corrente contínua, a qual permanece praticamente constante por todo o período de simulação. Note que novamente os resultados são praticamente os mesmos independentemente do modelo utilizado.

Neste caso, o modelo detalhado também foi simulado utilizando um passo de integração de 5,556 microssegundos (1/60/3000 segundo). Por outro lado, durante a simulação do modelo simplificado, empregou-se um passo de integração de 166,67 microssegundos (30/60/3000 segundo). Neste caso, não foi possível utilizar um passo de integração maior com o modelo simplificado sem reduzir a precisão em razão do chaveamento do capacitor no instante $t = 600$ ms, o que acarreta transientes de alta frequência. Apesar disso, o ganho no tempo de processamento é ainda considerável.

5 IMPACTO DO DIMENSIONAMENTO DO CAPACITOR DE CORRENTE CONTÍNUA NA GERAÇÃO DE HARMÔNICOS

Nesta seção, um exemplo de aplicação do modelo detalhado é apresentado e discutido. Uma das influências do dimensionamento do capacitor de corrente contínua diz respeito à geração de tensões e correntes harmônicas pelo DSTATCOM. Quanto maior o capacitor, menores *ripples* de correntes contínuas ocorrem, melhorando a performance do dispositivo no item geração de harmônicos. Para analisar tal questão é necessário utilizar um índice numérico que permita avaliar a quantidade de harmônicos gerados pelo DSTATCOM. Existem diversos índices que indicam a performance de um conversor em relação à qualidade de injeção de componentes harmônicos. Um desses índices é o THD (*Total Harmonic Distortion*), o qual é definido por (Rashid, 1993):

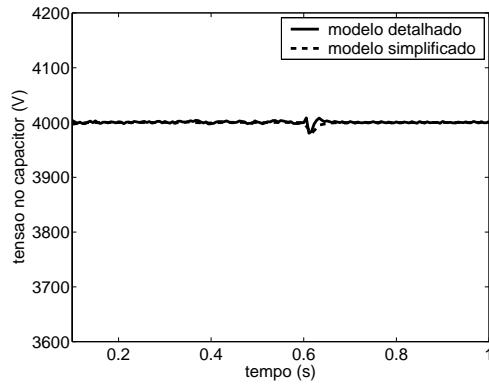


Figura 16: Comportamento dinâmico da tensão contínua.

$$THD = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

Na expressão acima, o subscrito 1 indica componente fundamental e $n = 2, 3, \dots$ indica os componentes com frequências múltiplas. Esse índice de performance usualmente é aplicado para tensões. É importante relatar que nas simulações realizadas para investigar a geração de harmônicas pelo DSTATCOM o sistema foi discretizado utilizando um passo de integração de $1 \mu\text{s}$ para garantir a precisão dos resultados. Para verificar a influência do capacitor no índice THD de tensão foram realizadas inúmeras simulações em que o tamanho do capacitor foi variado de $25 \mu\text{F}$ a $10.000 \mu\text{F}$ com degraus de $25 \mu\text{F}$, ou seja, foram necessárias 400 simulações. Como o objetivo é verificar somente a influência do capacitor no índice THD de tensão, o filtro na saída do conversor foi eliminado nesses testes. A rede empregada e os eventos dinâmicos simulados são os mesmos do caso analisado na seção anterior em que o DSTATCOM atua como um regulador de tensão. Além disso, geralmente o DSTATCOM apresenta características de geração de harmônicos diferentes no modo de operação capacitivo, *i.e.* quando ocorrem afundamento de tensão, e indutivo, *i.e.* quando ocorre elevação de tensão. Portanto, nas simulações a seguir, optou-se por analisar o índice THD em dois instantes distintos das simulações: $t = 0,750 \text{ ms}$ (operação capacitiva) e $t = 0,950 \text{ ms}$ (operação indutiva). Para facilitar a execução do teste, utilizou-se a capacidade do Matlab de passar parâmetros para modelos implementados no Simulink através da área de trabalho. Assim o *script* a seguir foi desenvolvido para realizar esse estudo parametrizado de forma automática sem intervenção do usuário:

```
Ts = 1e-6 ; % passo de int.
Ta = 1 ; % const. de captura
V750 = ceil(0.750/Ts/Ta); % índices do vetor V
```

```
V950 = ceil(0.950/Ts/Ta); % correspondentes a
% t = 750 e 950 ms
C = 25e-6 ; % valor inicial do cap.
Cmax = 10000e-6 ; % valor máximo do cap.
CT = ceil(Cmax/C) ; % número de simulações

for i=1:CT
    sim('rede1_DS1b') ; % execução do modelo
    VTHD(i,1) = Vthds(V750) ; % armazenamento das
    VTHD(i,2) = Vthds(V950) ; % variáveis de interesse
    C = C + 25e-6 ; % aumento do valor
% do capacitor
end
```

É importante destacar que é possível realizar diversos estudos paramétricos utilizando tal recurso do Matlab/Simulink, inclusive relacionados aos ajustes dos parâmetros de controladores PI. Na Figura 17, mostra-se o impacto do dimensionamento do capacitor no índice THD da tensão de linha V_{ab} . Pode-se observar, com base na figura, que inicialmente o dimensionamento do capacitor tem grande influência na geração de tensões harmônicas. Porém, a partir de um certo ponto não é possível melhorar o índice THD através do aumento do capacitor, neste caso aproximadamente $500 \mu\text{F}$. É interessante notar que em relação ao índice THD da tensão de linha, realmente o DSTATCOM injeta mais harmônicos na rede no modo de operação capacitivo, ou seja, quando há afundamentos de tensão. Esse teste paramétrico levou cerca de 4,2 horas para ser realizado usando o recurso *Simulink Accelerator* em um PC não dedicado, *i.e.* executando simultaneamente outras tarefas, com processador Pentium III, clock de 450 MHz, 384 MBytes de memória RAM e sistema operacional Linux Red Hat 7.1, lembrando que o passo de integração adotado foi de $1 \mu\text{s}$ e o tempo de simulação total de 1 segundo.

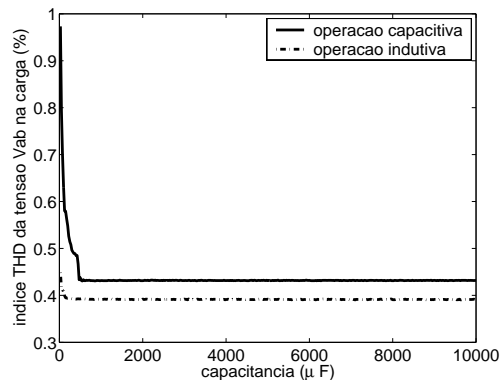


Figura 17: Índice de performance THD da tensão na carga (V_{ab}).

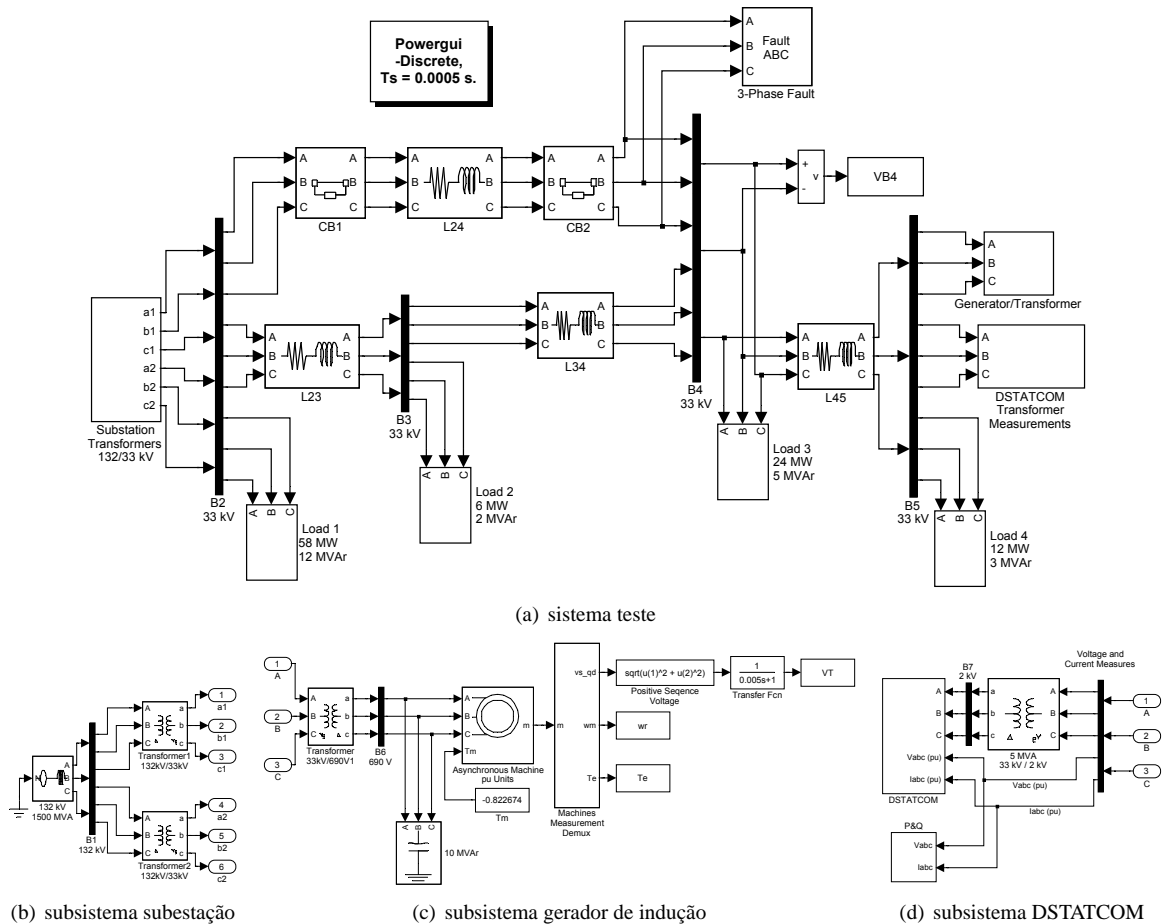


Figura 18: Diagrama da rede empregada para analisar a influência de um DSTATCOM na estabilidade de um gerador de indução.

6 IMPACTO DE DISPOSITIVOS TIPO DSTATCOM NA ESTABILIDADE DE GERADORES DE INDUÇÃO

Recentemente, o interesse por geração distribuída tem aumentado consideravelmente em razão da reestruturação do setor de energia elétrica, necessidade de aproveitamento de diferentes fontes primárias de energia, avanços tecnológicos e maior conscientização sobre conservação ambiental (Jenkins et al., 2000). Nesse contexto, o emprego de geradores de indução em usinas térmicas, hidráulicas e eólicas também tem aumentado em razão da simplicidade e baixo custo inicial e de manutenção (Jenkins et al., 2000). Tais máquinas requerem uma fonte de excitação externa para geração de tensão. Nas instalações mais simples, a potência reativa necessária para o funcionamento de geradores de indução é fornecida por um banco fixo de capacitores (Jenkins et al., 2000). Em instalações com capacidade mais elevada, pode-se utilizar equipamentos baseados em eletrônica

de potência para fornecer parte da potência reativa necessária para o funcionamento do gerador de indução (Jenkins et al., 2000). O DSTATCOM é um dispositivo que tem sido utilizado para tal propósito. Nesse caso, tais equipamentos são usualmente controlados para manter tensão ou fator de potência constante (Sobrinck et al., 1998; Jenkins et al., 2000). Assim, nesta seção, o modelo simplificado do DSTATCOM é utilizado para investigar o impacto deste dispositivos na estabilidade transitória de um gerador de indução conectado diretamente em uma rede de distribuição.

O diagrama da rede modelada no SimPowerSystems é mostrado na Figura 18. Tal rede consiste em um sistema de subtransmissão de 132 kV, 60 Hz, alimentando uma rede de distribuição de 33 kV através de dois transformadores de 132/33 kV conectados em Δ/Y_g . Nesse sistema há um gerador de indução conectado na barra 6 com capacidade de 30 MW, o qual é ligado à rede via um transformador de 690/33 kV com conexão Y_g/Δ . Nas simulações analisando o impacto de um DSTATCOM, tal dispositivo foi conectado

à rede via um transformador de 33/2 kV ligado em Y_g/Δ como mostrado na Figura 18. Nos casos simulados sem o DSTATCOM, um banco trifásico de capacitores com capacidade de 10 MVar foi instalado junto aos terminais do gerador. Por simplicidade, as cargas foram modeladas como impedância constante.

Para investigar o impacto de um DSTATCOM na estabilidade transitória de um gerador de indução, um curto-circuito trifásico é aplicado na barra B4 em $t = 500$ ms e eliminado em 12 ciclos através da desconexão do ramo B2-B4. Neste caso, o gerador de indução está injetando 25 MW na rede e a capacidade do DSTATCOM é de 10 MVar. As respostas da tensão terminal do gerador de indução para os casos sem DSTATCOM e com DSTATCOM controlado por tensão e por fator de potência são apresentadas na Figura 19. Verifica-se que, na presença do DSTATCOM, o sistema torna-se estável, independentemente da forma de controle adotada. Nestes casos, o DSTATCOM age como uma fonte variável de reativos, melhorando a performance dinâmica do gerador de indução. Observa-se também que o uso do DSTATCOM como controlador de tensão permite uma recuperação ligeiramente mais rápida da tensão terminal do gerador. Além disso, a tensão terminal pós-falta é igual a 0,997 pu, no caso com o DSTATCOM atuando como regulador de tensão, e 0,974 pu, no caso com o DSTATCOM atuando como regulador de fator de potência.

Pode-se explicar a diferença do comportamento da tensão terminal para os casos com regulador de tensão e com regulador de fator de potência analisando o comportamento da potência reativa injetada pelo DSTATCOM em cada caso. Na Figura 20, apresenta-se a potência reativa injetada pelo DSTATCOM na rede. Lembrando que, neste trabalho, adota-se que valores negativos (positivos) de potência reativa injetada indicam operação capacitiva (indutiva). Verifica-se que antes da falta, o controlador de fator de potência injeta mais reativos na rede do que o controlador de tensão, 6,7 MVar e 5,2 MVar respectivamente. Durante a falta, ambos os controladores praticamente perdem a capacidade de compensação devido à redução da tensão terminal. Após a falta, o regulador de tensão passa a injetar mais reativos do que o regulador de fator de potência, 9,9 MVar e 6,9 MVar respectivamente.

Uma importante questão relacionada com o melhoramento da estabilidade de geradores distribuídos é determinar o aumento da potência crítica, *i.e.* a máxima potência ativa que o gerador pode injetar mantendo uma resposta estável. Assim, diversas simulações foram realizadas para determinar o aumento da potência crítica considerando diferentes tempos de eliminação de falta e capacidade de compensação do DSTATCOM. A mesma contingência descrita anteriormente é considerada. Os resultados estão resumidos na Tabela 1. Observa-se que o uso do DSTATCOM como um controlador

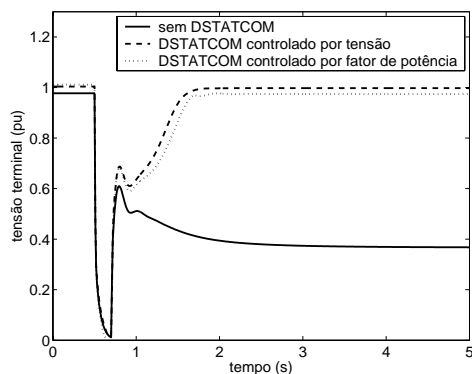


Figura 19: Tensão terminal do gerador de indução.

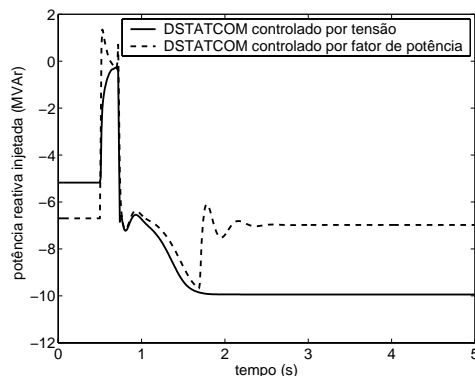


Figura 20: Potência reativa injetada pelo DSTATCOM.

de tensão resulta em maior ganho na margem de estabilidade.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre modelagem e análise dinâmica de dispositivos tipo DSTATCOM usando o SimPowerSystems. Os resultados de simulação mostraram que esses equipamentos podem melhorar o desempenho de redes de distribuição de energia elétrica. Concluiu-se que os modelos simplificados apresentados neste trabalho podem ser utilizados com grande precisão, caso a análise de geração de componentes harmônicos não seja de interesse, e significativa redução de esforço computacional. Tais modelos podem ser utilizados durante estágios iniciais de desenvolvimentos desses dispositivos. O uso do SimPowerSystems permite que estudantes desenvolvam, de forma bastante simples, modelos capazes de simular com grande precisão a performance desses equipamentos. Todos os detalhes dos modelos desenvolvidos foram apresentados para viabilizar a pronta utilização destes por pesquisadores, professores e estudantes. Dois exemplos de aplicação, um usando o modelo detalhado e outro usando o modelo simplificado, foram apresentados e discutidos.

Tabela 1: Potência crítica injetada pelo gerador de indução considerando diferentes tempos de eliminação da falta.

Tempo de falta (ciclos)	Potência crítica (MW)						
	Sem DSTATCOM	DSTATCOM controlado por tensão			DSTATCOM controlado por fator de potência		
		5 MVA	10 MVA	15 MVA	5 MVA	10 MVA	15 MVA
9	25.7	27.5	29.1	30.0	27.2	28.6	29.9
12	23.5	25.1	26.4	27.4	24.9	26.1	27.2
15	21.8	23.2	24.1	25.7	23.0	24.1	24.7
18	20.4	21.6	22.9	24.1	21.5	22.5	23.7

8 AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro fornecido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERENCES

- Acha, E., Agelidis, V., Anaya-Lara, O. e Miller, T. (2002). *Power Electronic Control in Electrical Systems*, 1 edn, Newnes.
- Anaya-Lara, O. e Acha, E. (2002). Modeling and analysis of custom power systems by PSCAD/EMTDC, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(1): 266–272.
- Chen, C.-T. (1999). *Linear System Theory and Design*, 3 edn, Oxford University Press.
- Choma, K. N. e Etezadi-Amoli, M. (2002). The application of a DSTATCOM to an industrial facility, *IEEE - Power Engineering Society Winter Meeting*.
- CIGRÉ Working Group 14.31 (2002). Custom power - state of the art, *Technical report*, CIGRÉ.
- Dommel, H. W. (1969). Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems* **88**: 388–399.
- Haque, M. H. (2001). Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM, *IEEE Power Tech Conference*.
- Hingorani, N. G. (1995). Introducing custom power, *IEEE Spectrum* **31**(6): 41–48.
- Hingorani, N. G. e Gyuyi, L. (1999). *Understanding FACTS - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, 1 edn, Institute of Electrical and Electronic Engineers Press Inc.
- Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D. e Strbac, G. (2000). *Embedded Generation*, 1 edn, Institute of Electrical Engineers.
- Jung, S.-Y., Kim, T.-H., Moon, S.-I. e Han, B.-M. (2002). Analysis and control of DSTATCOM for a line voltage regulation, *IEEE - Power Engineering Society Winter Meeting*.
- Rashid, M. H. (1993). *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*, 2 edn, Prentice-Hall Inc.
- Sensarma, P. S., Padiyar, K. R. e Ramanarayanan, V. (2001). Analysis and performance evaluation of a distribution statcom for compensating voltage fluctuations, *IEEE Transactions on Power Delivery* **16**(2): 259–264.
- Sobrink, K. H., Jenkins, N., Schettler, F. C. A., Pedersen, J., Pedersen, K. O. H. e Bergmann, K. (1998). Reactive power compensation of a 24 MW wind farm using a 12-pulse voltage source converter, *CIGRÉ International Conference on Large High Voltage Electric Systems*.
- Song, Y. H. e Johns, A. T. (1999). *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, 1 edn, Institute of Electrical Engineers.
- TransÉnergie Technologies Inc. (2002). *SimPowerSystems User's Guide*.