ESTÁGIO STATCOM APLICADO À SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Simão Silva Freitas[1]
Gilmar Nunes Santos Costa[2]
Herminio Miguel Oliveira Filho[3]

RESUMO

O presente trabalho apresenta a análise e projeto dos sistemas de potência e controle de um conversor CC-CA monofásico em ponte completa aplicado como STATCOM, para mitigação de oscilações de tensão em circuitos conectados à redes monofásicas de baixa tensão. A topologia, que se propõe a realizar o estágio CC-CA de um sistema ativo bidirecional para conexão de armazenadores de energia à rede elétrica, possui duas malhas de controle que realiza a regulação da tensão no barramento de distribuição e outra que realiza o controle de injeção potência reativa. É realizada a modelagem das plantas a serem controladas, assim como o projeto dos compensadores no domínio z. Resultados de simulação são apresentados de modo a validar a estratégia e modelagem do sistema de controle discreto implementada.

Palavras-chave: statcom qualidade de energia controle digital conversor bidirecional .

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Discente, simaoefritas85@gmail.com[1]
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Discente, gilmarnunes@dee.ufc.br[2]
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Docente, herminio@unilab.edu.br[3]

ISSN: 2447-6161

INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos propõem sistemas ativos que consigam operar conectados à rede elétrica convencional de forma a mitigar problemas relacionados à qualidade de energia. Estruturas ativas como a proposta por Enderle (2012), por exemplo, realiza a conexão à rede elétrica de um inversor em ponte completa tradicional operando como STATCOM.

Neste sentido, o desenvolvimento de uma estrutura ativa com as características de um conversor CC-CA para garantir a interface entre um banco de baterias e a rede elétrica está alinhado com o escopo do projeto estratégico de P&D da chamada pública ANEEL n° 001/2016 em execução na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira – UNILAB.

O sistema ativo é composto basicamente por dois estágios de processamento, um CC-CC e outro CC-CA, sendo o segundo estágio o objeto de análise neste trabalho. O estágio CC-CA, conforme mostrado na figura 1, é realizado por um inversor monofásico operando como STATCOM.
Figura 1 - Conversor CC-CA operando como STATCOM.

Fonte: Autor

METODOLOGIA

MODELAGEM DO FLUXO POTÊNCIA

A figura 2 apresenta o circuito simplificado do sistema ativo conectado à rede elétrica. Para a representação do modelo são considerados: a rede, assim como sua impedância, a impedância de carga e o inversor. O inversor, em conjunto com o filtro LC, é modelado como uma fonte de tensão controlada puramente senoidal. Todos os detalhes dessa modelagem podem ser consultados no artigo “Estudo do Estágio STATCOM em um Sistema Ativo Bidirecional para Aplicação de Armazenadores de Energia na Mitigação de Oscilações em Redes de Distribuição Monofásicas de Baixa Tensão”, publicado no Congresso Brasileiro de Automática.
Figura 2 - Circuito simplificado do sistema conectado à rede.

Fonte: Autor

Filtro LC

O inversor para ser conectado ao barramento de distribuição deve garantir que as harmônicas, exceto da componente fundamental, sejam eliminadas ou reduzidas significativamente. No projeto do filtro, deve-se levar em consideração a frequência do sinal da moduladora empregada, que possui a mesma frequência da rede, e, portanto, a frequência de corte do filtro LC deve permitir a passagem do sinal nesta frequência.

MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

A estratégia de controle utilizada é baseada no trabalho de (Enderle, 2012), onde a autora implementa o

ISSN: 2447-6161

controle de injeção de reativos no PAC ajustando o defasamento entre a tensão nos terminais de saída do inversor (PAC) e a tensão da rede.

Malha de tensão do PAC

Malha de controle da tensão no PAC possui realimentação unitária e possui dois blocos principais: o controlador Cpac(z) e a planta Gpac(z).

A função de transferência (FT) que relaciona a tensão do PAC com o sinal de entrada referente à moduladora SPWM é dada por:

A função de transferência (FT) que relaciona a tensão do PAC com o sinal de entrada referente à moduladora SPWM é dada por:

(1)

Resultando em:

(2)

O modelo discretizado da planta Gpac(s) é obtido a partir de exemplo numérico através da ferramenta sisotool do MATLAB.

Malha de tensão do barramento CC

Esta malha tem como finalidade a regulação da tensão no barramento CC e o ajuste do ângulo θ de modo a garantir que a corrente injetada no PAC esteja em quadratura com a tensão, e assim fornecendo apenas energia reativa. Deste modo, em (3) é apresentado a função de transferência que relaciona a tensão no barramento CC e o ângulo de defasamento entre as fontes.

(3)

Sincronismo

Uma característica de sistemas de processamento de energia que são conectados à rede elétrica é a necessidade de sincronismo entre o sinal de saída do inversor (PAC) com a rede elétrica. Para isto são necessários circuitos mais sofisticados utilizando os conceitos do Phase Locked Loop (PLL). Neste sentido, este tópico apresenta o conceito de circuitos/algoritmos de sincronismo baseados no conceito de circuitos PLL (Phase Locked Loop), algumas topologias amplamente difundidas na literatura destes circuitos, além de uma versão monofásica de uma destas topologias. O PLL utilizado neste projeto, possui apenas uma fase.

qPLL monofásico

O circuito do qPLL monofásico é apresentado na figura 3 Observa-se que o circuito é uma derivação da estrutura do qPLL trifásico. Observa-se que a estrutura utiliza a mesmo princípio de funcionamento para o sistema trifásico, entretanto, muda a estratégia de leitura dos sinais de entrada. Logicamente, como o circuito monofásico apresenta apenas uma fase, a leitura do circuito de sincronismo deve, com esta limitação, sincronizar a saída com o sinal de entrada.

Figura 3 - qPLL monofásico

ISSN: 2447-6161

Fonte: Autor

Para isto, defasa-se o sinal da tensão va e o coloca na outra entrada do circuito qPLL, desta forma, o circuito interpreta este novo sinal como sendo o sinal em quadratura da componente vβ da transformada de Clark, e portanto, comporta-se como um circuito de sincronismo trifásico. Deste modo, com esta variação da topologia pPLL trifásica tradicional, pode-se realizar o sincronismo de um circuito monofásico. Cabe destacar que a única condição de entrada necessária é a frequência da componente fundamental do sinal lido para projetar o defasamento de 90°, entretanto, em casos de sistemas conectados à rede, esta informação é a própria frequência da rede.

EXEMPLO DE PROJETO

Considerações gerais

As seguintes especificações, tensão média do barramento CC: 400V, tensão eficaz da rede: 220V/60Hz, potência aparente do inversor: 3,5 kVA, assim como os seguintes parâmetros, ondulação de corrente no indutor Lf ΔiLf: 30%, frequência de chaveamento fsw: 20kHz, resistência série da rede Rr: 1,956Ω, indutância série da rede Lr: 5,188 mH , representam os valores assumidos para realização da modelagem e simulação do sistema ativo proposto. Os parâmetros de rede em tensão alternada são, 220V/60Hz com impedância de 0,2 p.u.

Sistema de Controle

As considerações gerais sobre o projeto do sistema de controle considerando as características de hardware de um DSP modelo TMS320F28379D-ZWT, são, período de amostragem Ts: 25µs, amplitude da portadora Kc: 2500, ganho do conversor A/D HAD: 1240,91.

Em ambas as malhas de controle o projeto do controlador foi realizado utilizando a ferramenta sisotool do MATLAB e baseado em analisar o diagrama de bode da função de transferência de malha aberta (FTMA). Como descrito em seções anteriores, os projetos dos compensadores são realizados no domínio z após a discretização das plantas através do método de Tustin com período de amostragem Ts. Deste modo, em (7) e (8), são apresentadas as FTMA para as malhas de tensão no PAC e tensão no barramento CC, respectivamente.

(4)

(5)

Onde Kc representa o ganho da portadora digital, Hvpac e Hvcc representa o ganho do sensoriamento e HAD representa o ganho do conversor A/D. As expressões apresentadas em (9) e (10) são as FTs discretizadas dos compensadores da malha de tensão no PAC e de tensão no barramento CC, respectivamente.

(6)

ISSN: 2447-6161

(7)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3(a) apresenta as principais formas de onda no sistema ativo proposto operando em potência nominal. Como pode-se observar, a corrente está em quadratura com a tensão e desta forma, toda potência processada pelo inversor (3,5kVA) é exclusivamente reativa. Outra observação importante trata-se da tensão do barramento CC, que, como observa-se, mantém-se regulada em 400V.

Figura 3 – (a) As principais formas de onda no sistema ativo proposto operando em potência nominal e (b) resposta dinâmica do sistema ativo quando submetido à degrau de carga.

Fonte: Autor

A Figura 3(b) apresenta a resposta dinâmica do sistema ativo quando este é submetido à um degrau de carga de 50%-100%. Durante todo o intervalo de tempo, observou-se que a tensão eficaz do PAC manteve-se praticamente constante mesmo após o degrau, validando assim a modelagem da malha de controle. O mesmo comportamento é observado na tensão do barramento CC, onde a mesma apresenta boa resposta transitória após o degrau e mantem-se regulada mesmo com a variação de potência processada pelo inversor.

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a análise e projeto do sistema de controle aplicado à um conversor CC-CA monofásico aplicado como STATCOM para mitigação de oscilações de tensão em redes de distribuição. Foi realizada a modelagem matemática do fluxo de potência entre inversor, rede e cargas no barramento de distribuição. A estratégia de controle utilizada, que possui duas malhas, uma para regulação da tensão do PAC e outra para regulação do barramento CC, foi validada através de resultados de simulação. Foi verificado que a modelagem e estratégia de controle para injeção de reativos no PAC foi validada, sendo que para estados de carga diferentes, corrente e tensão no PAC apresentaram-se em quadratura, assim como fator de potência nulo para todo o intervalo de simulação. Salienta-se que um dos objetivos de desenvolvimento futuro é realizar a conexão dos estágios CC-CC e CC-CA.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL - PEE) e Enel Distribuição Ceará por todo o suporte oferecido para a execução desta pesquis

REFERÊNCIAS

Enderle, T. P., 2012. Análise, projeto e implementação de um D-STATCOM para redes de distribuição monofásica, Santa Maria: s.n.

Erickson, R. W. & Maksimovic, D., 2007. *Fundamentals of Power Electronics.* s.l.:Springer.

ISSN: 2447-6161

Hart, D. W., 1997. *Introduction to Power Electronics.* Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Silva, C. E. d. A., 2007. Inversor monofásico Isolado em Alta frequência com ampla faixa de tensão de entrada, Fortaleza: s.n.

Sotelo, G. G., Watanabe, E., Ferreira, A. & Aredes, M., 2002. Investigação dos modelos de circuitos de sincronismo trifásico baseados na teoria das potências real e imaginária instantâneas (p-PLL) e (q-PLL). Natal, s.n.

Wang, J. et al., 2017. Digital ZVS BCM current controlled single-phase full-bridge inverter using DSP TMS320F28035. IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia.

Wang, W. et al., 2018. Hybrid Control Strategy of Grid-tied Inverter for Harmonic and Reactive Power Compensation. 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).

ISSN: 2447-6161