

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

Gilmar N. S. Costa*. Simão S. Freitas**. Janaína B. Almada**
Paulo P. Praça*. Herminio M. Oliveira Filho.**

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará - UFC,
Fortaleza, Brasil (e-mail: gilmarnunes@dee.ufc.br, ppraca@dee.ufc.br).

**Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB, Redenção, Brasil (e-mail: simaofreitas85@gmail.com, herminio@unilab.edu.br, janainaalmada@unilab.edu.br)

Abstract: The present work presents an analysis and design of power and control systems for a single-phase full bridge DC-AC converter, applied as STATCOM, to mitigate voltage fluctuations in circuits connected to low-voltage single-phase networks. A topology, which offers the DC-AC stage of a bidirectional active system for connecting energy stores to the mains, has two control loops that use the distribution bus voltage and another that performs reactive electrical injection control. The modeling of controlled plants is carried out, such as the design of compensators in the z domain. Simulation results are presented in order to validate a strategy and model the implemented discrete control system.

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.

Keywords: Statcom; power quality; digital control; bidirectional converter.

Palavras-chaves: Statcom; qualidade de energia; controle digital; conversor bidirecional.

1. INTRODUÇÃO

A popularização de tecnologias de produção de energia renovável, com destaque para a solar fotovoltaica, tem criado desafios para as concessionárias de energia e agências reguladoras no que se refere a qualidade da energia gerada e os impactos a serem refletidos na rede de distribuição. Deste modo, trabalhos como o apresentado por Wang, et al. (2018) propõem estruturas ativas capazes de mitigar problemas referentes a injeção de potência nos barramentos de distribuição e deste modo reduzir os impactos refletidos para outras unidades consumidoras conectadas no mesmo alimentador.

Diversos trabalhos propõem sistemas ativos que consigam operar conectados à rede elétrica convencional de forma a mitigar problemas relacionados à qualidade de energia, sejam estes harmônicos, interrupção no fornecimento ou ainda oscilação de tensão. 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 de modo a reduzir oscilações de tensão em barramentos de distribuição em instalações de unidades consumidoras rurais. Tal problemática também aplica-se em instalações com injeção de potência ativa oriunda de minigeração fotovoltaica por exemplo, onde se faz interessante a manutenção dos barramentos e, conseqüentemente, conferindo melhor qualidade de energia entregue aos consumidores.

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 nº 001/2016 em execução na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, que trata do estudo de sistemas de monitoramento, qualidade, modelagem e mitigação de oscilações elétricas em unidades consumidoras contendo minigeração fotovoltaica. O sistema ativo bidirecional proposto realiza a conexão de armazenadores de energia (baterias) a rede elétrica com a finalidade mitigar oscilações de tensão em circuitos estratégicos instalados na unidade acadêmica do Campus das Aúras da Universidade. O esquemático do sistema proposto como solução no projeto de P&D supracitado é apresentado na Fig. 1, com destaque para o sistema ativo bidirecional.

Como observado na Fig. 1, 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 artigo. O estágio CC-CA, conforme mostrado na Fig. 2, é realizado por um inversor monofásico operando como STATCOM, onde o mesmo realiza a interface entre o barramento CC do sistema ativo bidirecional e o ponto de acoplamento comum (PAC) da unidade consumidora.

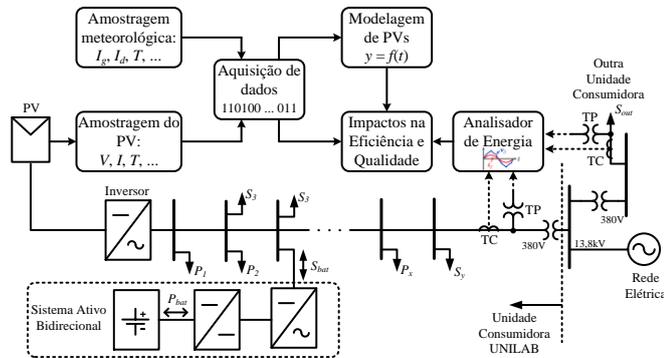


Fig. 1 Esquemático do sistema proposto no projeto estratégico de P&D (Chamada Pública ANEEL nº 01/2016).

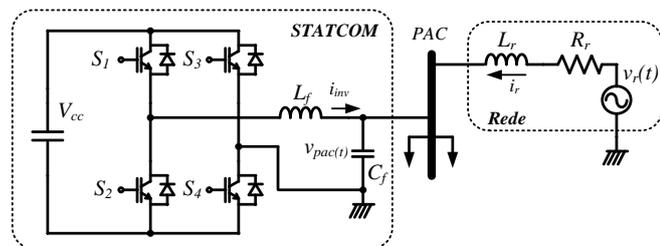


Fig. 2 Conversor CC-CA operando como STATCOM.

A topologia utilizada é uma ponte completa tradicional de semicondutores. Esta estrutura é bastante flexível quanto a estratégias de modulação e bastante conhecida na literatura. A modulação adotada é a SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) unipolar como apresentada em (Hart, 1997), que possui como principal vantagem, o aumento da frequência

das harmônicas do sinal de saída do inversor em relação à modulação SPWM bipolar. Deste modo, reduz-se significativamente o volume do filtro empregado.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a análise e modelagem de potência e controle do estágio STATCOM da estrutura apresentada na Fig. 2. Em um primeiro momento serão apresentadas: a modelagem matemática do fluxo de potência entre o inversor, a rede e a carga no PAC; a modelagem e estratégia de controle adotada, as funções de transferência das plantas e o projeto dos compensadores no domínio z. Por fim, serão apresentados resultados de simulação para validação da modelagem realizada.

2. MODELAGEM DO FLUXO POTÊNCIA

A Fig. 3 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.

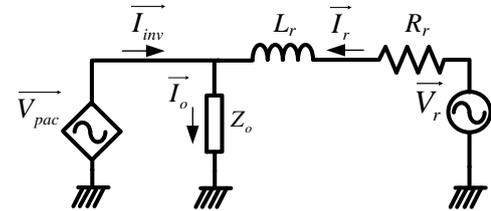


Fig. 3 Circuito simplificado do sistema conectado à rede.

A variação da carga no PAC e o comportamento do fluxo de potência entre as fontes (inversor e rede) são determinadas através da análise do circuito apresentado na Fig. 3 e suas respectivas equações baseadas nas leis de Kirchhoff.

2.1 Cálculo da correntes

A corrente na carga é determinada pela equação (1):

$$\vec{I}_o = \frac{\vec{V}_{pac}}{Z_o} \quad (1)$$

A corrente na linha de distribuição (2) pode ser determinada pela diferença de potencial entre a rede e o PAC e a impedância da linha de distribuição (3). A impedância da rede:

$$\vec{I}_r = \frac{\vec{V}_r - \vec{V}_{pac}}{Z_r} \quad (2)$$

$$Z_r = R_r + j\omega L_r \quad (3)$$

Pela lei de Kirchhoff, pode-se determinar a corrente fasorial no inversor. Logo, tem-se:

$$\bar{I}_{inv} = \frac{\bar{V}_{Pac}(Z_o + Z_r) - Z_o \bar{V}_r}{Z_r Z_o} \quad (4)$$

2.2 Cálculo da potência da rede de distribuição

Com a determinação da corrente fasorial na rede elétrica obtida em (2), pode-se determinar a potência aparente que flui através da rede de distribuição:

$$\bar{S}_r = \bar{V}_r \bar{I}_r^* \quad (5)$$

Substituindo (2) em (5) e colocando a tensão no PAC na forma retangular tem-se:

$$\bar{S}_r = \frac{V_r(V_r - V_{Pac} \cos \phi + jV_{Pac} \text{sen} \phi)(R_r + jX_r)}{R_r^2 + X_r^2} \quad (6)$$

Onde ϕ representa o ângulo de defasagem entre a tensão do PAC e a tensão da rede.

2.3 Cálculo da potência na carga

A potência aparente entregue à carga é dada pelo produto da tensão na carga pelo conjugado da corrente através da mesma. Dessa forma, tem-se:

$$\bar{S}_o = \bar{V}_o \bar{I}_o^* \quad (7)$$

Substituindo (1) em (7):

$$\bar{S}_o = \frac{V_{Pac}^2 R_o}{R_o^2 + X_o^2} + j \frac{V_{Pac}^2 X_o}{R_o^2 + X_o^2} \quad (8)$$

2.4 Cálculo da potência na impedância da linha

A potência aparente associada à impedância da linha de distribuição é dada por:

$$\bar{S}_l = \bar{V}_l \bar{I}_r^* \quad (9)$$

A queda de tensão na impedância da rede pode ser dada como a diferença entre a tensão na rede e a tensão no PAC, assim, pode-se substituir (2) e (3) em (9). Logo, tem-se:

$$\bar{S}_l = \frac{R_r(V_r^2 + V_{Pac}^2 - 2V_r V_{Pac} \cos \phi)}{R_r^2 + X_r^2} + j \frac{X_r(V_r^2 + V_{Pac}^2 - 2V_r V_{Pac} \cos \phi)}{R_r^2 + X_r^2} \quad (10)$$

2.5 Cálculo da potência reativa do inversor

A potência aparente drenada pelo inversor é dada por:

$$\bar{S}_r = \bar{V}_{Pac} \cdot \bar{I}_{inv}^* \quad (11)$$

Considerando que o ângulo ϕ é obtido de modo a fazer com que o inversor processe essencialmente potência reativa e substituindo a equação (4) em (11), tem-se a potência reativa processada pelo inversor:

$$Q_{inv} = \frac{V_{Pac}^2 [X_o(R_r^2 + X_r^2) + X_r(R_o^2 + X_o^2)]}{(R_r^2 + X_r^2)(R_o^2 + X_o^2)} - \frac{V_r V_{Pac} (R_o^2 + X_o^2)(X_r \cos \phi + V_r \text{sen} \phi)}{(R_r^2 + X_r^2)(R_o^2 + X_o^2)} \quad (12)$$

2.6 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. Na literatura, o filtro *LC* é comumente empregado para a filtragem do sinal de tensão na saída do inversor, e, considerando que o mesmo tem característica abaixadora característica dos conversores CC-CC da família *buck*, o dimensionamento do filtro pode ser realizado baseado nas equações apresentadas em (Erickson & Maksimovic, 2007).

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. Contudo, para garantir os critérios descritos, o filtro é projetado de modo a limitar a ondulação da corrente no indutor de filtro L_f e possuir frequência de corte entre a frequência da rede e a frequência de comutação das chaves. Segundo Hart (1997), a frequência de corte f_c deve estar na ordem de uma década abaixo da frequência de comutação f_{sw} .

Desse modo, pode ser determinado os valores de L_f e C_f em (13) e (15) respectivamente.

$$L_f = \frac{V_{cc}}{8f_{sw} \Delta L_f} \quad (13)$$

A frequência de corte do filtro é dada por:

$$f_c = \frac{f_{sw}}{10} \quad (14)$$

O capacitor de filtro é projetado de modo a produzir efeito ressonante na frequência de corte desejada. Logo:

$$C_f = \frac{1}{L_f (2\pi f_c)^2} \quad (15)$$

3. MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

Na Fig. 4 é apresentado o esquemático do sistema de controle implementado. A estratégia de controle baseia-se em utilizar duas malhas de controle de tensão, sendo uma com

realimentação da tensão do PAC e outra com realimentação da tensão no barramento CC. A malha de controle mais rápida ajusta o nível de tensão no PAC, enquanto que a malha mais lenta realiza o controle da injeção de potência reativa no PAC e, indiretamente, regula a tensão no barramento CC. A amostragem da tensão da rede é realizada para fins de sincronização da tensão do PAC através do uso de um qPLL monofásico baseado na estrutura proposta por (Sotelo, et al., 2002).

A estratégia de controle utilizada é baseada no trabalho de (Enderle, 2012), onde a autora implementa o 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. Segundo a estratégia, a malha mais lenta produz a referência da malha de controle do PAC, com ângulo de deslocamento ϕ ótimo de modo a garantir que a corrente injetada no PAC esteja sempre em quadratura com a tensão. O controlador da malha mais rápida, portanto, ajusta, a partir do erro entre ao sinal da saída do controlador da malha mais externa com a amostra da tensão do PAC, o índice de modulação do inversor de modo a garantir a tensão eficaz do PAC regulado.

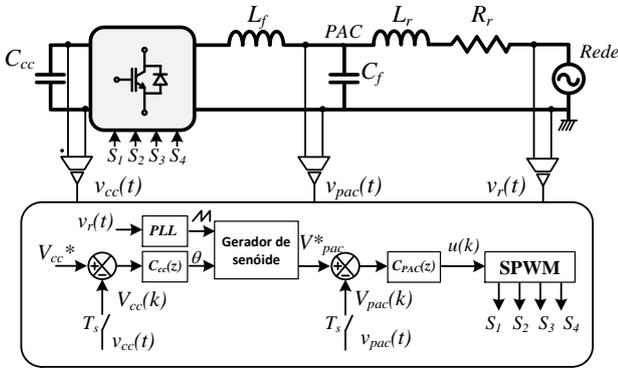


Fig. 4 Esquemático do sistema de controle implementado.

3.1 Malha de tensão do PAC

A Fig. 5 representa por meio de um diagrama de blocos, a malha de controle da tensão no PAC. Como pode-se observar, a malha possui realimentação unitária e possui dois blocos principais: o controlador $C_{pac}(z)$ e a planta $G_{pac}(z)$. O modelo da planta a ser controlada é baseado nas equações dinâmicas obtidas a partir do modelo simplificado apresentado na Fig. 6 e pelas equações do modulador SPWM em conjunto com o modelo linearizado da ponte completa do inversor. Deste modo, tem-se em (16) a representação em espaço de estados do modelo do inversor conectado à rede.

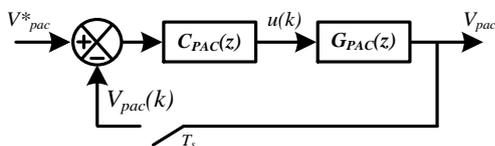


Fig. 5 Malha de controle da tensão do PAC.

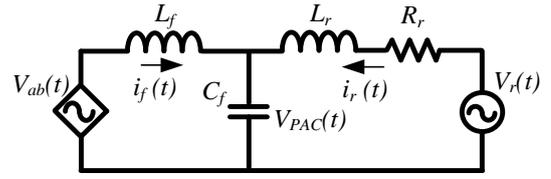


Fig. 6 Circuito equivalente composto pelo filtro LC e rede elétrica.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{1}{L_r} \\ \frac{1}{C_f} & \frac{1}{L_f} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{2V_{cc}}{V_m L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_r} \\ 0 \end{bmatrix} \quad D = [0 \ 0 \ 1] \quad (16)$$

Onde V_m é a amplitude da tensão da portadora do modulador e V_{cc} é a tensão nominal do barramento CC do inversor.

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

$$G_{pac}(s) = \frac{\hat{v}_{pac}(s)}{\hat{u}(s)} = C(sI - A)^{-1}B \quad (17)$$

Substituindo (16) em (17), tem-se:

$$G_{pac}(s) = \frac{2V_{cc}(R_r + L_r s)}{V_m [C_f L_f L_r s^3 + C_f L_f R_r s^2 + (L_f + L_r)s + R_r]} \quad (18)$$

O modelo discretizado da planta $G_{pac}(s)$ é obtido a partir de exemplo numérico através da ferramenta *sisotool* do *MATLAB*, e que para efeitos didáticos, será discutido em maior detalhe na seção exemplo de projeto deste documento.

3.2 Malha de tensão do barramento CC

Na Fig. 7 é apresentado o diagrama de blocos referentes à malha de tensão do barramento CC. Como já citado anteriormente, 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.

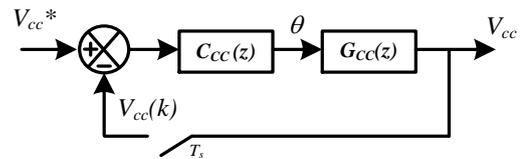


Fig. 7 Malha de controle da tensão no barramento CC.

O modelo matemático da planta da malha em estudo é realizado pela análise do circuito simplificado apresentado na Fig. 8, onde a modelagem baseia-se em relacionar o

comportamento do fluxo de potência entre as fontes de tensão em função da variação do ângulo θ . Detalhes da modelagem podem ser consultados em (Enderle, 2012). Deste modo, em (19) é apresentada a função de transferência que relaciona a tensão no barramento CC e o ângulo de defasamento entre as fontes.

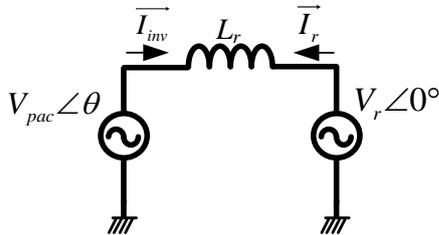


Fig. 8 Fluxo de potência do sistema à vazia.

$$G_{cc}(s) = \frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{\theta}(s)} = -\frac{V_r^2}{\omega L_r C_{cc} V_{cc} s} \quad (19)$$

4. EXEMPLO DE PROJETO

4.1 Considerações gerais

As especificações apresentadas na Tabela 1, assim como os parâmetros assumidos na Tabela 2 representam, respectivamente, as especificações do exemplo de projeto assim como os parâmetros assumidos para realização da modelagem e simulação do sistema ativo proposto. Os parâmetros de rede utilizados são baseados em sistemas de distribuição em tensão alternada 220V/60Hz com impedância de 0,2 p.u relativa a potência nominal do barramento de distribuição e com relação X_r/R_r unitária. Na Tabela 3 são apresentados os valores assumidos do filtro LC do inversor modelados a partir de (13), (14) e (15).

Tabela 1. Especificações para o exemplo de projeto

Tensão média do barramento CC	400V
Tensão eficaz da rede	220V
Potência aparente do inversor	3,5 kVA

Tabela 2. Parâmetros assumidos

Ondulação de corrente no indutor $L_f \Delta i_{L_f}$	30%
Frequência de chaveamento f_{sw}	20 kHz
Frequência da rede elétrica f_r	60 Hz
Resistência série da rede R_r	1,956 Ω
Indutância série da rede L_r	5,188 mH

4.2 Sistema de Controle

Na Tabela 4 são apresentadas as considerações gerais sobre o projeto do sistema de controle considerando as características de *hardware* de um DSP modelo TMS320F28379D-ZWT. O período de amostragem escolhido é projetado para realizar duas amostras de leitura a cada período de chaveamento. A amplitude da portadora e o ganho do conversor A/D são projetados baseados em um conversor de 12 bits de resolução e *clock* base de 200MHz, entretanto, o ganho de realimentação é corrigido internamente ao microcontrolador de modo a conferir realimentação unitária.

Tabela 3. Filtro LC

Frequência de ressonância f_{res}	1,779 kHz
Capacitância C_f	20 μ F
Indutância L_f	400 μ H

Tabela 4. Parâmetros assumidos para o sistema de controle

Período de amostragem T_s	25 μ s
Amplitude da portadora K_c	2500
Ganho do conversor A/D H_{AD}	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 T_s . Deste modo, em (20) e (21), são apresentadas as FTMA para as malhas de tensão no PAC e tensão no barramento CC, respectivamente.

$$FTMA_{V_{pac}}(z) = K_c \cdot G_{pac}(z) \cdot H_{V_{pac}} \cdot H_{AD} \quad (20)$$

$$FTMA_{V_{cc}}(z) = K_c \cdot G_{cc}(z) \cdot H_{V_{cc}} \cdot H_{AD} \quad (21)$$

Onde K_c representa o ganho da portadora digital, $H_{V_{pac}}$ e $H_{V_{cc}}$ representa o ganho do sensoriamento e H_{AD} representa o ganho do conversor A/D.

4.3 Projeto dos Controladores Discretos

As expressões apresentadas em (22) e (23) são as FTs discretizadas dos compensadores da malha de tensão no PAC e de tensão no barramento CC, respectivamente. Para a malha de tensão no PAC, o compensador foi projetado de modo a garantir que a função de transferência compensada discreta $FTLA_{V_{pac}}(z)$ apresente elevado ganho na frequência da rede, frequência de cruzamento ($f_c = 4$ kHz) 1/5 da frequência de comutação do modulador SPWM e margem de fase entre 45°

e 60° . Deste modo, utilizou-se de um compensador ressonante na frequência de 60Hz, alocação de zeros complexos conjugados para anular o efeito ressonante do filtro LC e alocação de zero e pólo real para ajustar ganho e margem de fase. Para o projeto do compensador de tensão no barramento CC é projetado um controlador PI de modo a conferir: ganho elevado em baixas frequências; ajuste da frequência de cruzamento em torno de duas décadas abaixo da frequência de cruzamento da malha mais rápida (40 Hz), possibilitando, assim, desacoplamento entre as malhas e margem de fase em torno de 67° . O diagrama de bode da FTMA não-compensada, $FTMA(z)$, compensada, $FTLA(z)$ e do controlador de ambas as malhas são apresentadas na Figura 9 e 10, respectivamente.

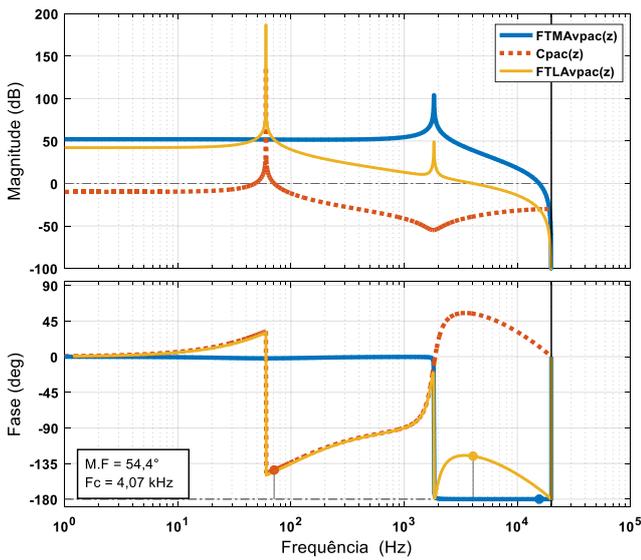


Fig. 9 Diagrama de bode da FTMA não-compensada, FTMA compensada e controlador da malha de tensão no PAC.

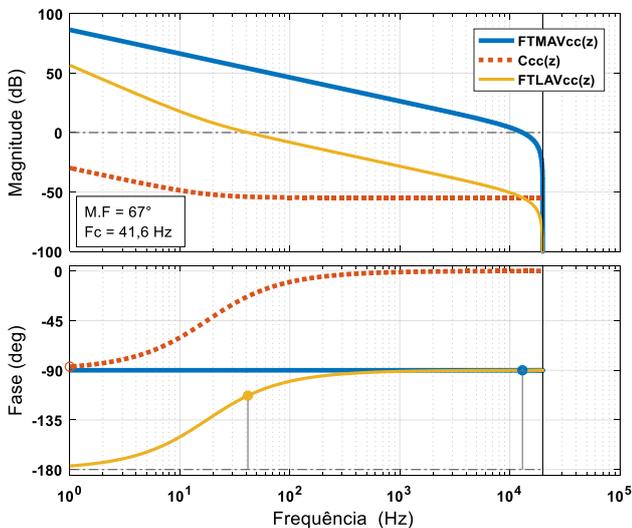


Fig. 10 Diagrama de bode da FTMA não-compensada, FTMA compensada e controlador da malha de tensão no barramento CC.

$$C_{PAC}(z) = 0,0199 \frac{(z-0,9851)(z^2-1,8480z+0,9257)}{(z-0,1916)(z^2-2z+1)} \quad (22)$$

$$C_{CC}(z) = 0,0018 \frac{(z-0,9972)}{(z-1)} \quad (23)$$

5. RESULTADOS

A Fig. 11 apresenta as principais formas de onda no sistema ativo proposto operando em potência nominal. Inicialmente é apresentada a forma de onda nos terminais ab do inversor, a tensão no PAC e a corrente injetada pelo inversor no barramento de distribuição. 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.

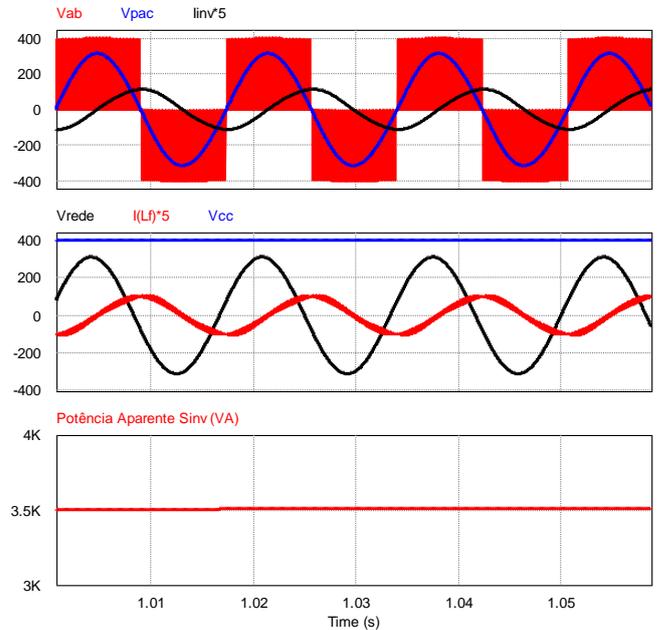


Fig. 11 Tensão V_{ab} no inversor, Tensão no PAC e corrente injetada pelo inversor; Tensão no barramento CC, na rede e Corrente no indutor de filtro do inversor; Potência aparente processada pelo inversor.

A Fig. 12 apresenta a resposta dinâmica das principais grandezas no 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 mantém-se regulada mesmo com a variação de potência processada pelo inversor. Como esperado, o ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC é ajustado após o degrau de modo a garantir que a impedância

vista pelo inversor seja puramente complexa, e desta forma injeta-se apenas potência reativa. Este comportamento pode ser observado também pela quadratura entre a corrente e tensão no PAC em ambos os estados de carga e pelo fator de potência nulo medido nos terminais do inversor em todo o intervalo de simulação. Desta forma, valida-se a modelagem realizada e a estratégia de controle implementada.

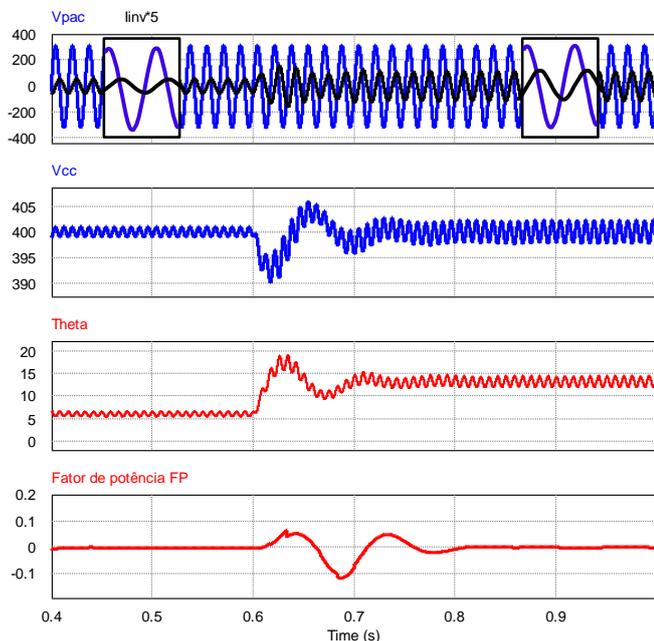


Fig. 12 Resposta dinâmica do sistema ativo quando submetido à degrau de carga.

6. 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, para, dentre outras ações, além da apresentada neste trabalho, garantir a injeção de potência ativa, com o propósito de realizar compensação tarifária. Logo, um estudo futuro do DSTATCOM proposto consiste no processamento de energia ativa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), aos Programas de Eficiência Energética e P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL – PEE – P&D) e Enel Distribuição Ceará por todo o suporte oferecido para a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Enderle, T. P., 2012. *Análise, projeto e implementação de um D-STATCOM para redes de distribuição monofásica*, Santa Maria: pp.118.
- Erickson, R. W. & Maksimovic, D., 2007. *Fundamentals of Power Electronics*. s.l.:Springer.
- Hart, D. W., 1997. *Introduction to Power Electronics*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Petkova, M., Antchev, M. & Tomova, A., 2013. Computer investigation and verification of the operation of a single-phase on-grid inverter with hysteresis-current control. *Eurocon*, july.
- Silva, C. E. d. A., 2007. *Inversor monofásico Isolado em Alta frequência com ampla faixa de tensão de entrada*, Fortaleza: pp.153.
- 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*, pp. 480-485.
- 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)*.