

COMPENSAÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS EM STATCOM CONECTADO A REDE COM TENSÃO DISTORCIDA

A. R. CASTRO*, G. F. GONTIJO*, S. D. GUEDES*, L. F. SILVA*, E. C. MALATEAUX†, R. DIAS†, M. AREDES*

*LEMT/COPPE/UFRJ - Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão
Cidade universitária
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

†CENPES - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, Petrobras
Cidade Universitária
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Emails: andrerc@lemt.ufrj.br, gustavo@lemt.ufrj.br, sersan@lemt.ufrj.br,
leonardo@lemt.ufrj.br, ezequiel.malateaux@petrobras.com.br, rodias@petrobras.com.br,
aredes@lemt.ufrj.br

Abstract— A static synchronous compensator (STATCOM), when connected to a grid with distorted voltages, may have its compensation capabilities limited by the circulation of harmonic currents. This paper aims to present a proportional resonant current control solution for such a case, applying it to the design of a STATCOM to be installed in one of Petrobras' land oil field distribution network. A discrete-time state-space representation of the system was obtained to aid in the current control loop design. The network was modeled in the software PSCAD/EMTDC for validation. Simulations show satisfactory results in reducing the harmonic content of the current drained by the STATCOM.

Keywords— Power Conditioning, STATCOM, harmonics propagation, resonant control.

Resumo— Um compensador estático de reativos (STATCOM), ao ser conectado a uma rede com tensão distorcida, pode ter sua capacidade de compensação limitada pela circulação de correntes harmônicas. Este artigo tem como objetivo apresentar uma solução baseada no controle de corrente proporcional ressonante para tal caso, com aplicação ao projeto de um STATCOM a ser instalado na rede de distribuição de um campo de petróleo terrestre da Petrobras. Uma representação em espaço de estados no tempo discreto foi obtida para auxiliar no projeto da malha de controle de corrente. A rede foi modelada no programa PSCAD/EMTDC para validação do projeto. Simulações mostram resultados satisfatórios na redução do conteúdo harmônico da corrente drenada pelo STATCOM.

Palavras-chave— Condicionamento de Energia, STATCOM, propagação de harmônicos, controle ressonante.

1 Introdução

Este trabalho se baseia no projeto de um compensador dinâmico de reativos (designado como STATCOM-BR) de 800 kVA em uma rede elétrica de 13,8 kV da Petrobras que alimenta campos terrestres de produção de petróleo e escoa a energia gerada por uma pequena usina eólica no município de Macau, Rio Grande do Norte. A intermitência da injeção de potência ativa por parte dos aerogeradores, e consequente flutuação de tensão da rede, é prejudicial à operação de muitas cargas que são alimentadas por essa rede (chamada, neste trabalho, de Macau).

Como o STATCOM-BR foi projetado para regular a tensão da rede através da sintetização de uma tensão apenas de componente fundamental, o mesmo se torna um caminho de baixa impedância para componentes harmônicas de correntes ao ser conectado à rede. A circulação de correntes harmônicas pelo equipamento reduz a capacidade deste de compensar potência reativa através da injeção de correntes de componente fundamental. Nesse contexto, faz-se necessária a implementação de um controle de corrente que atenua a circulação

de correntes harmônicas pelo STATCOM-BR, de forma a otimizar o seu desempenho na regulação de tensão da rede.

2 As correntes harmônicas

Parte das cargas presentes na rede de Macau é composta por motores acionados por conversores, que injetam correntes harmônicas no sistema. As correntes harmônicas, ao circularem pela impedância da rede de Macau, geram uma queda de tensão e distorcem a tensão no Ponto de Conexão Comum (PCC) V_g . As figuras 1 e 2 ilustram esse efeito através de circuitos equivalentes onde a parcela não linear da carga age como fontes de corrente em frequências harmônicas, sendo $H(s)$ a impedância do filtro do STATCOM-BR e $G(s)$, da rede de Macau.

O STATCOM-BR é projetado para regular a tensão do PCC através da injeção de correntes de componente fundamental conforme ilustrado na figura 1. No entanto, ao ser conectado à rede elétrica, o STATCOM-BR reduz a impedância para as correntes harmônicas que circulam em Macau, já que sintetiza uma tensão de 60 Hz. O circuito

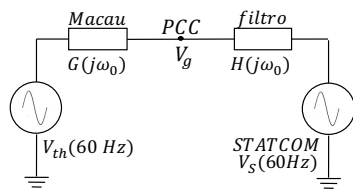


Figura 1: Circuito elétrico equivalente da Rede de Macau na frequência fundamental (60 Hz).

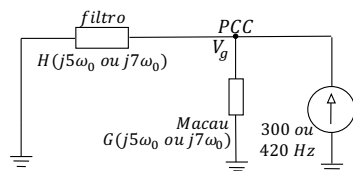


Figura 2: Circuito elétrico equivalente da Rede de Macau nas frequências harmônicas.

elétrico da rede de Macau nas frequências harmônicas pode ser analisado na figura 2, que representa o efeito de cargas não lineares através de fontes de corrente. A conexão do STATCOM-BR ao PCC corresponde, de fato, à adição de uma impedância paralelamente à da rede, reduzindo a impedância equivalente, drenando correntes harmônicas e reduzindo a tensão harmônica no PCC.

Medições em campo antes da conexão do STATCOM-BR ilustram os níveis da distorção harmônica de tensão no PCC na figura 3. Pode-se notar mais de 9% de contaminação de quinto harmônico, com relação à fundamental, e entre 2 e 3% de contaminação de sétimo harmônico. Nessas condições, a conexão do STATCOM-BR levou à circulação de 10% de corrente de quinto harmônico, 2% de sétimo e à redução das tensões harmônicas no PCC para aproximadamente 5% de quinto e 1% de sétimo.

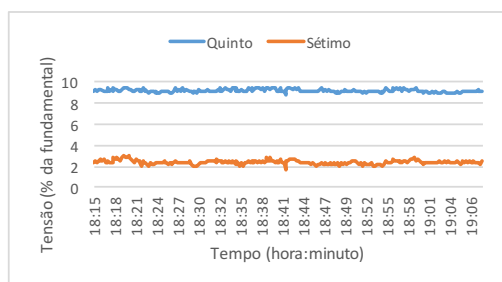


Figura 3: Medição de harmônicos na tensão de fase do PCC.

3 Modelos desenvolvidos

3.1 Simulador de transientes eletromagnéticos

A rede elétrica de interesse foi modelada no simulador de transientes eletromagnéticos PS-

CAD/EMTDC. Trata-se de uma rede de distribuição de 13,8 kV. Dados disponíveis da rede são sua topologia, potências de cargas individuais e dados de impedância série de sequência positiva e zero de linhas e transformadores. As cargas individuais são motores a partida direta (assumiu-se um fator de potência de 0,85 indutivo) ou com inversores de frequência, cujo estágio de entrada é um retificador não controlado.

A rede possui linhas de transmissão curtas, de até 9 km, que foram representadas como modelos de cabos mutuamente acoplados, que recebem parâmetros de impedância de sequência positiva e zero. Os retificadores não controlados dos inversores que acionam os motores foram modelados por uma ponte de diodos trifásica, com uma resistência no lado CC adequadamente dimensionada pelo nível de potência do motor. Os três aerogeradores que compõem a usina eólica foram modelados como fontes de corrente sincronizadas à tensão da rede por um sistema *Phase Locked Loop* (PLL) com fator de potência unitário.

Para se validar a modelagem da rede, a simulação foi comparada com medições feitas em campo. Como não se sabia a configuração da topologia da rede no instante da medição, condições variadas foram consideradas na simulação. A figura 4 apresenta os níveis de quinto e sétimo harmônicos para a seguinte sequência de eventos na rede:

- até os 0,1 s: aerogeradores desligados;
- de 0,1 a 0,3 s: corrente injetada por aerogeradores subiu em rampa de 0 a 0,5 p.u.;
- de 0,35 a 0,55 s: corrente injetada por aerogeradores subiu em rampa de 0,5 a 1,0 p.u.;
- em 0,6 s: banco de capacitores de 450 kVar foi desconectado;
- em 0,7 s: banco de capacitores de 450 kVar foi reconectado e um banco de capacitores de 900 kVar foi desconectado;
- em 0,8 s: banco de capacitores de 900 kVar foi reconectado e carga de 74 kW foi desconectada;
- em 0,9 s: carga da barra de 74 kW foi reconectada e carga de 60 kW em outra barra foi desconectada.

Pode-se notar que, para uma determinada configuração, a rede modelada reproduz níveis de tensão harmônica compatíveis com as medições de campo (figura 3). Isto é, há aproximadamente 8,8% de quinto harmônico, além de aproximadamente 4,8% de sétimo harmônico.

Um segundo modelo, linearizado, da rede de Macau foi desenvolvido, de modo que se pudesse

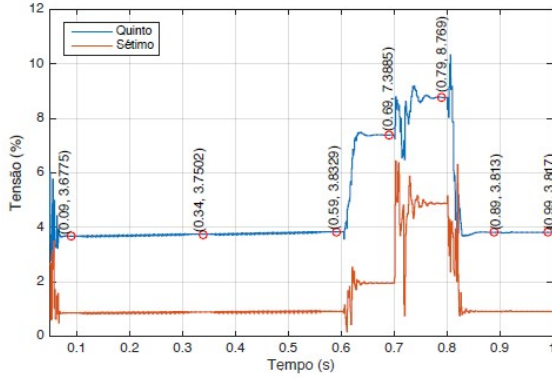


Figura 4: Componentes de quinto e sétimo harmônicos da tensão de linha.

utilizar as ferramentas de controle clássico no projeto do controlador. Esse novo modelo é utilizado para obter uma representação da rede em espaço de estados. Nessa nova rede, os motores acionados por conversores foram substituídos por motores acionados por partida direta com fator de potência unitário. Ou seja, foram modelados por resistências ligadas em estrela que, à tensão nominal, consomem a potência especificada do motor.

3.2 Espaço de estados

A análise do STATCOM-BR com filtro LCL nos eixos estacionários $\alpha\beta$ levou ao desenvolvimento do circuito equivalente representado na figura 5. Deste circuito equivalente, extraiu-se uma representação em espaço de estados.

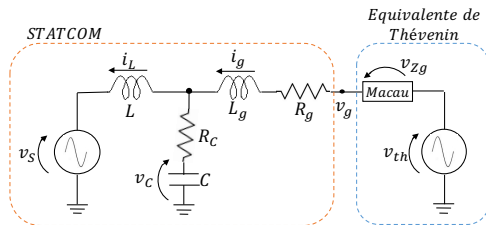


Figura 5: Circuito elétrico equivalente em eixo estacionário (α ou β) do STATCOM-BR com filtro LCL para a obtenção do modelo em espaço de estados.

O STATCOM-BR é representado por um modelo com duas entradas (tensão do inversor v_s e tensão da rede v_g) e duas saídas (corrente do conversor i_L e corrente da rede i_g). Os elementos L , C e R_C constituem um filtro passivo, enquanto L_g e R_g representam um transformador 13,8 kV/560 V. O modelo do STATCOM-BR com filtro LCL em espaço de estados é dado por (1).

$$\dot{\underline{x}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & \frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_C + R_L}{L} & -\frac{R_C}{L} \\ -\frac{1}{L_g} & \frac{R_C}{L_g} & -\frac{R_C + R_g}{L_g} \end{bmatrix} \underline{x}(t)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_g} \end{bmatrix} \underline{u}(t) \quad (1)$$

$$\underline{y}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \underline{x}(t)$$

As variáveis de estado, os sinais de entrada e os sinais de saída são dados por

$$\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} v_C(t) \\ i_L(t) \\ i_g(t) \end{bmatrix}, \quad \underline{u}(t) = \begin{bmatrix} v_s(t) \\ v_g(t) \end{bmatrix} \quad e$$

$$\underline{y}(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ i_g(t) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

O modelo linear da rede de Macau foi utilizado para o levantamento da resposta em frequência no PCC com um componente de cálculo de impedância do simulador PSCAD/EMTDC. As demais fontes da rede foram desligadas. Mediu-se então a impedância no PCC para frequências de 1 Hz a 10 kHz. Esse resultado é uma aproximação da impedância da rede de Macau vista do PCC. O modelo em espaço de estados da rede de Macau é determinado, através de uma função de ajuste, com auxílio do *software* MATLAB, utilizando-se a resposta em frequência levantada. A figura 6 apresenta as respostas em frequência calculadas pelo PSCAD/EMTDC a partir da rede simulada e pelo MATLAB a partir do modelo em espaço de estados ajustado.

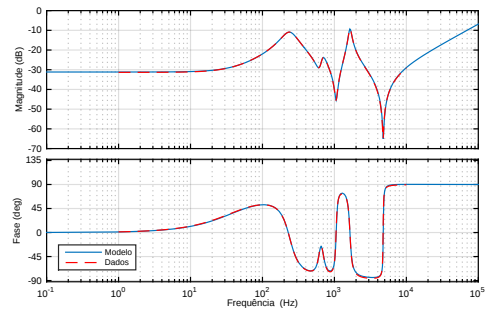


Figura 6: Diagrama de Bode do modelo de impedância da rede ajustado aos dados simulados a partir da rede linearizada.

A figura 7 apresenta um diagrama de blocos da malha de controle de corrente. A corrente de referência i_{Lref} é fornecida ao controlador, que processa o sinal e fornece uma tensão de referência ao conversor PWM. Neste modelo linearizado, o conversor PWM foi considerado como um conversor digital-analógico (D/A) do tipo *Zero-Order Hold* (ZOH) com um ganho igual à metade da tensão no elo CC, que está fixa. O bloco tracejado representa a planta do ponto de vista do microcontrolador digital e indica a porção do sistema modelada no tempo contínuo. O sensor de corrente (LEM HAX 850-S) é modelado como um

filtro passa baixa de primeira ordem com frequência de corte de 25 kHz e ganho de conversão de corrente de saída para o sistema por unidade.

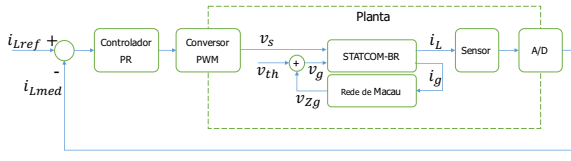


Figura 7: Diagrama da malha de controle de corrente fechada.

4 Controlador de corrente

O controle implementado consiste em duas malhas externas: regulação de tensão no elo CC do conversor e da tensão eficaz no PCC. Estas duas malhas contribuem para a composição do sinal de referência para a malha interna de corrente (Ortiz et al., 2008), de acordo com a teoria p-q (Akagi et al., 2007), como indicado na figura 8.

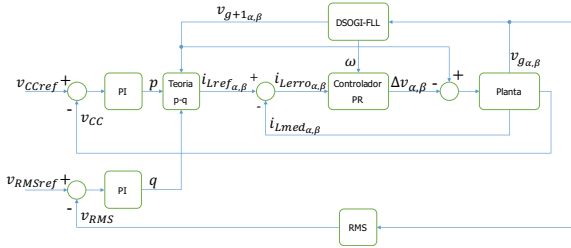


Figura 8: Diagrama geral do controle do STATCOM-BR.

Buscando melhor rendimento do STATCOM-BR, necessitou-se incorporar ao diagrama da figura 8 um método de controle específico para o tratamento de conteúdo harmônico, a fim de evitar que tais correntes sejam drenadas pelo dispositivo. Este papel será desempenhado pelo controlador proporcional ressonante (PR).

4.1 O controlador proporcional ressonante

Com eixos estacionários proporcionados pela Transformação de Clarke, os sinais trifásicos podem ser tratados em duas malhas de controle, a primeira correspondente ao eixo α e a segunda ao eixo β . No controle de sinais senoidais, os controladores PR são uma solução para a eliminação de erro em regime permanente sem o uso da Transformação de Park com controladores proporcionais integrais (PI).

De acordo com o Princípio do Modelo Interno (Fukuda and Yoda, 2001), para se rastrear um sinal com erro nulo em regime permanente, é necessário que o sistema possua, em malha aberta, o modelo matemático deste sinal. No caso de sinais constantes, basta um controlador PI, pois

a transformada de Laplace do integrador corresponde à do degrau. No caso de sinais senoidais, utiliza-se o controlador PR, como a forma em (3). O denominador da segunda parcela corresponde ao das transformadas de Laplace do seno e do cosseno e faz de $G_{PR}(s)$ ressonante na frequência ω_r . A função $N(s)$ pode ser uma constante (transformadas de Laplace do seno) ou um zero na origem (transformadas de Laplace do cosseno).

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_i N(s)}{s^2 + \omega_r^2} \quad (3)$$

4.2 Projeto do controlador

No novo controlador, duas parcelas ressonantes foram adicionadas em paralelo ao controlador PR de componente fundamental. As novas parcelas são referentes aos harmônicos de quinta e sétima ordem, as maiores componentes harmônicas presentes na tensão da rede.

Devido à implementação digital do controlador nesta aplicação, deve ser considerada a forma discreta utilizada para a parcela ressonante em (3). No projeto original, utilizava-se a aproximação dada por (4), onde K_i é o ganho da parcela ressonante a ser ajustado, h é o período de amostragem e ω_r é a frequência de ressonância.

$$H(z) = \frac{K_i \omega_r h z (z - 1)}{z^2 + (\omega_r^2 h^2 - 2)z + 1} \quad (4)$$

Foi demonstrado que esta aproximação é computacionalmente eficiente e numericamente estável, porém, pode levar a um desvio da frequência de ressonância real do controlador em relação à frequência ω_r (Rodriguez et al., 2008). Estudos realizados por Yepes et al. (2010) compreendem comparações exaustivas entre diferentes formas encontradas na literatura para discretização de controladores ressonantes, sugerindo uma discretização ótima que inclui compensação de atraso computacional. Essa discretização é apresentada na equação (5), onde N representa o número de períodos de amostragem a serem compensados.

$$H_o(z) = K_i h z \frac{z \cos(\omega_r h N) - \cos[\omega_r h (N - 1)]}{z^2 - 2 \cos(\omega_r h)z + 1} \quad (5)$$

Observando que o esquema sugerido de compensação de atraso computacional realiza apenas um deslocamento em um dos zeros da função de transferência para fora do círculo unitário, sugerimos neste trabalho a discretização apresentada em (6), onde este zero é um parâmetro a ser ajustado z_r . Seus dois polos estão sobre o círculo unitário, fato que garante que a ressonância de $H_o^*(z)$ sobre a frequência ω_r , como mostra a figura 9.

$$H_o^*(z) = \frac{K_i h z (z - z_r)}{z^2 - 2 \cos(\omega_r h)z + 1} \quad (6)$$

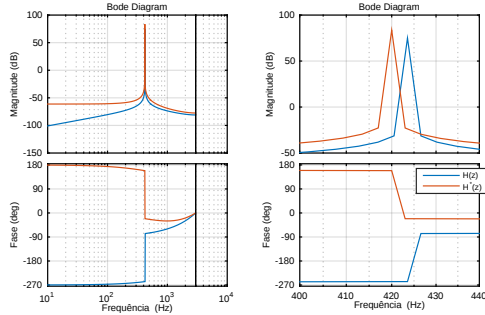


Figura 9: Diagramas de Bode das funções de transferência (4) e (6) sintonizadas no sétimo harmônico ($\omega_r = 2\pi \times 420$ rad/s) com $z_r = 1,9091$.

O ganho da parcela ressonante da frequência fundamental foi determinado para um erro máximo de rastreamento de i_{Lref} e rejeição mínima a perturbações da tensão v_{th} de -40 dB na faixa entre 59,9 e 60,1 Hz. Os ganhos de cada parcela ressonante harmônica foram obtidos a partir da minimização de (7). Os parâmetros V_i são constantes correspondentes aos níveis de cada harmônico na tensão medida em visita a campo e G_i , aos ganhos do sistema em malha fechada $I_{Lmed}(z)/V_{thpu}(z)$ para perturbações de tensão na rede nas frequências $59,9 \times i$ Hz. Logo, a minimização de (7) corresponde à minimização do valor RMS de correntes harmônicas devido às componentes de ordem cinco, sete e onze.

$$I_H(G_5, G_7, G_{11}) = \left[(V_5 G_5)^2 + (V_7 G_7)^2 + (V_{11} G_{11})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Os parâmetros z_r de cada parcela ressonante e o parâmetro K_p foram determinados através das ferramentas do MATLAB para amostragem de modelos com parâmetros ajustáveis (i.e., recalculando o modelo para determinadas combinações de parâmetros) de forma a maximizar a margem de estabilidade do sistema. Para este fim, pode ser utilizada a definição de margem de estabilidade apresentada por Yepes et al. (2011), mais genérica e compacta que margens de ganho e fase, tornando o projeto mais simples e robusto. Neste projeto, foi utilizada uma definição semelhante, cujos detalhes estão fora do escopo deste trabalho e serão apresentados em outra ocasião.

Com a discretização (6), foi possível utilizar ganhos que minimizassem (7) mantendo boas margens de estabilidade, como mostra a figura 10. Com os parâmetros do novo controlador completamente determinados, obteve-se $I_H = 0,5\%$ em relação à corrente nominal. Esse valor representa uma redução de 97% na absorção de corrente nas principais componentes harmônicas.

O desempenho do sistema em malha fechada pode ser analisado através do seu diagrama de

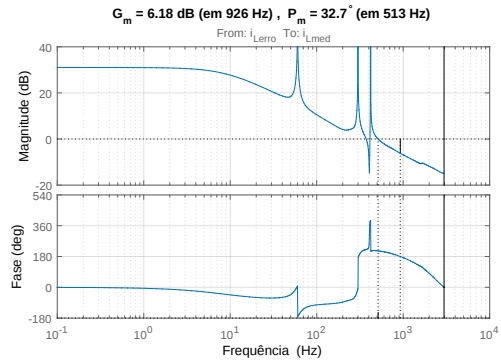


Figura 10: Diagrama de Bode do sistema em malha aberta, com compensação de quinto e sétimo harmônicos e discretização dada por (6).

Bode, considerando os efeitos em relação à referência de corrente (i_{Lref}) e à perturbação (v_{th}). Tais diagramas de Bode são apresentados na figura 11, onde todas as grandezas estão no sistema por unidade.

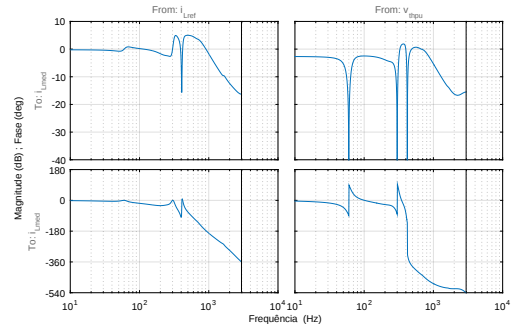


Figura 11: Diagrama de Bode de malha fechada mostrando o efeito das duas entradas, i_{Lref} e v_{thpu} , sobre a saída i_{Lmed} .

A coluna direita da figura 11 mostra claramente a capacidade de bloqueio de correntes harmônicas nas frequências selecionadas. Perturbações causadas por tensão da rede entre 59,9 e 60,1 Hz sofrem rejeição melhor que -41 dB. Para quinto harmônico, a rejeição mínima é de -35 dB e, para o sétimo, -28 dB.

5 Resultados

O controlador projetado foi testado na simulação desenvolvida em PSCAD/EMTDC com bons resultados. A figura 12 apresenta os níveis de corrente harmônica drenada pelo STATCOM-BR com o controlador original (PR apenas em frequência fundamental) para a rede com configuração nominal até os 3 s de simulação. Aos 3 s, um banco de capacitores de 900 kVar é desconectado, aumentando a distorção da tensão e, consequentemente, a corrente harmônica drenada.

Comparativamente, a figura 13 apresenta o

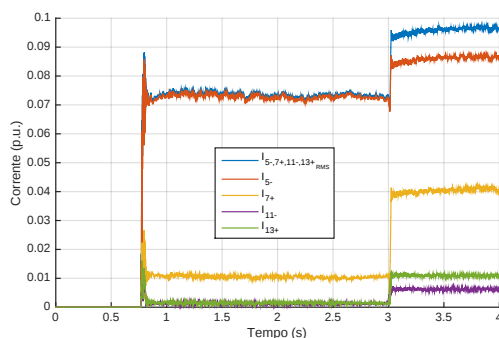


Figura 12: Níveis de corrente harmônica durante simulação com controlador proporcional ressonante original, com parcela ressonante apenas de componente fundamental.

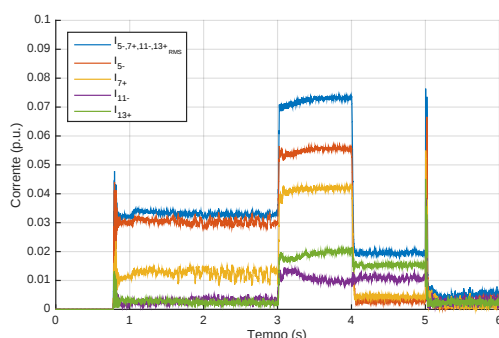


Figura 13: Níveis de corrente harmônica durante simulação com controlador projetado.

desempenho do novo controlador. O banco de capacitores de 900 kVar é desconectado aos 3 s e reconectado aos 5 s. As novas parcelas ressonantes (300 Hz e 420 Hz) são habilitadas apenas aos 4 s de simulação, quando observa-se uma redução nos níveis de corrente harmônica drenada.

6 Conclusões

Com o objetivo de solucionar o problema da presença de correntes harmônicas no STATCOM-BR, seu controlador de corrente foi reprojeto. O modelo da rede elétrica de Macau desenvolvido no simulador PSCAD/EMTDC auxiliou o projeto do controlador e serviu para validação parcial do projeto. O bloqueio de correntes harmônicas foi realizado por blocos ressonantes com uma nova discretização. A metodologia utilizada no projeto do controlador foi apresentada.

As análises e os resultados apresentados permitem concluir que o novo projeto do controlador de corrente do STATCOM-BR atinge o objetivo de redução das correntes harmônicas drenadas pelo equipamento. Foram obtidas reduções de corrente harmônica RMS de 79% no caso sem o banco de capacitores de 900 kVar e 93% no caso nominal, mantendo margem de ganho de 6,18 dB

e margem de fase de 32,7°.

Na etapa que segue este trabalho, o controlador projetado será embarcado no protótipo STATCOM-BR na rede de Macau. Nesta ocasião, portanto, será possível observar o desempenho do controlador em campo e verificar a validade das conclusões aqui apresentadas.

Agradecimentos

Este trabalho é um produto parcial do projeto "Evolução do compensador dinâmico de reativos STATCOM-BR" PD-0553-0027/2014, desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, regulado pela ANEEL, cuja proponente é a Petrobras e a Executora a COPPE/UF RJ.

Referências

- Akagi, H., Watanabe, E. H. and Aredes, M. (2007). *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*, Vol. 31, John Wiley & Sons.
- Fukuda, S. and Yoda, T. (2001). A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model [for pwm invertors], *Industry Applications, IEEE Transactions on* **37**(3): 888–895.
- Ortiz, A., Aredes, M., Rolim, L. G., Bueno, E. and Rodriguez, P. (2008). A new current control for the statcom based on secondary order generalized integrators, *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*, IEEE, pp. 1378–1383.
- Rodriguez, F., Bueno, E., Aredes, M., Rolim, L., Neves, F. A. and Cavalcanti, M. C. (2008). Discrete-time implementation of second order generalized integrators for grid converters, *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, IEEE, pp. 176–181.
- Yepes, A. G., Freijedo, F. D., Doval-Gandoy, J., Lopez, O., Malvar, J. and Fernandez-Comesa, P. (2010). Effects of discretization methods on the performance of resonant controllers, *Power Electronics, IEEE Transactions on* **25**(7): 1692–1712.
- Yepes, A. G., Freijedo, F. D., López, Ó. and Doval-Gandoy, J. (2011). Analysis and design of resonant current controllers for voltage-source converters by means of nyquist diagrams and sensitivity function, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* **58**(11): 5231–5250.