

Controle de Corrente Adaptativo por Modelo de Referência Aplicado a DSTATCOM Utilizado em Sistemas Baseados em GIAE

Gabriel Attuati, Robinson Figueiredo de Camargo, Lucas Giuliani Scherer

Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Email: ga.attuati@gmail.com, robinson.camargo@gmail.com, lgscherer@gmail.com

Resumo—Este artigo trata do desenvolvimento de um controlador de corrente adaptativo por modelo de referência (RMAC) aplicado em um compensador síncrono estático de distribuição (DSTATCOM), para a regulação de tensão, compensação harmônica e de desequilíbrios de correntes de sistemas baseados em gerador de indução autoexcitados (GIAE). É considerado um sistema isolado trifásico a três fios, composto por um gerador de indução (GI) acionado por uma máquina primária de velocidade constante, o qual é regulado por um DSTATCOM trifásico de três braços. O controlador RMAC proposto garante o comportamento dinâmico da malha de corrente de acordo com um modelo de referência para todas as condições de carga do sistema. Resultados de simulação computacional são apresentados para demonstrar a viabilidade da técnica no sistema proposto.

Keywords – Controle Adaptativo, DSTATCOM, Gerador de Indução Autoexcitado

I. INTRODUÇÃO

Geradores de indução auto-excitados são apresentados como uma opção tecnicamente viável em microrredes isoladas com fontes não convencionais, tais como micro-hidro e biomassa [1], [2]. Isto se deve principalmente a suas características como robustez, alta densidade de energia, reduzido custo e demanda por manutenção, construção sem escovas e autoproteção contra curto-circuitos. Apesar disso, apresentam desafios devido à sua má regulação de frequência e tensão, necessitando de sistemas adicionais para controlar essas variáveis. Entre as topologias propostas para resolver estes problemas, destaca-se o uso de um DSTATCOM em paralelo ao sistema [2]–[4].

Em aplicações com GIAE, o DSTATCOM é geralmente controlado através do uso de sistemas multi-malhas [3], com malhas externas para regulação de tensão dos barramentos CA e CC, respectivamente para o GIAE e DSTATCOM, que então produzem as referências para as malhas internas que controlam a corrente sendo injetada no sistema. Como cargas não lineares e desbalanceadas são comuns nesse tipo de sistema, aproveita-se o DSTATCOM para também realizar a compensação destas, devendo os controladores utilizados ter capacidade para tanto.

É comum que nas malhas externas de tensão CA do GIAE e CC do DSTATCOM seja utilizado controladores convencionais do tipo PI [3], [5]. Em relação a malha interna de corrente, para aplicações com GIAE observa-se que o controlador de corrente por histerese é o método mais utilizado [6]–[8].

Apesar de suas vantagens como robustez, bom rastreamento de referência e boa capacidade dinâmica, apresenta problemas como frequência de chaveamento variável, baixa qualidade e alta ondulação de corrente, além de maior dificuldade para o projeto do filtro [9].

Uma alternativa é o uso de controladores que trabalham em conjunto com técnicas de modulação convencionais para conversores PWM de fonte de tensão, por exemplo, PWM sinusoidal, *space vector* ou modulação geométrica. Esses moduladores têm vantagens em seu uso, como espectro harmônico e padrão de comutação bem definidos, e aproveitamento ótimo do barramento CC [9]. Neste contexto, o esquema de controle PI no sistema de coordenadas síncronas rotativas é comumente usado e funciona adequadamente em sistemas balanceados, mas pode apresentar desempenho insatisfatório em algumas aplicações em sistemas com tensões ou correntes perturbadas com harmônicos ou desequilíbrios [10].

O controlador ressonante proporcional é uma alternativa e foi proposto para o controle de corrente de DSTATCOM nas aplicações com GIAE em [11]. Os resultados demonstram que os controladores podem compensar adequadamente os harmônicos presentes nas correntes de carga. Apesar disso, o uso de controladores clássicos como PI ou PR em um sistema com o GIAE enfrenta dificuldades devido à complexidade da modelagem da máquina de indução. Como o modelo do GIAE é não-linear e de alta ordem, de sexta ordem para cargas resistivas, o problema do projeto sistemático do controlador é complexo [12].

Dessa maneira, surge a possibilidade do uso de controladores robustos, já que estes apresentam como uma de suas características a tolerância a dinâmicas não modeladas [13]. Nesse sentido, em [14] é proposto um controlador adaptativo por modelo de referência aplicado somente à malha de regulação de tensão de um sistema isolado com GIAE. Entretanto, observa-se na literatura que o controlador RMAC também tem aplicação nas malhas de corrente de plantas com variações paramétricas ou dinâmicas não modeladas, como por exemplo em [15], para conversores trifásicos conectados à rede com filtro LCL, ou em [16], para filtros ativos de potência.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um controlador de corrente adaptativo por modelo referência aplicado a um DSTATCOM, utili-

zado para a regulação de tensão e compensação de harmônicos e desequilíbrios de sistemas baseados em GIAE. Resultados de simulação computacional do sistema demonstram a viabilidade da utilização da técnica proposta junto a aplicação em questão.

II. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A topologia do sistema proposto é mostrada no diagrama esquemático da Fig. 1. O sistema trifásico a três fios consiste de uma máquina primária de velocidade constante (MP), um GIAE, um banco de capacitores de excitação e um DSTATCOM trifásico, que é conectado aos terminais do gerador por um filtro indutivo. O banco de capacitores é projetado de forma que a tensão nominal seja obtida pelo gerador em condição sem carga.

Neste sistema, cargas monofásicas ou trifásicas, lineares ou não lineares, balanceadas ou não balanceadas podem ser conectadas. O DSTATCOM atua para compensar as variações de tensão que ocorrem devido a sua presença, produzindo energia reativa capacitiva ou indutiva para manter a tensão do GIAE em seu valor nominal. Além disso, deve também compensar quaisquer harmônicos e desequilíbrios presentes nas correntes de carga, agindo para evitar que essas perturbações sejam refletidas nas correntes e tensões do GIAE, contribuindo assim para manter a qualidade de energia do sistema isolado como um todo. Como é considerada uma máquina primária de velocidade constante, a frequência de geração do sistema é quase constante para todas as condições de carga [17]. No entanto, algumas pequenas variações ainda ocorrem devido à característica de deslizamento da máquina de indução.

A. Modelagem do Sistema

O modelo matemático do sistema isolado é obtido mediante algumas simplificações. O gerador de indução é considerado como uma fonte de corrente para o sistema, com fontes individuais para cada fase, denominadas de i_{ga} , i_{gb} e i_{gc} . O DSTATCOM é considerado como uma fonte de tensão ideal para o sistema, com suas tensões de fase sendo denominadas de u_a , u_b e u_c . O filtro de saída do DSTATCOM é modelado pelas indutâncias L_f e resistências associadas R_f , idênticas para as três fases. As capacitâncias de excitação são denotadas como C_{exc} e as cargas são modeladas como uma resistência R_c . Para facilitar o processo de modelagem, uma transformação $\Delta - Y$ é executada no banco de capacitores de excitação e nas cargas, resultando nas variáveis C_{eq} e R_{eq} que são usadas no modelo.

Resolvendo o circuito equivalente e transformando para o sistema de coordenadas $\alpha\beta$, o sistema pode ser descrito através do modelo de espaço de estados apresentado em (1).

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_{\alpha\beta}(t) = \mathbf{A}_{\alpha\beta} \mathbf{x}_{\alpha\beta}(t) + \mathbf{B}_{\alpha\beta} \mathbf{u}_{\alpha\beta}(t) + \mathbf{F}_{\alpha\beta} \mathbf{w}_{\alpha\beta}(t) \quad (1)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\alpha\beta}(t) &= [v_\alpha \ v_\beta \ i_\alpha \ i_\beta]^T, \\ \mathbf{u}_{\alpha\beta}(t) &= [u_\alpha \ u_\beta]^T, \quad \mathbf{w}_{\alpha\beta}(t) = [i_{ga} \ i_{gb}]^T, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ C_{eq}R_{eq} & 0 & C_{eq} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{-1}{L_f} & 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_f} & 0 & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_{\alpha\beta} = \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{\alpha\beta} = \frac{1}{C_{eq}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Como observado no modelo obtido, as correntes do DSTATCOM e as tensões do GIAE são definidas como estados, conforme o vetor $\mathbf{x}_{\alpha\beta}$, enquanto as tensões do DSTATCOM são definidas como entradas, conforme vetor $\mathbf{u}_{\alpha\beta}$. Deve-se notar que as correntes do gerador são consideradas como um distúrbio ao sistema, de acordo com o vetor $\mathbf{w}_{\alpha\beta}$. Em termos práticos, o gerador de indução se torna uma dinâmica não modelada para o sistema em espaço de estados.

III. ESTRUTURA DE CONTROLE

O sistema proposto para o controle do DSTATCOM é representado pelo diagrama de blocos da Fig. 2. Para sua implementação, sete variáveis do sistema são amostradas: as tensões de linha do GIAE, v_{ab} e v_{bc} , as correntes do DSTATCOM, i_a e i_b , as correntes de carga, i_{la} e i_{lb} , e a tensão do barramento CC do DSTATCOM V_{cc} . As correntes i_c e i_{lc} são obtidas internamente no algoritmo de controle pela composição das outras duas fases medidas.

O sistema de controle é implementado parte utilizando-se o sistema de referência síncrono estacionário $\alpha\beta$, e parte usando o sistema síncrono rotativo dq . O ângulo de sincronização θ_s é obtido através de um bloco PLL (*Phase-Locked Loop*) baseado no filtro de *Kalman*.

Através de um filtro passa baixa (FPB), os componentes contínuos de i_{ld} e i_{lq} são removidos e os componentes oscilatórios, \tilde{i}_{ld} e \tilde{i}_{lq} , são obtidos. No esquema proposto, eles são calculados através de (5), onde \bar{i}_{ld} e \bar{i}_{lq} são as variáveis contínuas obtidas através do uso do filtro. Estes componentes oscilatórios são utilizados na compensação de harmônicos e desequilíbrios nas correntes de carga.

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{ld} &= i_{ld} - \bar{i}_{ld} \\ \tilde{i}_{lq} &= i_{lq} - \bar{i}_{lq} \end{aligned} \quad (5)$$

Como a corrente i_d corresponde a um componente de potência ativa, seu controle permite o ajuste do barramento de tensão CC do DSTATCOM. Como a corrente i_q corresponde a um componente de potência reativa, seu controle permite a regulação das tensões do GIAE.

Assim, para controlar a tensão no barramento CC, um controlador PI recebe o erro entre a referência V_{cc}^* e o valor amostrado V_{cc} , conseqüentemente gerando a referência

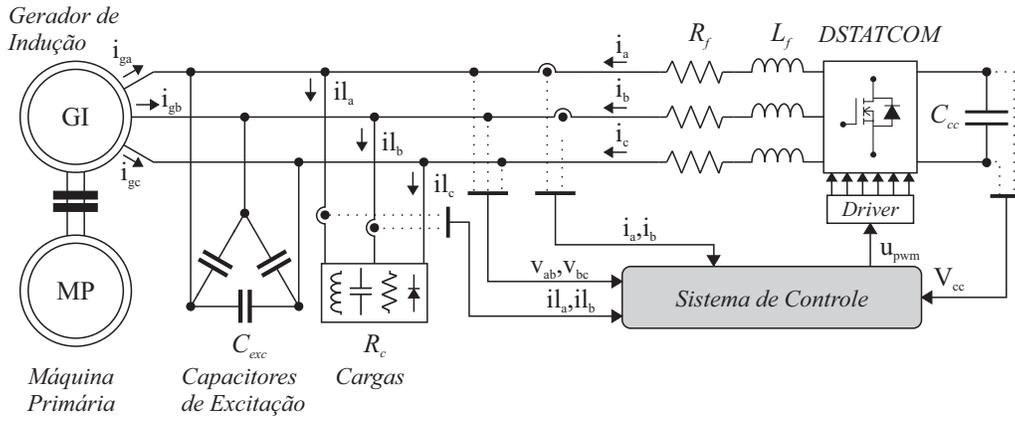


Figura 1. Topologia do sistema isolado baseado em gerador de indução autoexcitado.

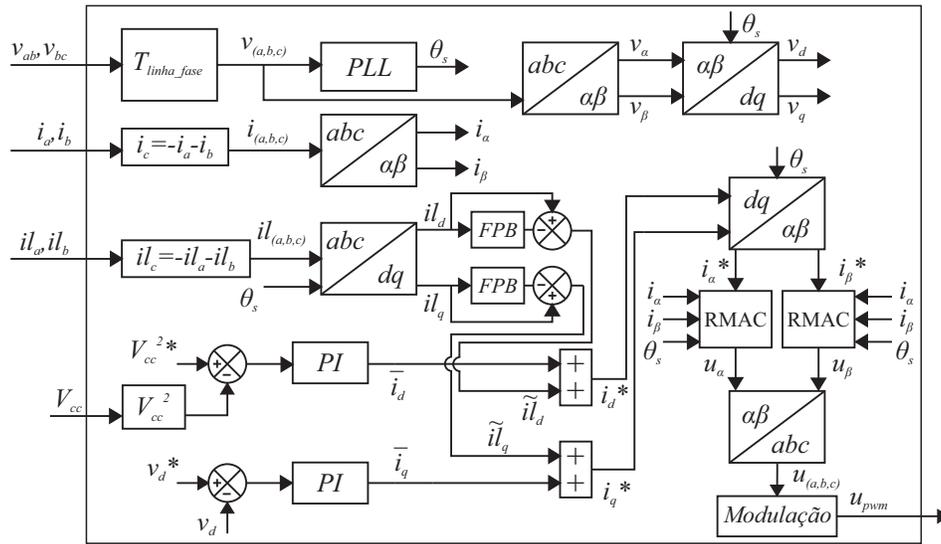


Figura 2. Diagrama do sistema completo de controle utilizado.

contínua de corrente \bar{i}_d . Nela é adicionado o componente alternado de corrente de carga no eixo d , \tilde{i}_d , resultando na referência de corrente i_d^* para a malha interna. Da mesma forma, para controlar as tensões do GIAE, um controlador PI recebe o erro entre a referência v_d^* e o valor amostrado v_d , consequentemente gerando a referência contínua de corrente \bar{i}_q . Nela é adicionado o componente alternado de corrente de carga no eixo q , \tilde{i}_q , resultando na referência de corrente i_q^* para a malha interna. Com essa abordagem, o DSTATCOM pode, ao mesmo tempo, controlar as tensões nos barramentos CC e CA e compensar os desequilíbrios e harmônicos presentes nas correntes de carga.

O controlador de corrente adaptativo por modelo de referência é implementado no sistema de coordenadas $\alpha\beta$. Portanto, é aplicada uma transformação $dq - \alpha\beta$ nas referências de corrente i_d^* e i_q^* , resultando nas referências i_α^* e i_β^* a serem utilizadas na malha interna. A ação de controle resultante são as tensões de referência u_α e u_β a serem sintetizadas pelo DSTATCOM. Para que os sinais PWM sejam gerados,

é utilizada uma abordagem de modulação geométrica baseada em portadora.

IV. CONTROLADOR DE CORRENTE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

A. Planta e Modelo de Referência

Em um sistema de controle por modelo de referência, o comportamento dinâmico da malha de controle é definido por um modelo de referência pré-determinado. Contudo, em plantas com dinâmicas não modeladas ou com variações paramétricas isso não pode ser garantido utilizando-se um controlador de ganhos fixos. Dessa maneira, o controlador adaptativo por modelo de referência tem como objetivo a determinação em tempo real de um vetor de parâmetros θ de modo que a saída y de um sistema em malha fechada siga a saída y_m do modelo de referência, dada uma referência r a ser rastreada.

Sendo assim, inicialmente algumas definições em relação à planta e ao modelo de referência devem ser estabelecidas. A

planta a ser controlada é definida por (6), onde $Z_p(z)$ é um polinômio *Schur* de grau m_p , e $R_p(s)$ é um polinômio mônico de grau n_p , com o sinal do ganho k_p sendo conhecido.

$$G_p(z) = k_p \frac{Z_p(z)}{R_p(z)} \quad (6)$$

O modelo de referência é definido por (7), onde $Z_m(z)$ é um polinômio mônico *Schur* de grau m_m , e $R_p(s)$ é um polinômio mônico *Schur* de grau n_m , com k_m sendo um ganho escolhido pelo projetista. O grau relativo do modelo de referência deve ser escolhido de modo que este seja equivalente ao da planta, ou seja, $n_p - m_p = n_m - m_m$.

$$W_m(z) = \frac{y_m(z)}{r(z)} = k_m \frac{Z_m(z)}{R_m(z)} \quad (7)$$

Dado o sistema de controle em questão, as variáveis a serem controladas são as correntes i_α e i_β . Como está sendo considerado o sistema de coordenadas $\alpha\beta$, as correntes são desacopladas, e podem ser controladas individualmente pelas entradas de controle u_α e u_β . A função de transferência $G_p(s)$, planta de controle que relaciona $i_\alpha(s)/u_\alpha(s)$ e $i_\beta(s)/u_\beta(s)$, é obtida a partir do modelo de espaço de estados (1), conforme (8).

$$G_p(s) = \frac{C_{eq}R_{eq}s + 1}{C_{eq}R_{eq}L_f s^2 + (C_{eq}R_{eq}R_f + L_f)s + R_{eq} + R_f} \quad (8)$$

Aplicando em (8) a transformada z utilizando *zero-order hold* (ZOH), e substituindo os valores dos parâmetros nas variáveis do sistema, é obtida a função de transferência da planta no domínio discreto, conforme (9).

$$G_p(z) = \frac{0.03974z - 0.03848}{z^2 - 1.934z + 0.9665} \quad (9)$$

A planta $G_p(z)$ possui numerador *Schur* e grau relativo 1, sendo apropriada a ser utilizada no controlador adaptativo. Dessa maneira, o modelo de referência a ser projetado também deve possuir grau relativo igual a 1. Como deseja-se uma malha de corrente rápida, de modo a ser possível compensar as correntes de carga harmônicas e desbalanceadas, é escolhido um modelo de referência $W_m(z)$ com frequência de corte de 2,5 kHz, conforme (10).

$$W_m(z) = \frac{0.7921}{z - 0.2079} \quad (10)$$

B. Estrutura do Controlador

O controlador adaptativo é implementado individualmente para cada eixo. Nesta seção, são demonstradas as equações genéricas da implementação do controlador, onde a ação de controle u corresponde a u_α e u_β , a variável controlada y corresponde a i_α e i_β , e a referência r corresponde a i_α^* e i_β^* .

Considerando a planta e o modelo de referência escolhido, a ação de controle é definida por (11).

$$u(k) = \theta^T(k)\omega(k) \quad (11)$$

A ação de controle é composta por um vetor de ganhos θ e um vetor auxiliar ω , conforme (12).

$$\begin{aligned} \theta^T(k) &= [\theta_1(k) \quad \theta_2(k) \quad \theta_y(k) \quad \theta_r(k) \quad \theta_{sin}(k) \quad \theta_{cos}(k)] \\ \omega^T(k) &= [\omega_1(k) \quad \omega_2(k) \quad y(k) \quad r(k) \quad v_{sin}(k) \quad v_{cos}(k)] \end{aligned} \quad (12)$$

Os sinais auxiliares ω_1 e ω_2 são definidos conforme (13).

$$\begin{aligned} \omega_1(z) &= \frac{\alpha(z)}{\Lambda(z)} = (zI - F)^{-1}qu(z) \\ \omega_2(z) &= \frac{\alpha(z)}{\Lambda(z)} = (zI - F)^{-1}qy(z) \end{aligned} \quad (13)$$

E podem ser implementados digitalmente conforme (14). O par (F, q) deve ser controlável, e seus valores estão relacionados com a velocidade de convergência do algoritmo adaptativo.

$$\begin{aligned} \omega_1(k) &= F\omega_1(k-1) + qu(k-1) \\ \omega_2(k) &= F\omega_2(k-1) + qy(k-1) \end{aligned} \quad (14)$$

Os sinais v_{sin} e v_{cos} são definidos por (15), e são utilizados para a compensação do distúrbio senoidal causado pela conexão do DSTATCOM ao sistema. Suas amplitudes são obtidas através do algoritmo adaptativo, somente sendo necessário para isso o ângulo de sincronização θ_s .

$$\begin{aligned} v_{sin}(k) &= \text{sen}(\theta_s(k)) \\ v_{cos}(k) &= \text{cos}(\theta_s(k)) \end{aligned} \quad (15)$$

O vetor de ganhos é calculado conforme a lei gradiente de adaptação normalizada de (16), onde T_s é o período de amostragem e Γ o ganho de adaptação. O erro de rastreamento é definido como $e_1(k) = y(k) - y_m(k)$, $\rho^* = k_p/k_m$, e a função de normalização é dada por $m^2(k) = 1 + \omega^T(k)\omega(k)$.

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \frac{T_s \Gamma \omega(k-1) e_1(k-1) \text{sgn}(\rho^*)}{m^2(k-1)} \quad (16)$$

A Fig. 3 apresenta o diagrama de blocos do controlador adaptativo por modelo de referência utilizado.

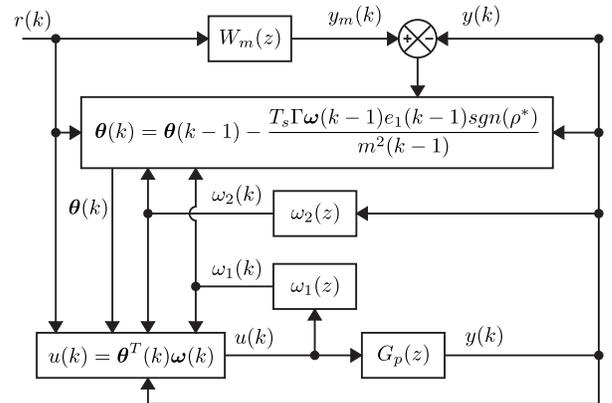


Figura 3. Diagrama do controlador adaptativo por modelo de referência.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos a partir da simulação computacional em Matlab/Simulink[®] do sistema da Fig. 1, junto a implementação digital do sistema de controle proposto. A Tabela I apresenta os parâmetros do sistema, e a Tabela II demonstra os parâmetros utilizados para os controladores.

A. Análise para conexão de cargas

A Fig. 4 apresenta a resposta das variáveis do sistema para a conexão de uma carga linear de 1,2 kW, linear de 1,2 kW + 0,8 kvar, e linear monofásica de 1,2 kW. Observe-se a baixa distorção tanto das tensões (v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}), com THD = 1,33%, quanto das correntes (i_{ga}, i_{gb}, i_{gc}) do gerador, com THD = 1,51%, o que indica que a compensação da carga não linear está sendo realizada. As tensões de linha estão reguladas, próximas ao valor nominal de 220 V_{rms} , com fator de desbalanço $f_d = 0,5\%$. A tensão do barramento CC do DSTATCOM (V_{cc}) apresenta oscilação em torno do valor nominal de 450 V, causada pelo desbalanço das correntes de compensação (i_a, i_b, i_c), necessários para a compensação das correntes de carga desbalanceadas (i_{la}, i_{lb}, i_{lc}).

A Fig. 5 apresenta o detalhe da adaptação do vetor de ganhos θ para os eixos α e β , considerando uma simulação de 40 s. Em $t = 0,05$ s o DSTATCOM é conectado ao sistema. De modo a acelerar o processo inicial de adaptação, de $t = 1$ s a $t = 2$ s são aplicados na referência de corrente sinais excitados com a 5^a e 7^a harmônicas. Em $t = 2$ s a carga linear de 1,2 kW + 0,8 kvar é conectada. Em $t = 4$ s as cargas não linear de 1,2 kW e monofásica de 1,2 kW são adicionadas, onde nota-se

Tabela I
PARÂMETROS DO SISTEMA

Parâmetro	Valor
Potência	$P_n = 3,7$ kW
Tensão de linha	$V_n = 220$ V
Frequência	$f = 60$ Hz
Capacitor de excitação	$C_{exc} = 40$ μ F $C_{eq} = 120$ μ F
Resistência de carga	$R_c = 39$ Ω $R_{eq} = 13$ Ω
Filtro de saída do DSTATCOM	$L_f = 2,5$ mH $R_f = 0,05$ Ω
Capacitor do barramento CC	$C_{cc} = 4700$ μ F
Frequência de chaveamento do DSTATCOM	$f_{sw} = 10$ kHz

Tabela II
PARÂMETROS DO CONTROLADOR

Símbolo	Descrição	Valor
$\theta^T(0)$	Vetor de ganhos inicial	[0 0 0 0 0 0]
$\omega^T(0)$	Vetor auxiliar inicial	[0 0 0 0 0 0]
F	Parâmetro de projeto	0,7408
q	Parâmetro de projeto	0,2592
Γ	Ganho de adaptação	80000
T_s	Período de amostragem	0,1 ms

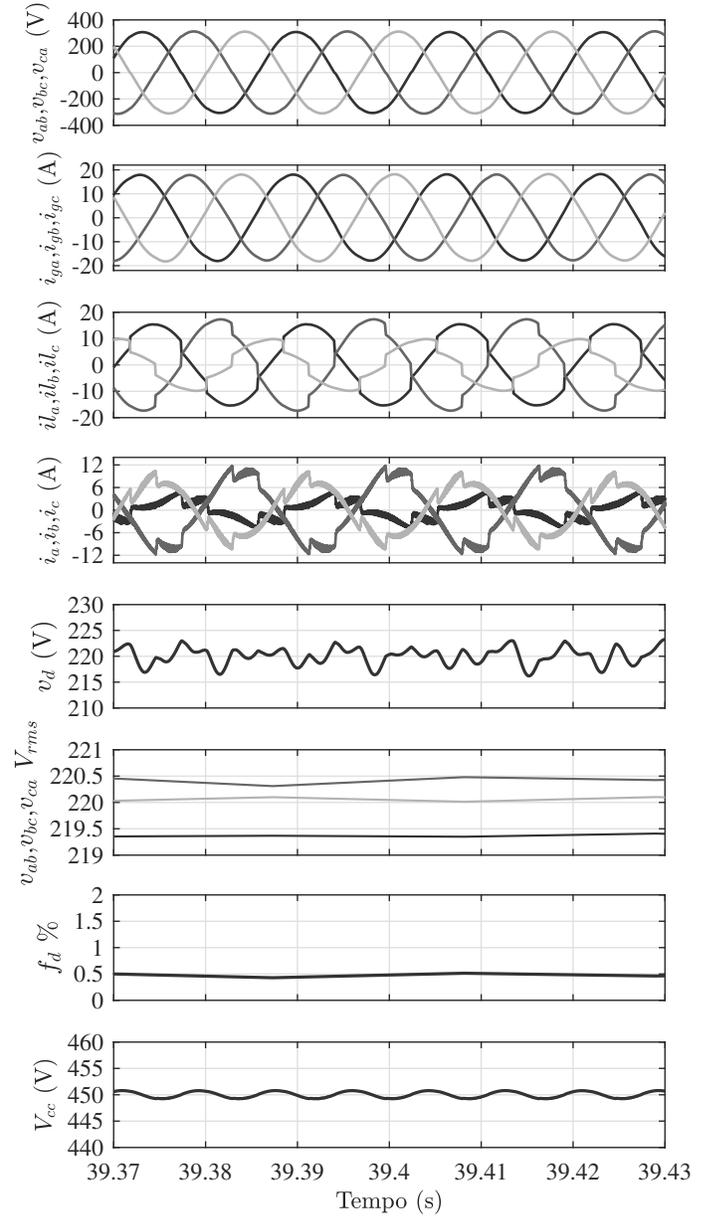


Figura 4. Variáveis do sistema para conexão de combinação de carga linear, não linear e monofásica.

a adaptação dos parâmetros considerando as novas condições de carga no sistema. A Fig. 6 demonstra o rastreamento das referências de corrente nos eixos α e β durante a compensação das cargas, sendo possível observar o correto rastreamento do modelo de referência.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o projeto de um controlador adaptativo por modelo de referência aplicado ao controle de corrente de um DSTATCOM utilizado em sistemas baseados em GIAE. Resultados de simulação com a conexão de uma combinação de cargas lineares, não lineares e monofásicas, demonstraram o bom funcionamento da técnica no sistema em questão.

Os autores gostariam de agradecer ao INCT-GD e aos órgãos financiadores CNPq processo nº 465640/2014-1, CAPES processo nº 23038.000776/2017-54 e FAPERGS processo nº 17/2551-0000517-1.

REFERÊNCIAS

- [1] E. G. Marra and J. A. Pomilio, "Self-excited induction generator controlled by a vs-pwm bi-directional converter for rural applications," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual*, vol. 1, Feb 1998, pp. 116–122 vol.1.
- [2] B. Singh, S. S. Murthy, and S. Gupta, "Statcom-based voltage regulator for self-excited induction generator feeding nonlinear loads," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1437–1452, Oct 2006.
- [3] G. K. Kasal and B. Singh, "Decoupled voltage and frequency controller for isolated asynchronous generators feeding three-phase four-wire loads," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 966–973, April 2008.
- [4] Y. K. Chauhan, S. K. Jain, and B. Singh, "A prospective on voltage regulation of self-excited induction generators for industry applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 2, pp. 720–730, March 2010.
- [5] L. G. Scherer, C. B. Tischer, and R. F. de Camargo, "Voltage regulation of stand-alone micro-generation seig based system under nonlinear and unbalanced load," in *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, June 2015, pp. 428–433.
- [6] U. K. Kalla, B. Singh, and S. S. Murthy, "Green controller for efficient diesel engine driven single-phase seig using maximum efficiency point operation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 264–274, Jan 2017.
- [7] V. C. Sekhar, K. Kant, and B. Singh, "Dstatcom supported induction generator for improving power quality," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 495–503, 2016.
- [8] S. Kewat, B. Singh, and I. Hussain, "Power management in pv-battery-hydro based standalone microgrid," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 4, pp. 391–398, 2018.
- [9] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage-source pwm converters: a survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 691–703, Oct 1998.
- [10] T. Hornik and Q. C. Zhong, "A current-control strategy for voltage-source inverters in microgrids based on $h-\infty$ and repetitive control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 943–952, March 2011.
- [11] C. B. Tischer, J. R. Tibola, L. G. Scherer, and R. F. de Camargo, "Proportional-resonant control applied on voltage regulation of stand-alone seig for micro-hydro power generation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 5, pp. 593–602, 2017.
- [12] O. Kiselychynk, M. Bodson, and J. Wang, "Linearized state-space model of a self-excited induction generator suitable for the design of voltage controllers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 4, pp. 1310–1320, Dec 2015.
- [13] F. Lin, *Robust Control Design: An Optimal Control Approach*. Wiley-Interscience, 2007.
- [14] L. G. Scherer, R. V. Tambara, and R. F. de Camargo, "Voltage and frequency regulation of standalone self-excited induction generator for micro-hydro power generation using discrete-time adaptive control," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 531–540, 2016.
- [15] J. R. Massing, M. Stefanello, H. A. Grundling, and H. Pinheiro, "Adaptive current control for grid-connected converters with lcl filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 12, pp. 4681–4693, Dec 2012.
- [16] K. K. Shyu, M. J. Yang, Y. M. Chen, and Y. F. Lin, "Model reference adaptive control design for a shunt active-power-filter system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 97–106, Jan 2008.
- [17] R. R. Chilipi, B. Singh, S. S. Murthy, S. Madishetti, and G. Bhuvaneshwari, "Design and implementation of dynamic electronic load controller for three-phase self-excited induction generator in remote small-hydro power generation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, no. 3, pp. 269–280, April 2014.

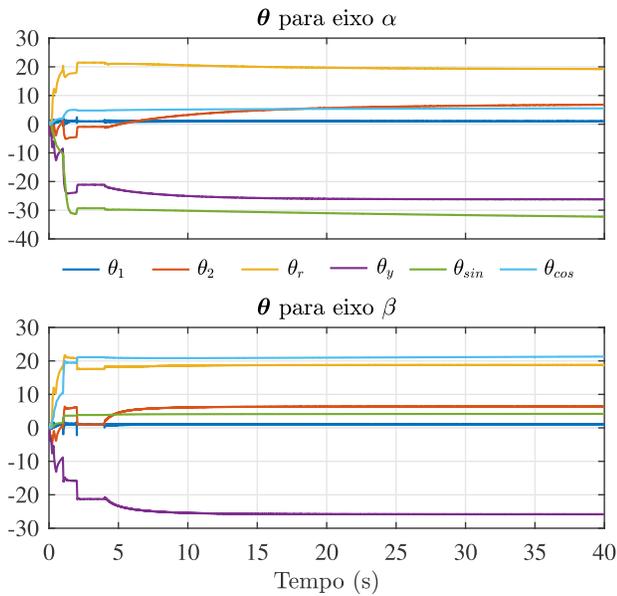


Figura 5. Ganhos de adaptação.

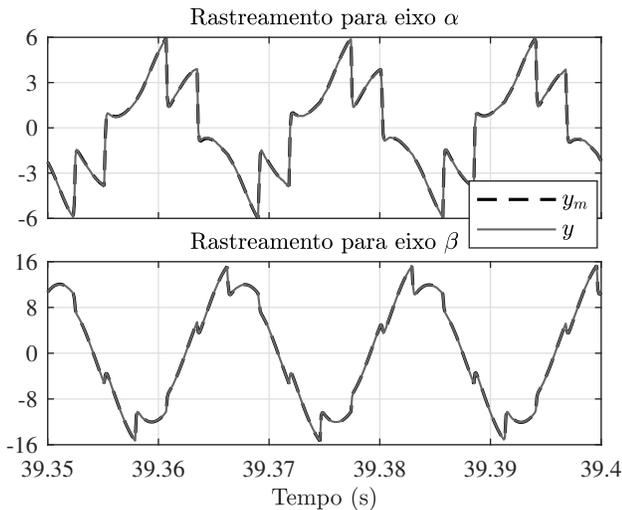


Figura 6. Rastreamento das referências.

As correntes são rastreadas de acordo com o modelo de referência, permitindo dessa maneira a correta regulação de tensão, compensação de harmônicos e desbalanços.

A vantagem da utilização deste controlador no sistema em questão é o fato de, para todas as condições de carga, ser possível manter o comportamento dinâmico da malha de corrente de acordo com o modelo de referência. Para isso ocorrer, é necessário que a ação adaptativa seja mantida durante todo o período de operação do sistema, já que as diferentes condições de carga requerem a adaptação de novos ganhos. Ainda, este desempenho é atingido utilizando-se um procedimento de projeto simplificado, sem a necessidade da inclusão do gerador de indução no modelo utilizado. Apenas é necessário escolher o modelo de referência e três parâmetros de projeto relacionados à velocidade de adaptação do controlador.