



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



REGULAÇÃO DE TENSÃO DE GERADORES DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADOS UTILIZANDO CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA COM AÇÃO *SLIDING-MODE*

Maicon de Miranda

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
maicondemiranda@hotmail.com

Lucas Giuliani Scherer

Professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
lgscherer@gmail.com

Resumo. *Este trabalho apresenta uma estrutura de um Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC) com ação Sliding-Mode (SM), chamado de MRAC-SM, utilizado na regulação de tensão de Geradores de Indução Auto-Excitados (GIAE) aplicado a sistemas de microgeração isolada de energia elétrica. A regulação de tensão e frequência é feita através do controle de Compensador Síncrono Estático de Distribuição (DSTATCOM), que realizam a compensação adequada dos reativos do sistema, enquanto que a frequência é regulada através do controle do balanço da potência ativa, este último realizado a partir de uma carga auxiliar conectada ao barramento CC (Corrente Contínua) que consome toda a potência ativa excedente. Cargas monofásicas e trifásicas, com características lineares ou não-lineares, são consideradas para análise do comportamento do controlador na regulação do sistema. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos ao longo do trabalho.*

Palavras-chave: *Regulação de tensão. Controle adaptativo. Sliding-mode.*

1. INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica através do sistema convencional de transmissão a locais mais isolados, com dificuldades de acesso ou baixo índice

populacional torna-se inviável econômica e tecnicamente. Uma solução é a utilização de sistemas de geração isolados (microgeração) utilizando geradores de indução auto-excitados (GIAE) que são mais adequados para esta finalidade.

O GIAE é mais robusto e de menor custo, quando comparado a outras tecnologias de geradores, porém apresenta variação da tensão e frequência geradas em função das cargas conectadas em seus terminais [1]. Diferentes topologias são encontradas na literatura para a regulação dessas variáveis. Dentre as técnicas empregadas, as que oferecem melhores recursos de regulação são as baseadas em Compensadores Síncronos Estáticos de Distribuição (DSTATCOM). O DSTATCOM oferece maior flexibilidade de controle e é conectado em paralelo ao barramento de corrente alternada (CA) onde realiza a regulação das tensões e frequência do sistema a partir da injeção de correntes controladas [2]. As correntes processadas nele podem ser controladas em fase, amplitude e forma, permitindo assim, além da regulação da amplitude das tensões, a compensação de desequilíbrios de corrente assim como de componentes harmônicos provenientes de cargas com características não-lineares.

Considera-se neste estudo, que a máquina primária impõe velocidade e torque constantes ao gerador para a condição nominal de carga. Assim, o controle de frequência é realizado através de uma carga

controlada eletronicamente (ELC) a qual mantêm a potência consumida nominal, independente da carga conectada [3].

Para o controle da planta este trabalho propõe o emprego do MRAC, o qual apresenta características que garantem a estabilidade do sistema mesmo na presença de variações paramétricas e dinâmicas não modeladas decorrentes da conexão e desconexão de cargas e de incertezas referentes ao modelo do gerador de indução. Com a finalidade de deixar o sistema de controle ainda mais robusto e resistente a distúrbios, é considerada uma ação *Sliding-Mode* (SM) [4].

2. SISTEMA DE GERAÇÃO E CONTROLE

O sistema de geração proposto é apresentado na Figura 1 e representa um sistema completo de micro geração de energia, sendo composto por GIAE, capacitores de excitação, indutores de filtro e DSTATCOM. O controle do DSTATCOM é realizado através do sistema de controle em eixos síncronos dq0, sendo o sistema de controle completo devidamente discutido em [5]. Neste trabalho nos deteremos à análise da inserção da parcela SM ao controlador MRAC anteriormente realizado.

3. CONTROLE MRAC-SM

O controle MRAC utilizado neste estudo segue o apresentado em [5]. Considera-se, portanto, os mesmos dados em relação à

planta modelada, modelo de referência e estrutura de controle. A ação SM visa dar maior estabilidade à adaptação dos ganhos do controlador, o que é feito através da inserção de uma parcela adicional à ação de controle do MRAC. O desenvolvimento deste controlador é apresentado a seguir.

3.1 Algoritmo adaptativo com ação SM

A lei de controle é definida por:

$$\theta^T(k)\omega(k) + r(k) = 0 \quad (1)$$

Onde:

$$\theta^T(k) = [\theta_1^T(k) \ \theta_2^T(k) \ \theta_y(k) \ \theta_u(k) \ \theta_{SM}(k)]$$

é o vetor de parâmetros a ser adaptado, $\omega^T(k) = [\omega_1^T(k) \ \omega_2^T(k) \ y(k) \ u(k) \ \text{sigm}_{e_1}(k)]$ é o vetor regressor que contém os modos internos da planta ω_1 e ω_2 , obtidos a partir dos sinais de entrada e saída da planta $u(k)$ e $y(k)$, respectivamente, conforme [5], e $\text{sigm}_{e_1}(k)$ é a função sigmóide do erro de rastreamento $e_1(k) = y(k) - y_m(k)$. A função sigmóide de rastreamento do erro é dada por:

$$\text{sigm}_{e_1}(k) = M \frac{e_1(k)}{|e_1(k)| + \delta} \quad (2)$$

Onde M e δ são parâmetros de projeto a serem definidos.

O algoritmo de adaptação paramétrica é dado a seguir:

$$\theta(k+1) = (I - \sigma(k)\Gamma T_s)\theta(k) - \lambda T_s \frac{\Gamma \zeta(k)\varepsilon(k)}{m^2(k)} \quad (3)$$

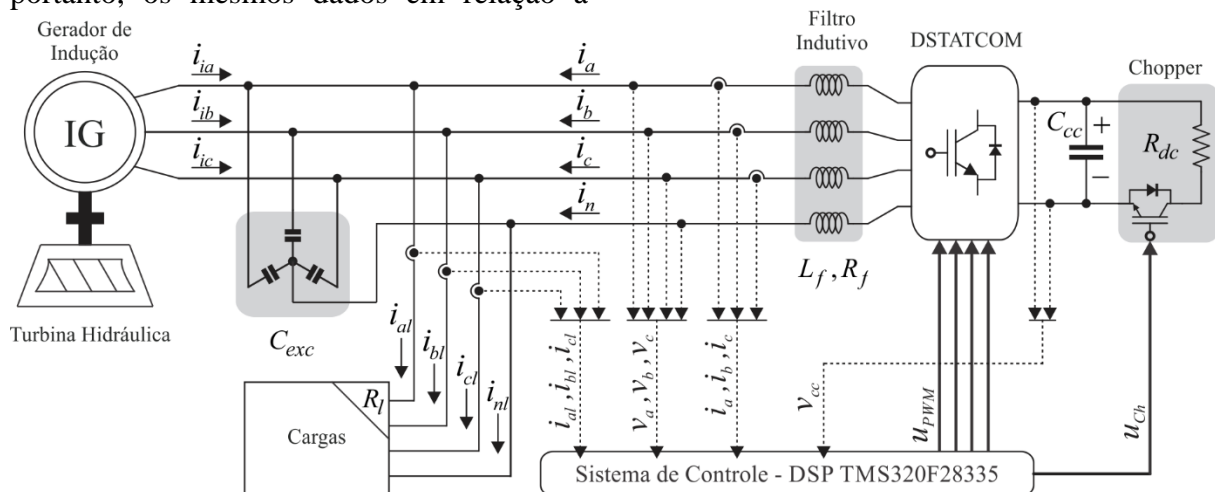


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de geração proposto.

Onde o erro aumentado é definido por $\varepsilon(k) = e_1(k) + \theta^T(k)\zeta(k) - W_m(z)\theta^T(k)\omega(k)$, o parâmetro λ uma constante positiva de projeto, $\zeta(k) = W_m(z)\omega(k)$ é um vetor auxiliar, T_s é o período de amostragem e Γ é a matriz de taxa de adaptação. A função de normalização $m^2(k)$ é expressa como:

$$m^2(k) = 1 + \zeta^T(k)\Gamma\zeta(k) \quad (4)$$

A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos do controlador MRAC-SM.

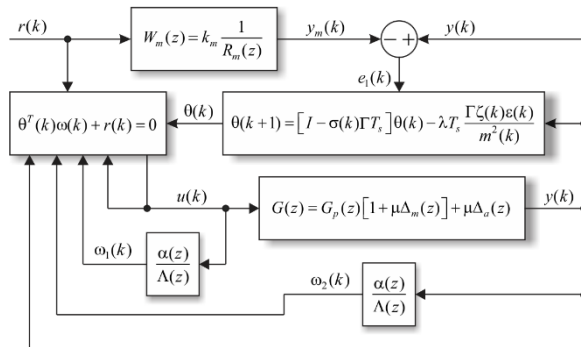


Figura 2. Controlador MRAC-SM.

O controlador MRAC-SM apresentado nessa seção é aplicado à malha de controle de tensão no eixo síncrono d , conforme apresentado na Figura 2. Sendo assim, a ação de controle é dada por:

$$u(k) = u_{MRAC}(k) + u_{SM}(k) \quad (5)$$

Onde a ação MRAC é

$$u_{MRAC}(k) = \frac{\theta_1^T \omega_1^T + \theta_2^T \omega_2^T + \theta_y v_d + v_d^*}{-\theta_u} \quad (6)$$

A ação *sliding-mode* é dada por:

$$u_{SM}(k) = \frac{\theta_{SM}(k)}{-\theta_u(k)} M \frac{e_1(k)}{|e_1(k)| + \delta} \quad (7)$$

3.2 Projeto do controlador

Conforme mencionado, este trabalho considera os dados de planta e modelagem apresentados em [1]. Considera-se, portanto, a seguinte planta em tempo discreto:

$$G_p(z) = \frac{-8.361 \cdot 10^{-4} z^2 + 8.548 \cdot 10^{-4} z - 3.078 \cdot 10^{-5}}{z^4 - 3.596z^3 + 4.833z^2 - 2.876z + 0.6392} \quad (8)$$

Baseado no modelo simplificado, é definido o seguinte modelo de referência:

$$W_m(z) = \frac{0.36}{z^2 - 0.8z + 0.16} \quad (9)$$

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de projeto do controlador MRAC-SM.

Tabela 1. Parâmetros de projeto do controlador MRAC-SM.

Símbolo	Valor
$\theta^T(0)$	[0,2 0,2 -0,34 -0,34 -0,34 0,6]
Γ	1000I _{8x8}
M_0	0,75
σ_0	0,5
M	2
δ	0,7
λ	8
T_s	1/10000 s

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Na Figura 3 são apresentados resultados de simulação com o comportamento das variáveis do sistema durante a conexão e desconexão de cargas sequenciais com diferentes características, conforme apresentado no primeiro gráfico. Com exceção da carga monofásica aplicada entre os instantes 13s e 15s, todas as demais cargas possuem característica trifásica e equilibrada.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um controlador MRAC-SM aplicado à regulação de tensão de um sistema de microgeração baseado em GIAE. Foi apresentada a inclusão de uma parcela *sliding-mode* à ação de controle com o propósito de aumentar a robustez do controlador durante os transitórios da planta. Foram apresentadas as alterações da planta de controle frente ao controlador MRAC bem como, resultados de simulação que suportam a aplicação do controlador proposto. Foi verificado comportamento adequado em termos de rastreamento de referência garantindo adequada regulação de tensão ao sistema de geração. Verificou-se a notável ação da parcela *sliding-mode* durante os transitórios do sistema, contribuindo para uma regulação mais rápida, enquanto que em regime permanente tal ação converge para zero.

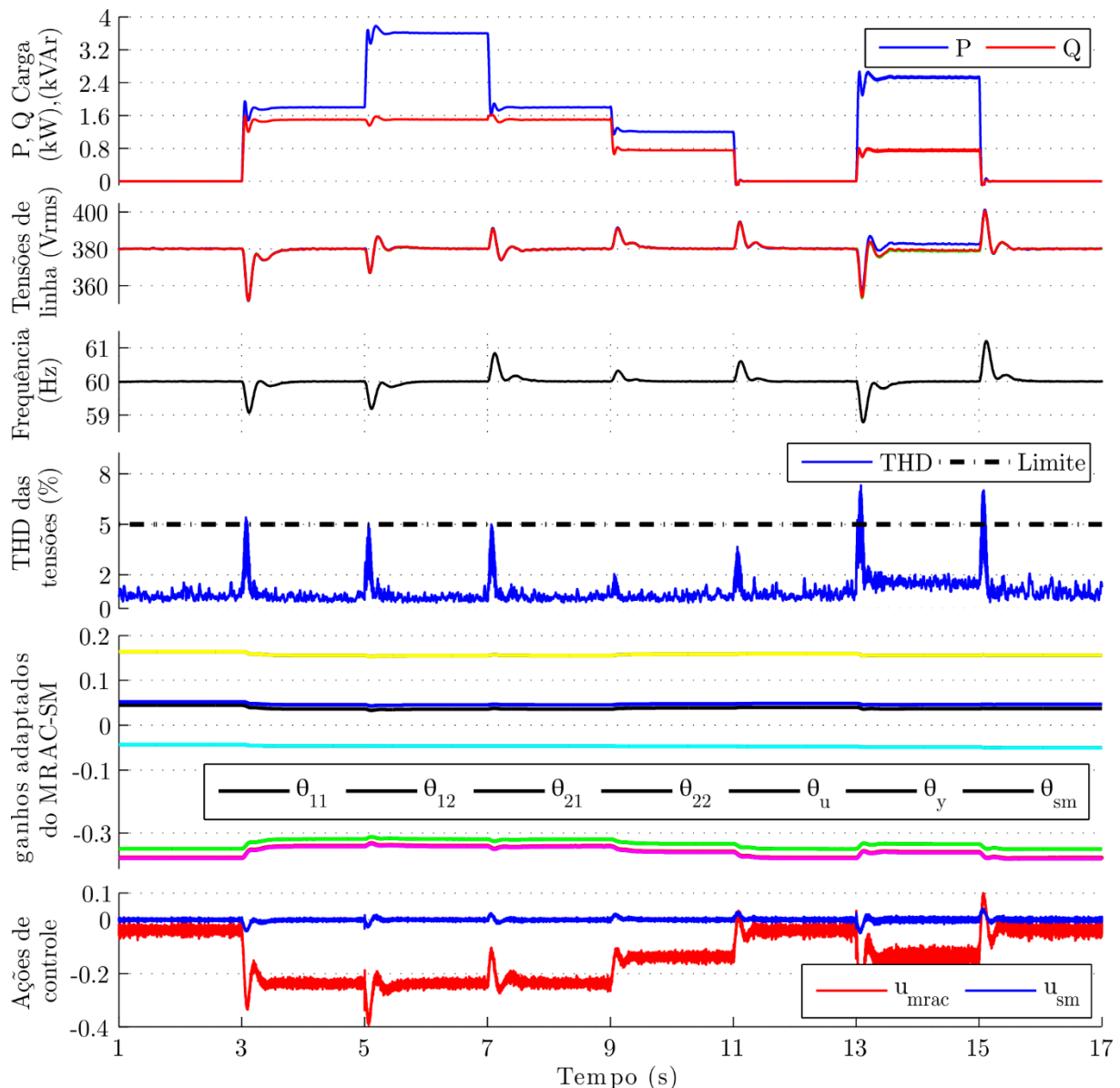


Figura 3. Resposta do sistema à transitórios de carga.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Simões, M. G., Farret, F. A.: 'Modeling and Analysis with Induction Generators', CRC Press, 3^a ed., 2015.
- [2] Singh, R. R., Chelliah, T. R., Agarwal, P.: 'Power electronics in hydro electric energy systems – A review', Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32, pp. 944-959.
- [3] Chauhan, Y. K., Jain, S. K., and Singh, B.: 'A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications', IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46, (2), pp. 720-730.
- [4] A.Susperregui, M.I. Martinez, I. Zubia, et al.: "Design and tuning of fixed-switching-frequency second-order sliding-mode controller for doubly fed induction generator power control," IET Electr. Power Appl., Vol. 6, Iss. 9, pp. 696–706, 2012.
- [5] Scherer, L. G., Tambara, R. V., and Camargo, R. F.: 'Voltage and frequency regulation of standalone self-excited induction generator for micro-hydro power generation using discrete-time adaptive control'. IET Renew. Power Generation, 2016.