

# Gerador de Indução em Operação Isolada com Freqüência Fixa

CUNHA, Yghor Peterson  
Socorro Alves<sup>1</sup>

LIMA, Nélio Neves<sup>2</sup>

MARRA, Enes Gonçalves<sup>3</sup>

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC)  
Universidade Federal de Goiás (UFG)  
Praça Universitária s/n – Bloco A – 2º andar  
Goiânia, Goiás, Brasil – CEP: 74.605-220

<sup>1</sup> ypsacunha@hotmail.com

<sup>2</sup> nelioneves@gmail.com

<sup>3</sup> enes@eee.ufg.br

Palavras chaves: Gerador de Indução, Conversor PWM, Processamento Digital de Sinais, Controle Proporcional-Integral.

## 1. Introdução

A Máquina de Indução Trifásica (MIT) constitui-se um dos mais relevantes equipamentos desenvolvidos para aplicação industrial. Sua simplicidade construtiva, custo reduzido, versatilidade, alta densidade de potência (W/kg), são características atrativas para seu uso no campo industrial.

No campo de geração de energia a MIT é pouco utilizada devido à sua pobre regulação de tensão e à variação de freqüência mesmo quando acionada em velocidade constante (Marra e Pomilio, 1998). Trabalhos anteriores apresentaram estratégias viáveis para compensar as características desfavoráveis do Gerador de Indução (GI) (Marra e Pomilio, 1998; Marra, 1999), utilizando-se da associação do GI a um conversor PWM (Modulação por Largura de Pulsos), podendo assim fixar a freqüência síncrona do gerador e fazer compensação de potência reativa.

A proposta deste trabalho é apresentar uma estrutura de geração de energia elétrica baseada no gerador de indução (GI) operando com freqüência síncrona constante, associado a um conversor PWM (Modulação por Largura de Pulso), acionado por uma microturbina hidráulica com velocidade variável. A associação do GI com o conversor PWM tem o objetivo de estabelecer a fixação da freqüência síncrona.

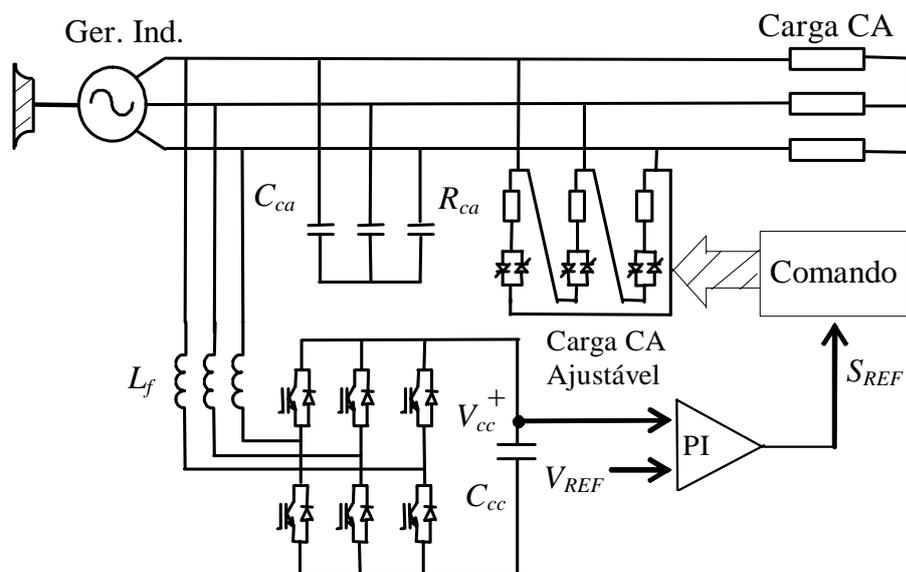


Figura 1. Configuração geral do sistema proposto.

O sistema apresentado na figura 1 apresenta vantagens do ponto de vista econômico, uma vez que os custos do grupo gerador (turbina, gerador e regulador de velocidade) representam em torno de 50% do custo global da central de geração (Viana, 1997). A utilização do gerador de indução, bem como a ausência de regulador de velocidade, é capaz de diminuir consideravelmente os custos envolvidos em um sistema de geração de energia de pequeno porte.

## 2. Metodologia Aplicada

O sistema proposto consiste em: um conversor bidirecional de frequência, cujas chaves são controladas com a técnica da modulação por largura de pulso (PWM) senoidal; um gerador de indução trifásico (GIT) com rotor tipo gaiola esquilo; um filtro composto por um conjunto de indutores ( $L_f$ ) conectados entre o conversor PWM e os terminais de estator do gerador, e por um banco de capacitores  $C_{ca}$ , o qual auxilia também no processo de magnetização do GIT e uma carga CA ajustável formada por chaves SCRs dispostas em antiparalelo em série com uma impedância conforme ilustra a figura 1.

Com a fixação da frequência síncrona do GI pelo conversor PWM este passa a obedecer a uma única característica de magnetização.

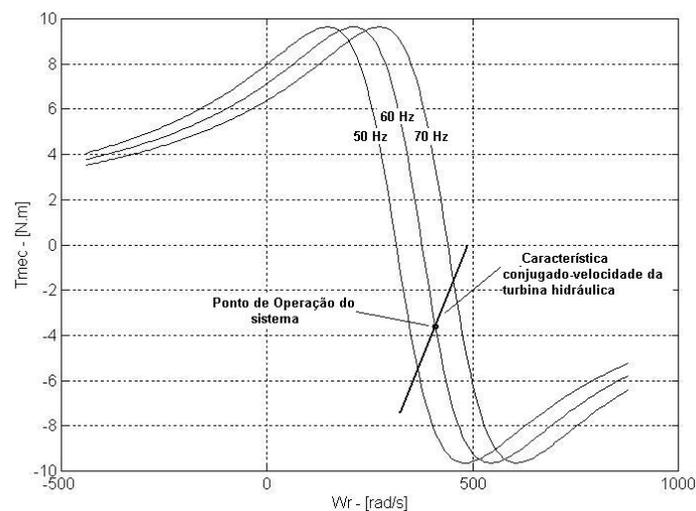


Figura 2. Conjugado ( $T_{mec}$ ) em função da velocidade angular elétrica do rotor.

A potência produzida pelo gerador, operando com frequência síncrona constante e sem regulador de velocidade, não é dinamicamente controlável, ou seja, qualquer variação de velocidade provoca alteração na potência gerada pelo GI, conforme ilustra a figura 2. Em consequência, toda potência convertida pelo GI deve ser consumida pelas cargas do sistema. Assim, a ausência do regulador de velocidade implica necessariamente na utilização de alguma estratégia de controle de carga, cuja finalidade é manter o equilíbrio dinâmico de energia do sistema.

No sistema proposto, a grandeza que melhor representa o equilíbrio dinâmico de energia é a tensão  $V_{cc}$  no lado CC do Conversor PWM (Marra, 1999). O controle da potência gerada é baseado no monitoramento da tensão  $V_{cc}$  de modo a ajustar a carga CA ajustável. Se a potência consumida pela carga CA do sistema (figura 1) for inferior à potência elétrica convertida pelo gerador de indução, haverá um excedente de potência no sistema que deve ser consumida por cargas

ajustáveis, seja no lado CA (controle de carga CA) ou no lado CC (controle de carga CC) do conversor PWM de tensão.

Qualquer desbalanço de potência no sistema reflete-se na tensão  $V_{cc}$  do capacitor  $C_{cc}$ , tendo em vista que o capacitor é o único elemento armazenador de energia do sistema. Deste modo,  $V_{cc}$  deve ser a variável controlada do sistema (objetivo do controle), uma vez que sua manutenção em um valor de referência constante representa o equilíbrio entre as potências gerada e consumida no sistema.

A proposta é de que o sistema seja controlado por meio de um compensador Proporcional-Integral (PI), o qual será implementado digitalmente com base na plataforma de desenvolvimento EZ-Kit Lite para Processadores Digitais de Sinais (DSP) da Companhia Analog Devices (Analog Devices, 2002; Analog Devices, 2000), com processador modelo ADSP21992. O conversor de frequência empregado será conversor SEMIKRON, modelo SKS 30 B6U, com chaves tipo IGBT e potência de 10 kW, chaveado na frequência de 4,2 kHz.

### 3. Modelo Matemático do Sistema

Considerando-se que na máquina de indução com rotor em gaiola as tensões terminais  $[v'_{abc}]$  são nulas, o modelo  $\alpha\beta\gamma$  desta máquina é descrito pelas expressões (1) a (12), conforme apresentado por Szczesny e Ronkowski (Szczesny et al., 1991).

$$[v_{abcs}] = r_s [i_{abcs}] + \frac{d[\lambda_{abcs}]}{dt} \quad (1)$$

$$0 = r'_r [i'_{\alpha\beta\gamma r}] + \frac{d[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}]}{dt} + \frac{\omega_r}{\sqrt{3}} [\lambda_{\alpha x}] \quad (2)$$

$$[\lambda_{abcs}] = (L_{ls} + M) [i_{abcs}] + M [i'_{\alpha\beta\gamma r}] \quad (3)$$

$$[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}] = (L'_{lr} + M) [i'_{\alpha\beta\gamma r}] + M [i_{abcs}] \quad (4)$$

$[v_{abcs}]$ ,  $[i_{abcs}]$  e  $[\lambda_{abcs}]$  são os respectivos vetores de tensão, corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos do estator, na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$[i'_{\alpha\beta\gamma r}]$ ,  $[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}]$  são os respectivos vetores de corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos do rotor, referidos ao estator, na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$[\lambda_{\alpha x}]$  é o vetor de diferenças de fluxos, resultante da transformação  $\alpha\beta\gamma$ .

Sendo:

$$[\lambda_{\alpha x}] = \begin{bmatrix} (\lambda'_{\beta r} - \lambda'_{\gamma r}) \\ (\lambda'_{\gamma r} - \lambda'_{\alpha r}) \\ (\lambda'_{\alpha r} - \lambda'_{\beta r}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[i_{abcs}] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T \quad (6)$$

$$[i'_{\alpha\beta\gamma r}] = [i'_{\alpha r} \quad i'_{\beta r} \quad i'_{\gamma r}]^T \quad (7)$$

$$[v_{abcs}] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T \quad (8)$$

$$[\lambda_{abcs}] = [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}]^T \quad (9)$$

$$[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}] = [\lambda'_{\alpha r} \quad \lambda'_{\beta r} \quad \lambda'_{\gamma r}]^T \quad (10)$$

O torque mecânico ( $T_{mec}$ ) pode ser escrito como a combinação de diversos elementos dos vetores de corrente  $[i_{abc}]$  e  $[i'_{\alpha\beta\gamma r}]$ . A expressão (11) apresenta o conjugado mecânico escrito em função de  $i_{as}$ ,  $i_{cs}$ ,  $i'_{\lambda r}$  e  $i'_{\alpha r}$ .

$$T_{mec} = \sqrt{3}\left(\frac{p}{2}\right)M\left(i_{as}i'_{\gamma r} - i_{cs}i'_{\alpha r}\right) \quad (11)$$

O comportamento dinâmico do sistema eletromecânico é determinado pela expressão (12). Sendo que  $J$  é a constante de inércia do rotor em  $\text{kg.m}^2$ ;  $B_m$  é a constante de atrito rotacional em  $\text{kg.m/s}^2$ ; e  $T_L$  é o torque da carga mecânica em N.m.

$$T_{mec} = \left(\frac{2}{p}\right)J\frac{d\omega_r}{dt} + \left(\frac{2}{p}\right)B_m\omega_r + T_L \quad (12)$$

#### 4. Simulação Computacional

Afim de que a estratégia de controle fosse analisada, o sistema representado pelas equações (1) a (12) foi simulado através do programa PSIM versão 4.0. O sistema mostrou um comportamento estável para cargas abaixo da carga nominal. Os pesos do compensador PI foram ajustados em 10 para o ganho proporcional e 0.1 para o ganho integral, por tentativa.

O conversor PWM foi ajustado para uma freqüência de chaveamento de 4.2 kHz com um índice de modulação unitário.

A tensão de referência para a tensão  $V_{cc}$  foi de 370 V.

#### 5. Resultados de Simulação

O sistema simulado teve como base uma máquina de indução trifásica de 1 cv e 4 pólos. A tensão inicial  $V_{cc}$  foi de 400 V de modo que se estabelece a auto-excitação do sistema.

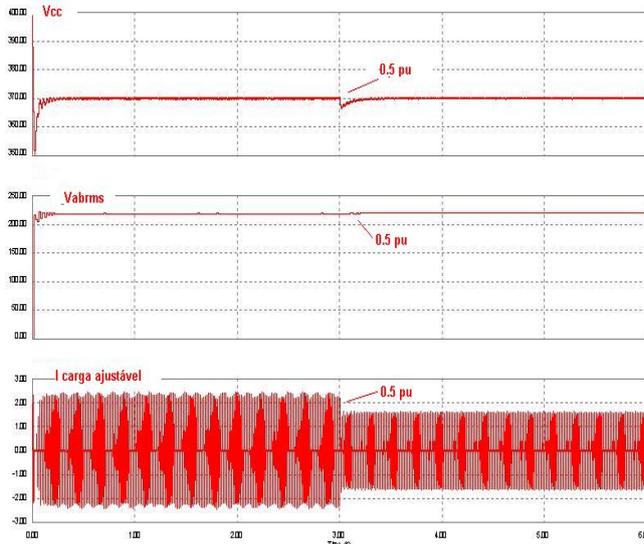


Figura 3. Tensão  $V_{cc}$ , tensão RMS terminal do GI e corrente na carga ajustável para carga trifásica resistiva equilibrada de 0.5 pu.

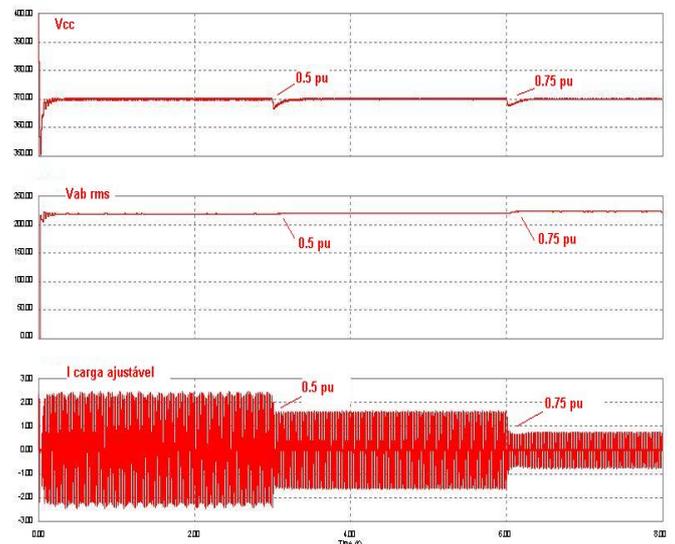


Figura 4. Tensão  $V_{cc}$ , tensão RMS terminal do GI e corrente na carga ajustável para carga trifásica resistiva equilibrada de 0.75 pu.

A primeira simulação foi feita adicionando uma carga trifásica resistiva equilibrada de 0.5 pu da potência nominal. A medida que a carga entra ocorre uma

queda na tensão  $V_{cc}$  devido a descarga do capacitor  $C_{cc}$  que supre o déficit de energia do sistema, conforme ilustra a figura 3.

Na segunda simulação adicionou-se primeiramente uma carga de 0.5 pu em 3 s e mais 0.25 pu em 6s (figura 4). Neste caso também ocorreu a queda na tensão  $V_{cc}$ . Nas duas figuras é ilustrada também a tensão eficaz terminal do GI, de modo a se poderem tirar conclusões a respeito da regulação de tensão do sistema.

Podemos observar que à medida que a carga é inserida no sistema a corrente na carga ajustável diminui conforme são ilustrados nas figuras 3 e 4.

## **6. Considerações Finais**

Os resultados de simulação comprovaram a viabilidade da proposta. A fixação da frequência síncrona, aliada ao controle de carga, é uma estratégia capaz de estabelecer o equilíbrio energético dinâmico no sistema. O desenvolvimento desta estratégia deve levar à obtenção de um sistema robusto, capaz de gerar energia com confiabilidade.

A implementação experimental já está em sua fase final. A versão final deste trabalho apresentará os resultados experimentais em bancada e na Micro-usina onde o GI será acionado por uma micro-turbina hidráulica.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Goiás – SECTEC-GO, CAPES e da Empresa Aruanã Termoelétrica S/A.

## **7. Referências Bibliográficas**

ANALOG DEVICES (2002) ADSP-21992 EZ-KIT LITE, Evaluation System Manual, (manufacturer manual), 1st edition, Norwood, USA, ISBN:82-000700-01

ANALOG DEVICES (2000) ADSP-219x DSP, Instruction Set Reference, (manufacturer manual), 1st edition, Norwood, USA, ISBN:82-000390-07

MARRA, E. G.. Gerador de Indução Associado ao Inversor PWM Operando com Frequência Constante. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 1999.

MARRA, E. G.; POMILIO, J. A.. Self-excited induction generator controlled by a vs-pwm bi-direcional converter for rural applications. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'98), p.116 – 122, 1998

SZCZESNY, R.; RONKOWSKI, M. A New equivalent circuit approach to simulation of converter – Induction Machine Associations. European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'91), Pages: 4/356-4/361, Firenze, Italy, 1991

VIANA, A. N. C.. Pequenas Centrais Hidrelétricas no Meio-Rural. (Minicurso). II Encontro Nacional de Energia Elétrica e Meio Ambiente, 29 p., Poços de Caldas – MG, Brasil, Novembro 1997.