

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SISTEMAS DE ACIONAMENTO ESTÁTICO COM MÁQUINA CA À VELOCIDADE VARIÁVEL PARA BOMBEAMENTO

AUTORES:

Rodrigo Pereira de Lacerda¹, Cursino Brandão Jacobina¹

INSTITUIÇÃO:

Bolsista PRH-42, rodrigo.lacerda@ee.ufcg.edu.br, ¹ Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

SISTEMAS DE ACIONAMENTO ESTÁTICO COM MÁQUINA CA À VELOCIDADE VARIÁVEL PARA BOMBEAMENTO

Abstract

The pumping of fluids is a process that is present at various stages of oil production chain, as in exploration and production, during the drilling of wells, and also in the oil and gas transport by pipelines. The motivation for this research is the fact that the development of techniques and methods related to fluid pumping is an important topic, since this is one of the most common means of transport in the oil industry. Moreover, the use of drive systems with variable speed in this process have been recognized by the industry as one of the most effective tools for power saving. Besides, this type of system allows increasing the reliability of the operation process by the introduction of techniques for fault tolerance and for compensation of defects of power supply or of the charge. Therefore, by using this drive system, the oil industry can save energy and resources. The objective of this research is to show how static drive systems with AC machine can be applied in the pumping process with reliability and energy efficiency. And from the conventional three-phase system, evaluate and compare machine types and topologies of converters that will result in the expected benefits. The methodology used to develop this research involved the following: research and analysis of bibliographic works on the theme; student training; identification aspects of the system to be improved; preparation of proposals for improvement; development of dynamic and steady models; evaluation by simulation of the proposed systems; documentation, reporting and articles for dissemination of the results achieved. The results include the modeling of the three-phase drive system, from which are analyzed different machine topologies and converters that are best suited to the purpose of work and its simulation with different PWM techniques (phase-shift and level-shift).

Keywords: pumping of fluids, drive system, converters, AC machine.

Introdução

Um dos segmentos da indústria do petróleo mais importante é o transporte. Ele envolve uma série de atividades estratégicas desta indústria, tais como ‘águas profundas’, ‘dutos’, ‘gás natural’ e ‘conservação e uso racional da energia’, o que torna importante a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para a conservação e uso racional da energia associados aos sistemas de transporte. Este trabalho objetiva o desenvolvimento de técnicas e métodos relacionados ao bombeamento de fluidos que é um dos meios mais usuais de transporte na indústria do petróleo.

Nos países desenvolvidos, sistemas de acionamento com máquina elétrica consomem cerca de 70% da energia que é usada no setor industrial. Na indústria, por exemplo, um motor consome em média, por ano, uma quantidade de energia que corresponde a aproximadamente cinco vezes seu custo. Especificamente no que concerne aos sistemas de bombeamento, eles consomem mais energia do que qualquer outro tipo de máquina e uma pequena melhoria na eficiência energética destes sistemas implicam numa expressiva economia global. Assim, outro aspecto importante concernente ao sistema de bombeamento é a sua eficiência energética. A operação de um sistema de bombeamento com alto desempenho energético demanda o controle adequado em regime dinâmico e transitório. Técnicas genéricas de controle vetorial de fluxo e conjugado de alto desempenho podem ser adaptadas para aplicações em bombeamento.

O sistema típico de acionamento com velocidade variável para bombeamento é composto por um sistema elétrico de alimentação, um conversor estático, um motor CA, uma bomba e um sistema de controle conforme ilustrado na Figura 1.

Os sistemas de conversão estática são utilizados para garantir as exigências de controle e o uso eficiente da energia elétrica, principalmente em aplicações industriais. Os conversores estáticos transferem energia de uma fonte de energia para uma carga utilizando para isso circuitos de eletrônica de potência baseados em componentes semicondutores que operam como chaves (IGBTs, MOSFETs, etc) e diodos de potência. Estes dispositivos são uma alternativa viável para o processamento de energia por apresentarem baixas perdas no chaveamento e alta confiabilidade.

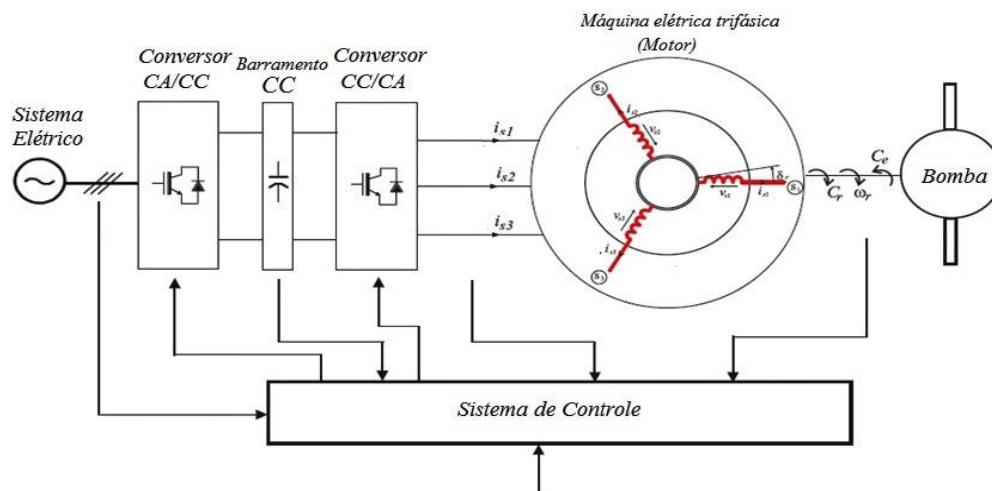


Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de acionamento à velocidade variável para bombeamento

Fonte: CURSINO BRANDÃO JACOBINA, 2015

O conversor estático pode ser classificado de acordo com sua forma de onda na entrada e na saída, que pode ser contínua (CC) ou alternada (CA). Então, a conversão realizada pelo conversor pode ser do tipo, CC-CC, CC-CA, CA-CC, CA-CC-CA [1]. Na conversão CA-CC-CA, como ilustrado na Figura 1, o conversor processa a energia retificando-a e depois a invertendo, compartilhando o mesmo barramento CC que funciona como uma fonte de tensão.

Esse conversor será usado para fornecer em sua saída a alimentação de energia para uma máquina elétrica de corrente alternada (CA) trifásica, também chamada de motor de indução (motor assíncrono), a partir de um sistema elétrico de alimentação. Este motor, por sua vez, está acoplado a uma bomba responsável por bombear uma massa de fluido de um local para outro.

O sistema de conversão apresentado neste trabalho inclui também um sistema de controle, formado basicamente por controladores PI e PI ressonante, que é responsável pelo controle de algumas variáveis do modelo estudado, como a tensão do barramento CC, as correntes senoidais dos conversores e da máquina, o conjugado eletromagnético e a velocidade da máquina. Esse controle permite que o sistema funcione dentro das condições operacionais desejadas.

Neste trabalho é mostrado como o sistema de acionamento à velocidade variável para bombeamento pode ser modelado e as técnicas de controle utilizadas para algumas variáveis do sistema.

Metodologia

Em termos gerais, este trabalho foi desenvolvido em cada tópico proposto seguindo interativamente os seguintes procedimentos: pesquisa e análise dos trabalhos bibliográficos no tema, que incluiu o estudo de topologias de conversores, da máquina elétrica e do processo de bombeamento; elaboração de modelos dinâmicos e de regime permanente; definição das estratégias de controle; desenvolvimento de programas de simulação e análise dos resultados.

Modelo do Conversor Fonte de Tensão Trifásico e Comando PWM

Quando é preciso alimentar cargas de potência importante utilizam-se sistemas trifásicos, nos quais a potência total é contínua, não possuindo parcela alternada, considerando que o sistema trifásico é equilibrado. O circuito do conversor fonte de tensão trifásico usado no sistema de acionamento está ilustrado na Figura 2.

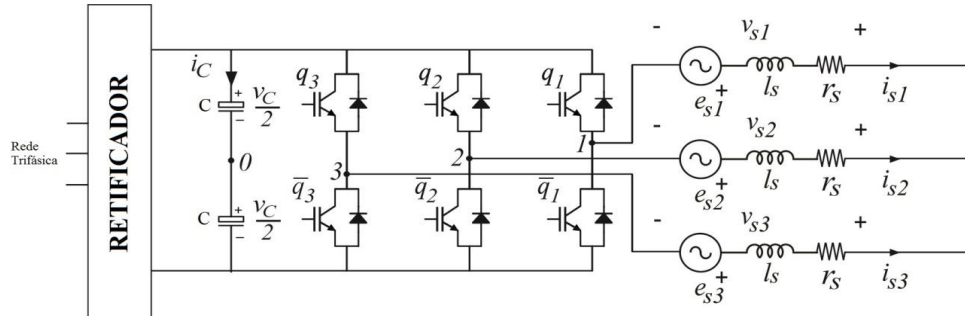


Figura 2 – Conversor fonte de tensão trifásico (VSI)

Fonte: CURSINO BRANDÃO JACOBINA, 2015

Analisando esse circuito as seguintes equações podem ser escritas:

$$v_{10} = v_{s1} + v_{N0} \quad (1)$$

$$v_{20} = v_{s2} + v_{N0} \quad (2)$$

$$v_{30} = v_{s3} + v_{N0} \quad (3)$$

As tensões de polo v_{10} , v_{20} e v_{30} são determinadas a partir da tensão do barramento e dos estados das chaves q_{sj} do conversor ($q_{sj} = 1$ representa chave aberta e $q_{sj} = 0$ chave fechada). A relação entre v_{j0} e q_{sj} é expressa como:

$$v_{j0} = (2q_{sj} - 1) \frac{v_c}{2} \quad j = 1, 2, 3$$

Para o sistema trifásico equilibrado tem-se que

$$\sum_{j=1}^3 v_{sj} = 0 \quad v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} = 0 \quad (4)$$

Substituindo (1), (2) e (3) em (4):

$$v_{N0} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 v_{j0} \quad (5)$$

Para impor tensões de referencia v_{sj}^* na carga com valores médios constantes num intervalo de chaveamento T , utilizou-se o comando PWM (modulação por largura de pulso), que consiste em converter um sinal de referência em um trem de pulsos com ciclos de trabalho variável para acionar as chaves do conversor, cujo sinal de saída possuirá valor médio igual ao sinal de referência.

As tensões de referência obtidas são expressas como segue.

$$v_{sj}^* = V_f^* \cos\left(wt - (j-1)\frac{2\pi}{3}\right) \quad j = 1,2,3 \quad (6)$$

De acordo com as equações (1), (2) e (3) podemos escrever as tensões de referência em função de um grau de liberdade v_{N0}^* .

$$v_{j0}^* = v_{sj}^* + v_{N0}^* \quad j = 1,2,3 \quad (7)$$

Para gerar tensões médias em um intervalo T igual a v_{sj}^* , escolheu-se um valor para o grau de liberdade v_{N0}^* , garantindo que o sinal do PWM não sature, visto que o sinal da portadora varia entre $\pm v_c/2$. Os valores máximo e mínimo para v_{N0}^* podem ser escritos da seguinte forma:

$$v_{N0max}^* = \frac{v_c}{2} - \max(v_{sj}^*) \quad (8) \quad v_{N0min}^* = -\frac{v_c}{2} - \min(v_{sj}^*) \quad (9)$$

Assim v_{N0}^* pode estar entre v_{N0max}^* e v_{N0min}^* , atribuindo-se um parâmetro μ ($0 < \mu < 1$). O grau de liberdade v_{N0}^* ainda pode ser escrito como

$$v_{N0}^* = \mu v_{N0max}^* + (1 - \mu) v_{N0min}^* \quad (10)$$

Na simulação realizada, considerou-se μ igual a 0.5.

Os estados das chaves q_{j0} podem ser obtidos comparando-se um sinal triangular com as tensões de referencias calculadas em (7). O sinal triangular é dado por

$$trig = \pm \frac{v_c}{T} t$$

Modelo do Motor de Indução

O motor de indução ou máquina assíncrona é formado por uma armadura trifásica estatórica e uma armadura rotórica separada por um ângulo δ_r e cada armadura é composta por três bobinas idênticas com eixos magnéticos defasados de 120° “elétricos”.

Para estudar o acionamento do motor de indução, faz-se necessário o seu modelo dinâmico. Como o objetivo de obter um modelo elétrico com parâmetros constantes para caracterização do motor, utilizou-se o modelo *odq*, obtido a partir de uma transformação de base:

$$x_{s123} = P(\delta_g) x_{sodq} \quad x_{r123} = P(\delta_g - \delta_r) x_{rodq}$$

$$P(\delta_p) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\delta_p) & -\sin(\delta_p) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\delta_p - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta_p - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\delta_p + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta_p + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Considere que x_{s123} representa as variáveis estatóricas (corrente, tensão ou fluxo) e x_{sodq} representa as variáveis equivalentes na nova base *odq*. As variáveis rotóricas equivalentes são x_{r123} e x_{rodq} . E δ_p é um ângulo de transformação genérico: $\delta_p = \delta_g$ para grandezas estatóricas e $\delta_p = \delta_g - \delta_r$ para grandezas rotóricas.

O modelo dinâmico *odq* da máquina assíncrona é mostrado nas equações abaixo e está descrito em mais detalhes em [4].

$$v_s^g = r_s i_s^g + \frac{d\varphi_s^g}{dt} + j\omega_g \varphi_s^g \quad (11)$$

$$0 = r_r i_r^g + \frac{d\varphi_r^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \varphi_r^g \quad (12)$$

$$\varphi_s^g = l_s i_s^g + l_m i_r^g \quad (13)$$

$$\varphi_r^g = l_r i_r^g + l_m i_s^g \quad (14)$$

$$P(c_e - c_m) = J \frac{d\omega_r}{dt} + F\omega_r \quad (15)$$

$$c_e = P \frac{l_m}{l_r} i_s (i_{sq}^g \varphi_{rd}^g - i_{sd}^g \varphi_{rq}^g) \quad (16)$$

O índice g indica que as variáveis encontram-se num referencial genérico. As variáveis e parâmetros usados neste modelo são definidos como: i) $v_s^g = v_{sd}^g + jv_{sq}^g$, $i_s^g = i_{sd}^g + ji_{sq}^g$, $i_r^g = i_{rd}^g + ji_{rq}^g$, $\varphi_s^g = \varphi_{sd}^g + j\varphi_{sq}^g$, $\varphi_r^g = \varphi_{rd}^g + j\varphi_{rq}^g$ são vetores que representam a tensão no estator, corrente no estator, corrente no rotor, fluxo estatórico e fluxo rotórico, respectivamente; ii) ω_r , ω_g , c_e , c_m são a velocidade angular do eixo do motor, a velocidade angular do sistema de coordenadas odq , o conjugado eletromagnético e o conjugado mecânico, respectivamente; iii) δ_g e δ_r são a posição angular do referencial arbitrário e a posição angular do eixo magnético do rotor, respectivamente e iv) l_s , l_r , l_m , r_s , r_r , J , F , P são a indutância próprio do estator, indutância própria do rotor, indutância mútua entre o estator e o rotor, resistência estatórica, resistência rotórica, momento de inércia, coeficiente de atrito e números de pares de polos, respectivamente.

A partir dos modelos discutidos nesta seção foi realizada a simulação do sistema utilizando o *software MatLab*.

Resultados e Discussão

As etapas seguidas para obtenção dos resultados consistiu em simular o conversor fonte de tensão trifásica e comando PWM, acoplar os dois conversores trifásicos ao mesmo barramento, realizar o controle da corrente e da tensão do barramento CC dos conversores, acoplar a máquina ao conversor e por fim realizar o controle do fluxo e conjugado, correntes e velocidade da máquina de indução trifásica.

A Figura 3 ilustra o resultado da simulação para o conversor trifásico, mostrando o funcionamento do comando PWM no que diz respeito a gerar a combinação de chaves apropriada que resulte na tensão de referência desejada.

A Figura 4 mostra o resultado para o controle de tensão do barramento CC e das correntes do conversor trifásico. Os ganhos dos controladores foram ajustados de forma que a tensão do barramento CC e as correntes seguissem os valores de referência.

A Figura 5 ilustra os resultados obtidos da simulação depois do acoplamento do conversor trifásico com a máquina de indução. Nesta simulação utilizou-se um controlador PI ressonante para controlar as correntes no estator da máquina e um controlador PI normal para controlar a velocidade da máquina e assim determinar um conjugado eletromagnético de referência. A estratégia de controle utilizada para a máquina de indução foi o controle por orientação de campo rotórico que é descrito em [3] e [4].

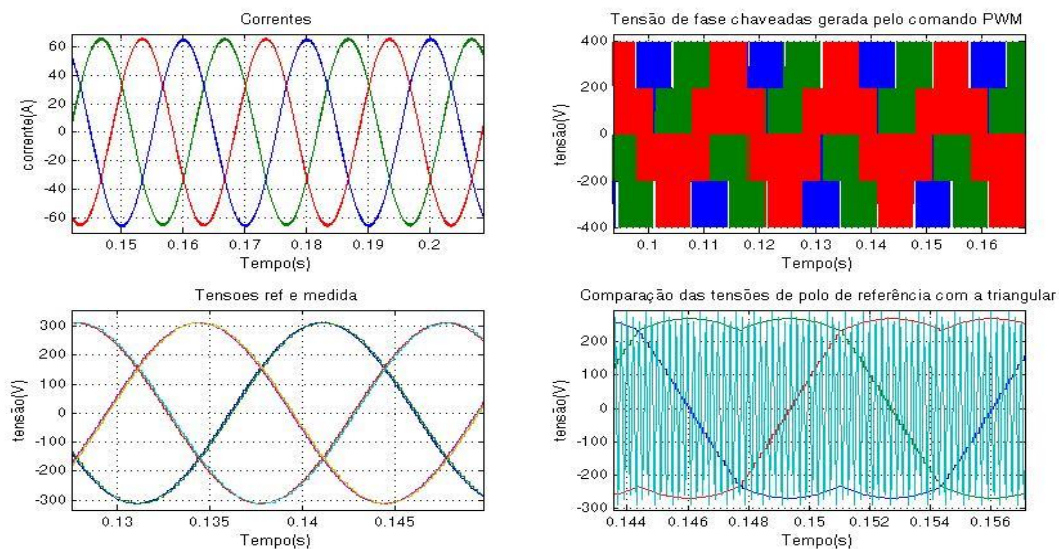


Figura 3 – Resultado da simulação do conversor fonte de tensão trifásico e comando PWM

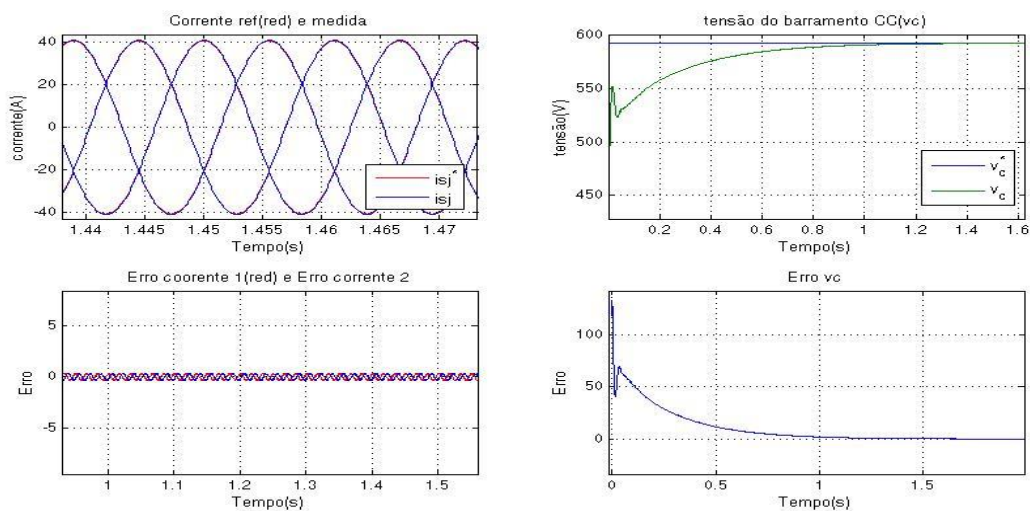


Figura 4 – Controle da corrente e da tensão do barramento CC do conversor trifásico

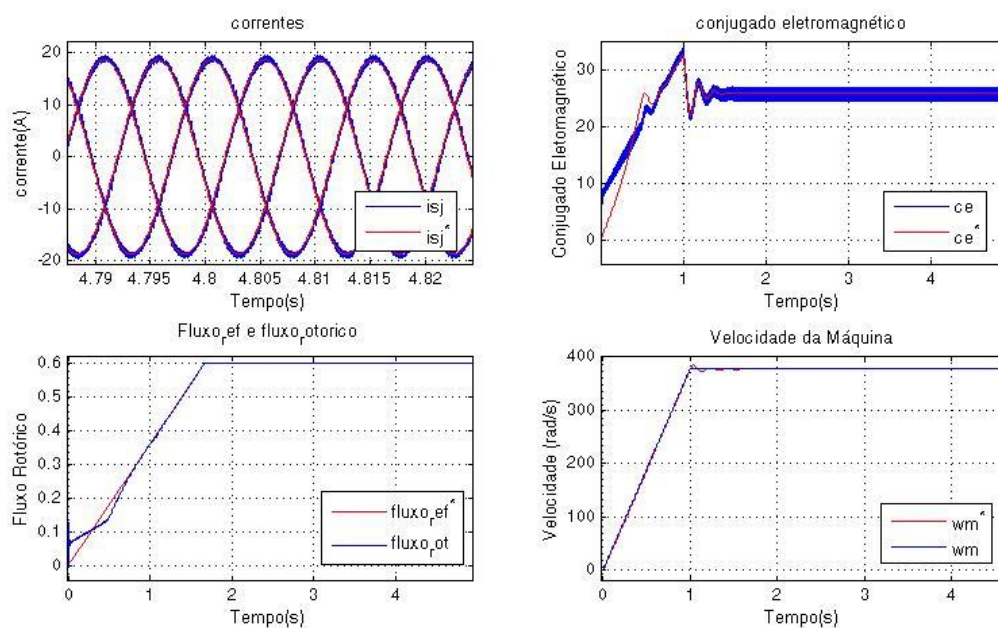


Figura 5 – Controle de grandezas da máquina de indução

Conclusões

Os resultados evidenciaram, de modo geral, a validade dos modelos estudados para o conversor fonte de tensão trifásico e para a máquina de indução. A simulação do modelo para o conversor trifásico mostra-se adequada pelo fato de que as tensões medidas na saída do conversor corresponderam às tensões de referência especificadas na simulação com pouco ou quase nenhuma distorção no sinal de saída da tensão. As tensões de polo de referência calculadas dentro do comando PWM e a comparação com a portadora triangular também resultou na combinação apropriada de chaves para gerar as tensões na saída.

Os resultados para o controle das correntes e da tensão do barramento CC para o conversor também foram satisfatórios, pois o erro em regime permanente tanto para as correntes controladas como para a tensão do barramento tendeu a zero.

A análise gráfica dos resultados para a simulação da máquina de indução mostra que a estratégia de controle utilizada para o controle das correntes no estator da máquina, da velocidade, do fluxo e do conjugado eletromagnético foi bem sucedida em controlar essas variáveis, pois os valores medidos para as grandezas controladas corresponderam aos valores de referência.

Outros estudos podem ser desenvolvidos a partir do sistema de acionamento trifásico aqui apresentado, testando-se novas topologias de conversores e de máquinas elétricas e avaliando a eficiência do uso desses elementos no processo. Pretende-se também realizar futuros testes experimentais em uma plataforma disponível no LEIAM, Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas, onde a pesquisa foi desenvolvida e apresentar os resultados em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro concedido pela ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e pela PETROBRÁS, o apoio do Programa de Recursos Humanos (PRH-42) e ao Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM-UFCG).

Referências Bibliográficas

- [1] VITORINO, Montiê Alves, Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Motor de Indução e Sem Baterias. 2008. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- [2] VITORINO, Montiê Alves, Otimização do Processamento da Energia em Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico e Conversão Monofásica. 2012. 294 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- [3] W. Leonhard, Control of Electric Drives. Berlin: Springer Verlag, first ed., 1985.
- [4] JACOBINA C. B., “Sistema de Acionamento Estático de Máquina Elétrica”, Curso de Acionamento, UFCG, Campina Grande, Junho de 2005.
- [5] Lai, R.; Wang, F.; Burgos, R.; Pei, Y.; Boroyevich, D.; Wang, B.; Lipo, T.; Immanuel, V. e Karimi, K. (2008), A systematic topology evaluation methodology for high-density three-phase pwm ac-ac converters, Power Electronics, IEEE Transactions on, 23(6):2665-2680.