

APLICAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO SEM MANCAL PARA BOMBAS DE EXPLORAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE PETRÓLEO

Filipe O. Quintaes¹, Andrés O. Salazar², André L. Maitelli³, Jossana Maria de S. F.⁴, José Álvaro⁵, Stella N. D. Lisboa⁶, Felipe E. F. Castro.⁷

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caixa Postal 1524 - Campus Universitário
Lagoa Nova CEP 59072-970 Natal - RN – Brasil.

¹ filipe@dca.ufrn.br, ² andres@dca.ufrn.br, ³ maitelli@dca.ufrn.br, ⁴ jossana@dca.ufrn.br,
⁵ alvaro@dca.ufrn.br, ⁶ stella@dca.ufrn.br, ⁷ felipe@dca.ufrn.br

Resumo – Este artigo apresenta uma possível alternativa para a aplicação da Máquina de Indução sem Mancal. O principal objetivo desta aplicação é a diminuição das intervenções sobre as bombas de extração e distribuição de petróleo, reduzindo as perdas por parada da produção, bem como os custos relacionados à manutenção. Atualmente já existe um protótipo instalado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e já foram conseguidos resultados preliminares satisfatórios. Existe a possibilidade da eliminação da tensão de modo comum através do acionamento da máquina com técnicas de modulação vetorial, o qual, atualmente, é um problema com acionamentos trifásicos convencionas em função dos conversores de frequência.

Palavras-Chave: Máquina de indução sem mancal, bombas, manutenção.

Abstract – This article presents a possible alternative for the application of the bearingless Induction Machine. The main objective of this application is the reduction of the interventions on the distribution and extration pumps of oil, reducing the losses for stopped of the production as well as the costs related to the maintenance. Currently there is an archetype installed at the Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) and it was obtained satisfactory preliminary results. There is the possibility of elimination of the commom mode voltage through of the driving of the machine by using vector modulation techniques which, nowadays, it is a problem with convencional three-phase drinving through frequency converter.

Keywords: Induction machine, pumps, maintenance.

1. Introdução

Durante o processo de produção e de distribuição de petróleo são comuns as intervenções sobre as bombas para efetuação da manutenção, sendo ela corretiva, preventiva ou preditiva. Como já é de conhecimento a manutenção corretiva é a pior, isto é a mais onerosa e conseqüentemente a que causa maiores prejuízos de produção, decorrente as paradas e intervenções não serem planejadas. Com o avanço da eletrônica, que permitiu a criação da chave de partida de estado sólido e também dos conversores de frequência possibilitando um acionamento suave, controle de torque, controle de velocidade proteção de subtensão de entrada, falta de fase, sobrecarga, etc. e também com o avanço da qualidade da linha de produção dos motores os motivos para quebra de motores esta relacionados a problemas mecânicos, e principalmente a problemas relacionados aos desgastes de seus rolamentos como também de seus mancais mecânicos.

Quando aplicada à manutenção preventiva, ocorre uma vantagem em relação à corretiva, pois as paradas e intervenções são planejadas e o custo relacionado com peças de reposição é inferior quando da quebra da máquina, mais continuando bastante onerosa, 60% das intervenções são desnecessárias e se obedecer aos intervalos de relubrificação dos rolamentos recomendados pelos fornecedores das bombas as intervenções serão necessárias pelo menos em intervalos de 1 ano a 2 anos e 4 meses [Manual Técnico WEG].

Se aplicada à manutenção preditiva, as intervenções só serão efetuadas quando realmente há necessidade, porém na maioria dos casos estas intervenções esta relacionados a problemas mecânicos, aos desgastes de seus rolamentos e também de seus mancais mecânicos. E, além disso, os custos chegam em torno de (7\$-9\$/HP).* Fonte do Instituto de Energia Elétrica dos Estudos Unidos.

Conforme visto qualquer intervenção sobre as bombas, sendo ela planejada ou não requer custos para a empresa. A idéia proposta deste trabalho é uma possível aplicação da máquina de indução sem mancal para as bombas de extração e distribuição de petróleo, pois a mesma não possui rolamentos e nem mancais mecânicos possibilitando uma redução das intervenções.

Uma outra vantagem esta na possibilidade de um acionamento, através de tecnologia de modulação vetorial hexafásica, com eliminação da tensão de modo comum. Atualmente o problema da tensão de modo comum presente com conversores de frequência trifásicos convencionais causa em um pequeno espaço de tempo o desgaste da película lubrificante dos rolamentos e conseqüentemente a degradação do mesmo e também do mancal mecânico, em função do atrito.

2. Visão Geral do Sistema e Caracterização do Protótipo

Um motor de indução sem mancais requer o controle de um corpo no espaço (o rotor) através de um sistema bastante sofisticado. As forças de Lorentz, que agem em direção tangencial à sua superfície cilíndrica e são as causas do torque que o rotaciona; forças de relutância, que agem em direção normal à sua superfície cilíndrica e são aproveitados para posiciona-lo radialmente.

A força de relutância é derivada a partir da energia armazenada no campo magnético, a qual pode ser convertida em energia mecânica (SCHWEITZER, BLEULER, TRAXLER, 1994). Esta força sempre surge sobre a superfície de meios de diferentes permeabilidades magnéticas, como este tipo de força é empregado no sistema de estabilização da máquina de indução trifásica sem mancais.

O motor de indução é baseado naquele motor convencional de quatro pólos, que demonstrou a viabilidade de aplica-lo com a função de mancal implícito (FERREIRA, 2002). No protótipo, o eixo longitudinal é mantido na direção horizontal. São duas máquinas fixadas e alinhadas com o eixo principal de rotação. Os estatores fixam-se à base através de um cilindro em comum, assim como os rotores são montados em eixo único.

Para fixar o rotor no espaço, é necessário controlar seis graus de liberdade. Um deles é a própria rotação em torno de seu eixo principal. Outro grau de liberdade diz respeito ao movimento axial do rotor. Este não será levado em conta aqui, pois esta tecnologia já é conhecida, e assumindo-se que o próprio campo magnético da máquina tende a manter os rotores dentro dos estatores. Sobram quatro graus de liberdade: dois para cada extremidade do rotor, compondo movimentos radiais, os quais são sensoriais e limitados mecanicamente.

A Figura 1 mostra todas estas possibilidades de movimentação de um eixo, destacando os que serão controlados: x_1, y_1, x_2 e y_2 .

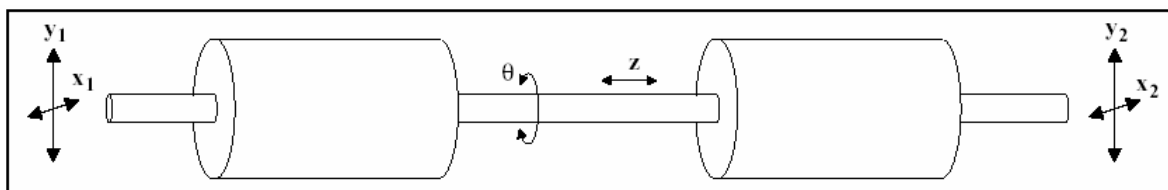


Figura 1. Graus de Liberdade de Movimentos do Rotor

A Figura 2 mostra um corte vertical sobre o protótipo, detalhando as disposições dos dois estatores e rotores. Não estão mostrados os enrolamentos de cobre, somente a estrutura simplificada do motor. Basicamente, o sistema funciona como dois motores acoplados mecanicamente por um eixo em comum. Para simplificar análise, somente uma das extremidades deste protótipo será levada em consideração, assumindo-se que o outro funciona como um pivô de apoio que restringe os outros dois graus de liberdade relativos ao deslocamento radial lá.

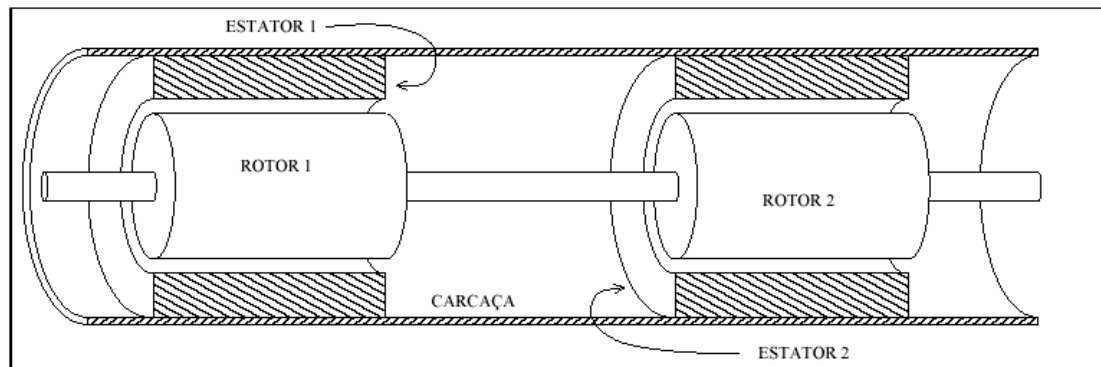


Figura 2. Disposição dos Estatores e Rotores dentro da Máquina

3. Configuração do Estator

O esquema de ligação de cada estator é trifásico de quatro pólos, na configuração de pólos consecuentes. Ou seja, só existem dois grupos de bobinas para cada fase, totalizando seis grupos, distribuídos ao longo de 36 ranhuras. E cada grupo é formado por três bobinas, dispostas concentricamente. A Figura 3 mostra como os seis grupos são ligados para acionar o motor. Nesta ligação, a única diferença com relação àquela de um motor convencional é que os pares de grupos opostos não são ligados em série. Ao invés disso, divide-se estes pares, alimentando cada um independentemente. Daí o motivo para o nome desta configuração: com bobinado dividido.

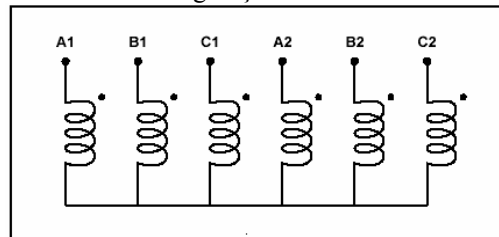


Figura 3 .Ligação dos Enrolamentos do Estator

4. Configuração do Rotor

O rotor é composto por circuitos elétricos fechados, os quais não se opõem à variação diferencial do fluxo magnético entre dois grupos opostos. A geometria de um destes circuitos está mostrada na Figura 4.

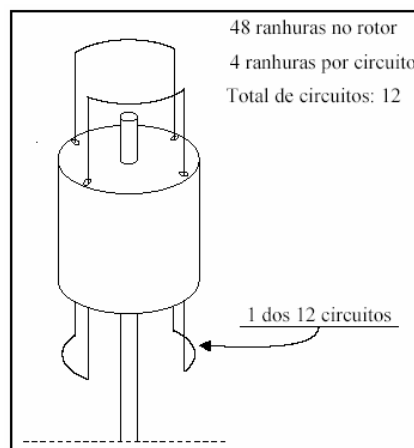


Figura 4 . Configuração de um dos circuitos do rotor

A representação deste circuito pelo ponto de vista da Figura 5 facilita entender porque ele não se opõe à variação diferencial do fluxo magnético. Nesta figura está mostrado um dos dois sentidos possíveis para a corrente elétrica induzida passar através da espira no rotor. Este sentido é tal que reage ao aumento do fluxo total na máquina.

No entanto, ao se modificar o fluxo de uma maneira diferencial em relação às duas regiões opostas no entreferro, não mais haverá indução sobre o circuito no rotor. A Figura 6 mostra um exemplo de tal variação. O aumento na corrente do grupo da direita reflete um aumento no fluxo magnético deste lado. A linha de fluxo mais fina representa este aumento, com seu sentido sendo o mesmo do fluxo principal. O mesmo se dá para a diminuição da corrente sobre o lado esquerdo, com sentido da linha fina sendo o inverso ao da linha grossa. O desenho indica duas correntes que fluem em sentidos opostos no mesmo circuito, o que seria absurdo. Portanto, conclui-se que a resultante de corrente no rotor é nula neste caso.

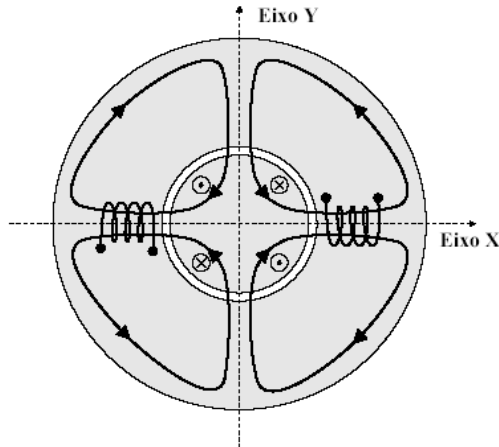


Figura 5. Indução no rotor devido ao aumento do fluxo magnético

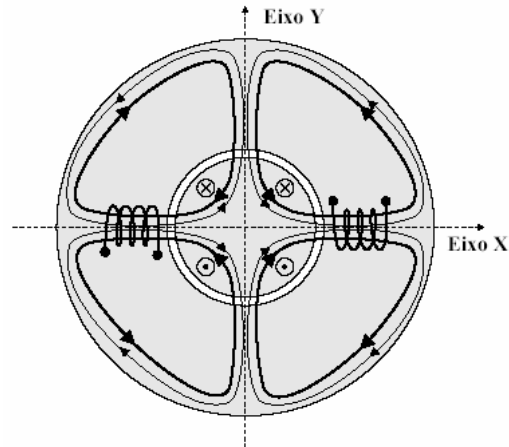


Figura 6. Anulação das correntes no rotor frente à variação diferencial do fluxo magnético

Esta configuração facilita o controle da distribuição do fluxo dentro do motor, supondo-se a aplicação do modo de atuação diferencial descrito antes. Com isso a faixa de estabilização do sistema de posicionamento radial pode ser aumentada, com forças de atuação maiores.

5. Controle com PWM escalar (posição e campo girante)

O motor sem mancais recebe seis comandos de corrente para as bobinas do estator. Existem seis malhas de controle independentes para as correntes e conseqüentemente seis inversores, um para cada bobina da máquina, como mostrado na Figura 7. O controle das correntes é implementado em um algoritmo dentro de um processador digital de sinais (DSP). As referências para o controle das correntes elétricas são dadas pela combinação entre os comandos de campo girante e de força radial. Os comandos de campo girante são gerados pela variação do ângulo de referência de um sistema trifásico equilibrado, criando assim o efeito do campo magnético girante. O controle de campo girante e rotação ainda mantém-se em malha aberta. A referência trifásica é gerada através de uma tabela dentro do DSP como também o cálculo do acoplamento entre torque e força radial.

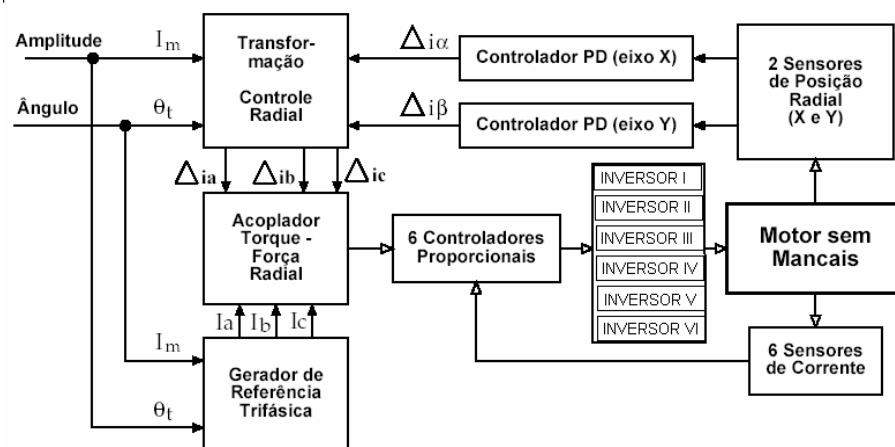


Figura 7. Diagrama de Blocos para acionamento com PWM escalar

No bloco (Transformação Controle Radial) é feita a transformação que relaciona os sinais de controle Δia , Δib e Δic aos sinais de controle nas direções dos sensores de posicionamento, $\Delta i\alpha$ e $\Delta i\beta$. A transformação é mostrada na Equação 1 e está definida em [3].

$$\begin{bmatrix} \Delta ia \\ \Delta ib \\ \Delta ic \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} \Delta i\alpha \\ \Delta i\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ia + \Delta ia \\ Ib + \Delta ib \\ Ic + \Delta ic \\ Ia - \Delta ia \\ Ib - \Delta ib \\ Ic - \Delta ic \end{bmatrix} \quad (2)$$

Equação 1 – Transformação Controle Radial

Equação 2 – Cálculo das seis correntes de referência

No bloco (Acoplador Força Radial) é feito o cálculo das seis correntes de referência já com o sinal de controle de campo girante como também o de posição. O cálculo é mostrado na Equação 2.

Onde I_a , I_b e I_c são as correntes senoidais aplicadas ao estator, responsável pelo campo girante da máquina, Δia , Δib e Δic são as correntes de controle de posicionamento radial responsável pela centralização do eixo do rotor.

6. Controle com PWM vetorial (posição e campo girante)

As técnicas PWM digitais podem ser divididas em técnicas escalares e vetoriais. Na abordagem escalar se opera com as tensões trifásicas por fase enquanto na abordagem vetorial emprega-se o vetor tensão associado às tensões trifásicas.

As técnicas de modulação vetorial aplicada aos conversores trifásicos já tem seus conceitos bem definidos na literatura [5 e 6]. Neste trabalho será apresentada uma técnica com eliminação da tensão de modo comum a ser empregada para o acionamento da MISM.

6.1 PWM vetorial com eliminação da tensão de modo comum

Para a eliminação da tensão de modo comum é feita uma nova abordagem, isto é com a matriz de transformação encontrada, é feito o mapeamento dq e xy em duas dimensões. Observe que agora, diferente do trifásico existem seis dimensões, isto é 64 vetores. Os setores são divididos. É desenvolvido para sintetizar o vetor de referência usando vetores que definem outras áreas triangulares pequenas (Tr) que contenham o vetor da tensão de referência (v^*). Estas regiões podem ser subdivididas conforme mostrado nas Figuras 08 e 09.

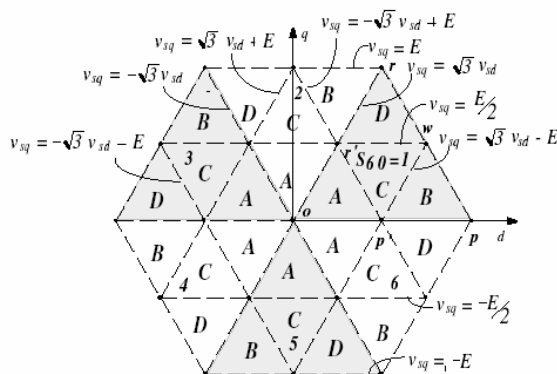


Figura 8. Amplitude das áreas triangulares

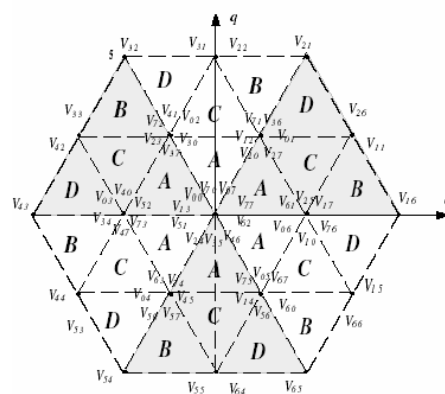


Figura 9. Mapeamento dq

A identificação do setor que se encontra o vetor de referência é em função de V_{sd} e V_{sq} , conforme apresentado no teste lógico através das amplitudes dos vetores de referência. O cálculo do intervalo de tempo para os setores depende da região (Tr) e do setor (S60) que contem o vetor de referência. Assim a tensão de saída como a tensão de modo comum para este caso, está mostrado na Figura 10.

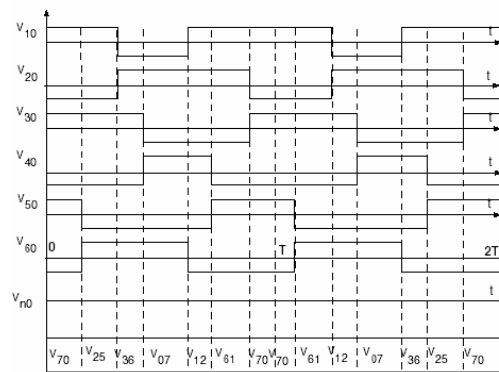


Figura 10. Eliminação da tensão de modo comum

7. Resultados Experimentais

A máquina de indução sem mancal já está em fase de testes, e com a utilização de técnicas com modulação escalar foram obtidos resultados satisfatórios. Como mostrado na decomposição espacial dos vetores relacionados aos dois grupos de bobinas trifásicas, na Figura 11. Atualmente está em desenvolvimento a implementação de técnicas vetoriais para a aplicação da MISM, onde se pretende eliminar a tensão de modo comum, diminuir os harmônicos de corrente como também diminuir perdas por chaveamento.

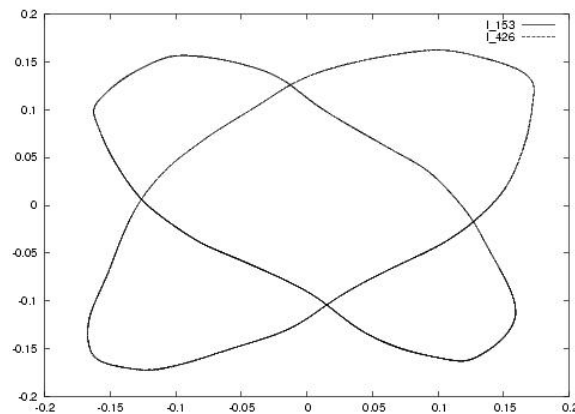


Figura 11. Trajetória real do vetor U_{out} dos dois grupos trifásicos

8. Conclusão

Embora os testes iniciais, a máquina não está trabalhando com carga, os resultados preliminares conseguidos foram bastante promissores. Atualmente está em desenvolvimento uma tese de Mestrado que irá abordar o emprego de técnicas de modulação vetorial que possibilitara a eliminação da tensão de modo comum.

O problema da tensão de modo comum para os inversores trifásicos já é conhecido e para máquinas de grandes potências é um problema que só é resolvido com rolamentos especiais (que ainda estão em fase de testes) e ou aterramento do eixo através de escovas. Com a eliminação da tensão de modo comum, a proteção mecânica da estrutura da máquina estará garantida, apesar da máquina não ter o mancal mecânico esta tensão pode danificar o próprio acoplamento com a carga.

E em função dos resultados alcançados podemos prever num futuro breve a utilização da máquina de indução sem mancal com carga acoplada e possibilitando a utilização da mesma para bombas: centrifugas, helicoidais engrenagens, etc.

9. Referências

- [1] JACOBINA, C. B. e LIMA, A. M. N., Minicurso - Acionamento de Máquinas Elétricas de Alto Desempenho, XIV – Congresso Brasileiro de Automática.
- [2] FERREIRA, J. M. de S. Proposta de máquina de indução trifásica sem mancal com bobinado dividido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Abril 2002.
- [3] CASTRO, F. E. F. Motor de Indução Trifásico sem mancais: otimização do sistema de controle. Qualificação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Julho 2004.
- [4] CHIBA, A. et. al. Transfer characteristics of radial force of induction type bearingless motors with four pole rotor circuits. : ISMB. Japa: [s.n.], 1996.p.319-325.