

CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR GAIOLA DE ESQUILO MONTADO PARA FINS DIDÁTICOS.

Arnaldo Lopes Leite¹, José Vinicius Wunderlich¹, Luiz Roberto Nogueira².

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO.
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Av. Shishima Hifumi, 2911 – Urbanova – São José dos Campos – SP.
arnaldoll@yahoo.com.br, nogueiralr@uol.com.br

Resumo- Desenvolver um motor trifásico de cunho didático com intuito de mapear as variáveis que estão diretamente ligadas às características de um motor trifásico tais como conjugado de partida, corrente de partida e escorregamento.

O entender das variáveis pertinentes a motores trifásicos na prática, aliado ao conteúdo teórico do curso de engenharia é indispensável ao profissional de engenharia elétrica, pois o motor elétrico é o dispositivo motriz mais utilizado devido ao seu excelente custo benefício.

Palavras-chave: Estator, Rotor, Máquina de indução, Campo girante, Escorregamento.

Área do Conhecimento: Engenharias

Introdução

Um dos grandes desafios da engenharia é gerar movimento com o mínimo de energia empregada para obtenção de força motriz. O principal agente neste desafio é o motor. Motores são utilizados para os mais variados fins e concebidos para trabalhar com uma gama de fontes de energia. Para termos uma visão mais tangível do funcionamento do MIT (motor de indução trifásica) construímos um motor com características próprias voltadas a fins didáticos. O MIT construído possui um estator de seis pólos e rotor do tipo gaiola de esquilo com núcleo maciço o que caracteriza uma máquina de indução com funcionamento baseado na indução de correntes nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação no tempo, de correntes no estator e do movimento do rotor em relação ao estator.

O enrolamento do estator recebe correntes alternadas, com isso, são produzidas correntes no rotor por indução, ou seja, por ação de transformador. Desta maneira a máquina de indução por ser vista como um transformador generalizado em que potência elétrica é transformada entre o rotor e o estator juntamente com uma mudança de frequência em um fluxo de potência mecânica (A.E. FITZGERALD, C. KINGSLEY JR.; STEPHEN D. UMANS, 2006).

Para determinar as tensões induzidas por campos magnéticos variáveis no tempo podemos usar a equação da lei de indução eletromagnética de Faraday $e = -d\Phi/dt$. A conversão eletromagnética de energia ocorre quando surgem alterações no

fluxo concatenado Φ decorrentes de um movimento mecânico. Nas máquinas rotativas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou grupos de bobinas quando esses giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando um campo magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda, quando o circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor. Por meio desses métodos, o fluxo em uma bobina específica é alterado ciclicamente e, com isso, uma tensão variável no tempo é gerada (A.E. FITZGERALD, C. KINGSLEY JR.; STEPHEN D. UMANS 2006).

Entendido os conceitos de indução partimos para a teoria que leva ao movimento do rotor. O movimento se dá por meio do campo girante que ocorre através das correntes trifásicas que percorrem os enrolamentos do estator que vão gerar em cada fase, campos pulsantes, defasados de um ângulo igual ao da defasagem entre as tensões aplicadas cujos eixos de simetria são fixos no espaço, mas cuja resultante é um campo que gira num determinado sentido chamado campo girante, este induzido no rotor proporciona o giro do mesmo (CG, UNICAMP).

O cálculo do escorregamento parte do princípio de que, para o motor em operação, o torque é diretamente proporcional ao escorregamento.

No método padrão de escorregamento realiza medições de escorregamento (s) e de potência de entrada ($P_{entrada}$) e utiliza os dados de placa do motor de Potência nominal ($P_{nominal}$) e escorregamento nominal ($s_{nominal}$) para o cálculo da eficiência de acordo com a expressão:

$$\eta = (746 * P_{nominal} * s) / (P_{entrada} * S_{nominal})$$

O seu maior atrativo é a simplicidade, no entanto, os dados de placa de velocidade nominal podem apresentar erros permitidos por norma de até 20%.

O método de Ontário Hidro do escorregamento compensado aperfeiçoa o método anterior incluindo os efeitos da tensão (V) sobre a eficiência do motor:

$$\eta = (746 * P_{nominal} * S * V^2) / (P_{entrada} * S_{nominal} * V_{nominal}^2)$$

O método do limite superior de escorregamento estabelece um valor máximo para o rendimento de um motor a partir do valor de seu escorregamento nominal. A expressão é simples ($\eta \leq 1 - s_{nominal}$), porém sua aplicação é limitada e basicamente serve para comparar o rendimento de dois motores de mesma potência. Aquele com menor escorregamento (maior velocidade nominal) pode apresentar melhor eficiência em condições similares de operação.

Motor Master+ é um analisador de eficiência que permite o cálculo por três métodos (escorregamento, corrente e potência de entrada). No caso da potência de entrada, calcula a estimativa de carga utilizando a eficiência a 100% da carga ($\eta_{nominal}$) fornecida pelo fabricante:

$$Carga = P_{entrada} / (P_{nominal} / \eta_{nominal})$$

A partir deste valor, utiliza dados de fabricante e de um de dados de motores testados para estimar a eficiência do motor no ponto de operação medido. Possui uma opção para motores rebobinados, reduzindo a eficiência em dois pontos. Apresenta baixa precisão, mas é pouco invasivo, econômico e seguro (Cássio T. C. Andrade. 2009 / ARCE).

Metodologia

O ponto de partida para construção se deu na determinação do componente que permite explorar uma melhora no desempenho de um motor; é notório que o componente que sofreu maior evolução no tempo foi o rotor e, desta maneira, concentramos neste componente nosso estudo.

Sabemos que no estator de um MIT os três enrolamentos estão deslocados um do outro de 120° sendo alimentado por uma fonte trifásica. As tensões fornecidas pela fonte trifásica estão defasadas 120°, estas nas bobinas, resultam em correntes iguais defasadas entre si de 120°. As

correntes geram campos magnéticos pulsantes originando um campo girante resultante de valor constante, este gira o rotor com uma velocidade síncrona que depende da frequência da fonte e do número de polos para os quais o estator foi enrolado (Garcia. 1998 / Unicamp).

O rotor utilizado em nosso projeto é o rotor do tipo gaiola de esquilo constituído por um núcleo, provido de orifícios, nos quais são alojados fios de cobre curto-circuitados nos extremos entre si formando um anel.

O rotor se acha imerso no campo girante produzido pelas correntes no estator. Os condutores do rotor, atravessados pelo fluxo do campo girante, induz uma força eletromotriz que da origem a correntes de valor igual ao quociente da força eletromotriz pela respectiva impedância. Estas correntes reagem sobre o campo girante produzindo um conjugado no motor que faz o rotor girar no mesmo sentido do campo a uma velocidade rotórica, esta velocidade do rotor nunca pode atingir a velocidade do campo girante, isto é, a velocidade síncrona. Se esta velocidade fosse atingida, os condutores do rotor não seriam atravessados pelas linhas de força do campo girante, não se produzindo, portanto, correntes induzidas, sendo então nulo o conjugado do motor (Garcia. 1998 / Unicamp).

O estator utilizado foi retirado de um motor em funcionamento para que a partir de seus parâmetros pudéssemos dimensionar um rotor para o propósito de servir este modelo didático conforme figura 1. Concebemos o rotor com um diâmetro 15% menor e com um eixo mais longo que o rotor do motor original para facilitar a sua visualização em funcionamento. Como fonte de tensão trifásica utilizaremos um inversor de frequência que nos possibilita variar a velocidade do motor fornecendo frequências que podem variar de 1Hz a 60Hz que é a frequência fornecida pela concessionária de energia.

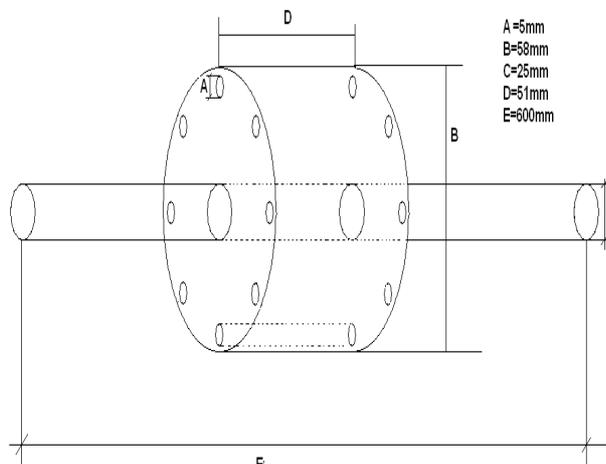


Figura 1. Desenho do rotor desenvolvido.

Tabela 1. Parâmetros do rotor

Item	Descrição	Dimensão
Núcleo	Diâmetro externo	58 mm
Núcleo	Comprimento do núcleo	51 mm
Núcleo	Abertura para condutor	5 mm
Eixo	Comprimento do eixo	600 mm
Eixo	Diâmetro do eixo	25 mm
Bobinado	Bitola do condutor	4 mm

Após a concepção do rotor uma estrutura foi desenvolvida para acondicioná-lo conforme mostrado na figura 2.

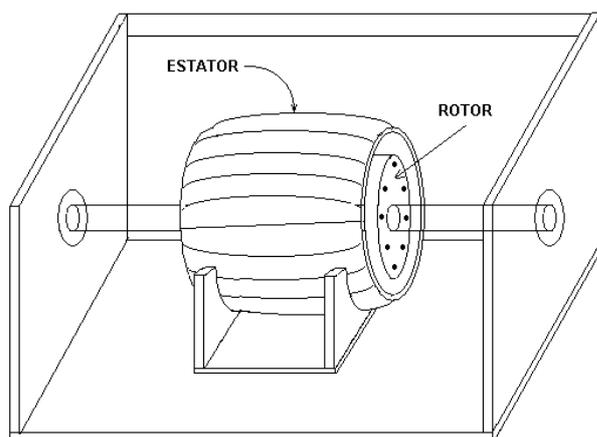


Figura 2. Montagem do motor.

Para o motor ser testado com segurança e com possibilidade de testes em diferentes amplitudes de tensão e variadas frequências utilizamos um inversor de frequência.

O inversor tem como função primordial a variação da velocidade rotórica do motor, os primeiros inversores de frequência eram escalares, ou seja seguiam a razão tensão frequência, ou seja um inversor fornecendo uma tensão de 220 Volts em uma frequência de 60 Hertz ao reduzir a velocidade em 50% fornece 110 Volts com uma frequência de 30 Hertz este inversor era bastante limitado principalmente quando usado em velocidade baixa e tinha com efeito colateral a perda de cunjugado no eixo. Com isso foi desenvolvida uma segunda geração de inversores chamados vetoriais, pois além de usar as variáveis tensão e frequência faziam uso de varias variáveis ao mesmo tempo dando ao inversor uma resposta de saída condizente com a necessidade da aplicação.

A figura 3 mostra em um diagrama do circuito de potência de um inversor seu funcionamento básico o inversor possui uma ponte retificadora trifásica que transforma a tensão de entrada fornecida pela rede em um sinal DC pulsante que é submetido a um filtro LC que diminui consideravelmente o fator de ondulação do sinal retificado além de filtrar ruídos oriundos do módulo IGBT, este por sua vez transforma o sinal DC filtrado em uma saída trifásica com defasagem de 120° com uma aparência de uma onda quadrada como mostra figura 4. (faatesp)

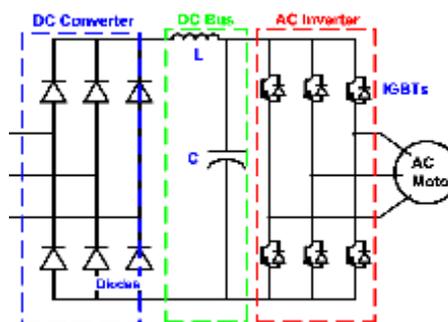


Figura 3. Diagrama do circuito de potência de um inversor,

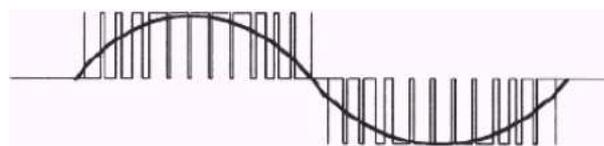


Figura 4. Sinal DC filtrado em uma saída trifásica.

Com a montagem concluída o motor alimentado e testado para obtenção de parâmetros de desempenho que são destacados na figura 5.

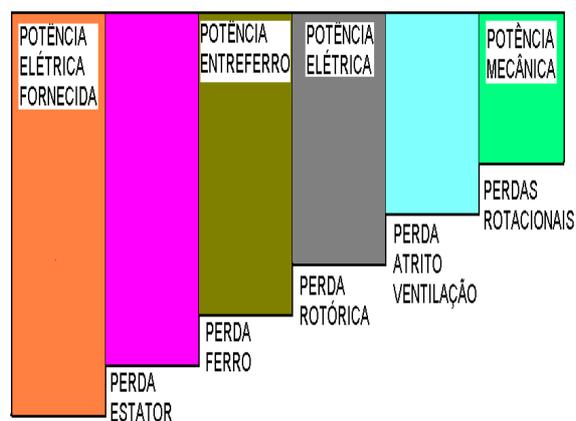


Figura 5. Diagrama de fluxo de potências.

Para obtenção destes parâmetros não dispomos de dados fornecidos pelo fabricante; e para determinarmos estes parâmetros utilizamos o

ensaio em DC (corrente contínua), ensaio em vazio e ensaio com rotor bloqueado e obtivemos os seguintes resultados.

Com estes ensaios podemos determinar parâmetros como resistência estatórica R1 e rotórica R2, perdas por fluxo de dispersão no estator X1 e no rotor X2 e a perda no ferro Xm conforme mostrado na figura 6.

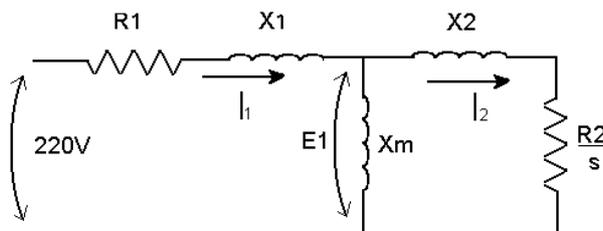


Figura 6. Diagrama monofásico do circuito primário.

Resultados

- **Ensaio DC:** 60 Volts, 10 Ampéres.
- **Ensaio Vazio:** 220 Volts, 2,5 Ampéres e 480 Watts.
- **Ensaio Rotor Bloqueado:** 80 Volts, 10 Ampéres, 830 Watts, em 15 Hertz.

Ensaio DC: Com os valores do ensaio DC pode-se determinar R1.

$$2 \cdot R1 = V/A$$

$$R1 = 3 \Omega \text{ (ohms)}$$

Ensaio Vazio: Com os dados obtidos no ensaio em vazio podemos determinar a Xm e as perdas rotacionais

$$Xm = (V/\sqrt{3})/A$$

$$Xm = 12,7 \Omega \text{ (ohms)}$$

$$p. \text{ rotacionais} = W - 3 \cdot R1 \cdot A^2$$

$$p. \text{ rotacionais} = 480 - 3 \cdot 3 \cdot 2,5^2$$

$$p. \text{ rotacionais} = 423,75 \text{ Watts}$$

Ensaio Rotor Bloqueado: Com este ensaio vamos obter |Zent|, Cosφ do motor, R2, X1 e X2.

$$|Zent| = (V/\sqrt{3})/A = (80/\sqrt{3})/10$$

$$|Zent| = 4,62 \Omega \text{ (ohms)}$$

$$\text{Cos}\phi = W/(\sqrt{3} V A) = 830/(\sqrt{3} \cdot 80 \cdot 10) \cong 0,6$$

$$\text{Cos}\phi = 0,6 \quad \phi \cong 53,2^\circ$$

$$Zent = 4,62 \angle 53,2^\circ = (2,77 + j3,70)\Omega \text{ (ohms)}$$

$$R1 + R2 = 3,96\Omega$$

$$R2 = 3,96 - 3 \quad R2 = 0,96\Omega \text{ (ohms)}$$

$$X1 + X2 = 2,38 \text{ com frequência de 15 Hertz}$$

$$X1 + X2 = 9,52 \text{ com frequência de 60 Hertz}$$

$$\text{Admitindo } X1 = X2 = 4,76\Omega \text{ (ohms)}$$

Com esses valores podemos simplificar o circuito da figura 6 e obter um circuito conforme a figura 7.

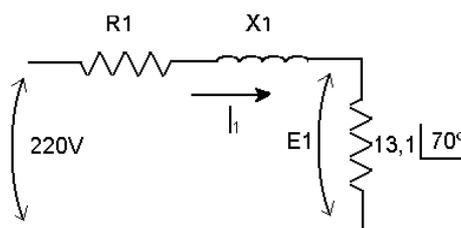


Figura 7. Circuito da figura 6 simplificado.

Simplificando a figura 7 obtemos o circuito conforme a figura 8.

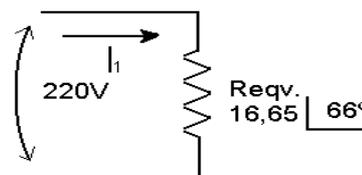


Figura 8. Circuito da figura 7 simplificado.

Com o circuito acima temos corrente estatórica I1. $I1 = (220 \angle 0^\circ) / (16,65 \angle 66^\circ) = 13,2 \angle -66^\circ$ Ampéres

$$E1 = I1 \cdot (13,1 \angle 70^\circ) = 174 \angle 4^\circ \text{ Volts}$$

$$I2 = E1 / (R2/s + X2) = (174 \angle 4^\circ) / (32 \angle 8,5^\circ)$$

$$I2 = 5,4 \angle 12,5^\circ \text{ Ampéres}$$

De posse destes dados e sabendo que escorregamento (s) é de 3% podemos calcular conjugado induzido, velocidade síncrona, velocidade rotórica, Potência convertida, Potência na carga e conjugado na carga. $Ns = (60 \cdot fs)/p$, sendo p número de pares de pólos. Para um motor de seis pólos p=3.

$$Ns = (60 \cdot 60)/3 = 1200 \text{ rpm (rotações por minuto)}$$

$$Nr = Ns - (s \cdot Ns) = 1200 - (0,03 \cdot 1200) = 1164 \text{ rpm}$$

$$Ws = 1200 \cdot (2\pi/60) \text{ rad/s}$$

$$Wr = 1164 \cdot (2\pi/60) \text{ rad/s}$$

O conjugado induzido (T_{ind}) é dado pela

$$\text{fórmula } T_{ind} = \{[3 \cdot (R/2s) \cdot I_2^2] / W_s\}$$

$$T_{ind} = \{[3 \cdot 32 \cdot 5,4^2] / [1200 \cdot (2\pi/60)]\}$$

$$T_{ind} = 22 \text{ Nm (Newtons metro)}$$

$$P_{convertida} = (1 - s) \cdot [3 \cdot (R/2s) \cdot I_2^2]$$

$$P_{convertida} = 2715 \text{ Watts}$$

$$P_{carga} = P_{convertida} - p_{rotacionais}$$

$$P_{carga} = 2715 - 423,75$$

$$P_{carga} = 2292 \text{ Watts}$$

$$T_{carga} = P_{carga} / W_r = 2292 / 1164 \cdot (2\pi/60)$$

$$T_{carga} = 18,8 \text{ Nm (Newtons metro)}$$

Discussão

Neste projeto deixamos os componentes do motor expostos o que permite a visualização da máquina elétrica em funcionamento, permanecendo com condições de funcionamento próximas ao motor real, que serviu de base para montagem deste motor. As alterações no rotor do motor diminuíram seu desempenho, porém ressaltaram pontos capazes de melhorar sua eficiência tais como distância do núcleo e do bobinamento do rotor em relação ao estator como mostrado na figura 9 além de problemas de desbalanceamento causados pela não centralização do rotor no centro do estator. No motor de uso industrial com uma potência equivalente a distância entre o rotor e o estator é menor que 2 mm em nosso projeto deixamos uma distância de 30mm para visualizarmos o interior do motor durante o funcionamento.

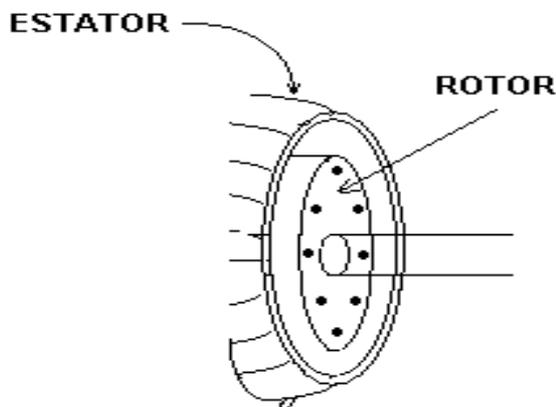


Figura 9. Distância entre o rotor e o estator.

Conclusão

O projeto elucida boa parte das indagações a respeito de motores trifásicos no que tange sua concepção e funcionamento, destacando pontos não explorados rotineiramente pela literatura no tocante a máquinas elétricas e motores de indução.

No trabalho (SIMCG-MIT, UNIVAP, 2008) mostra com detalhes o funcionamento do campo girante em um motor de indução trifásico ficando em aberto os cálculos que mostram que o motor montado tem um torque muito aquém de um motor real e com isso poderia se explorar as variáveis diretamente responsáveis pela eficiência de um motor. Outro ponto que poderia ser explorado seria os resultados obtidos com o motor operando em baixa frequência, o que seria possível, pois o motor no projeto no trabalho por um inversor de frequência.

Acreditamos que este trabalho servirá como material de estudo para cálculo de conjugado da carga, conjugado induzido, potência elétrica de entrada, potência mecânica de saída, rendimento, escorregamento e ensaios com corrente contínua, rotor bloqueado e em vazio. Este projeto será doado a universidade tendo como tutor do projeto o Professor Luiz Roberto Nogueira orientador deste trabalho.

Referências

-A.E. FITZGERALD, C. KINGSLEY JR.; Stephen D. Umans - Máquinas Elétricas – 6ª edição – 2006. Artmaed Editora.

-Motores trifásicos disponíveis em: www.dea.uem.br/disciplinas/eletrotecnica/motorest_rifasicos.pdf. Acesso em 16 Ago. 2011.

-Campo girante disponível em: <http://www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/ET515/node71.html>. Acesso em 15 Ago. 2011.

-Análise Comparativa de Métodos para Cálculo de Eficiência de Motores de Indução em Operação disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/54265851/Artigoanalise-comparativa-de-metodos-para-calculo-de>. Acesso em 16 Set. 2011.

-Inversor de frequência. Disponível em: www.faatensp.edu.br/publicacoes/Inversores_de_Fr equencia.pdf. Acesso em 14 Set. 2011.