

Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente, em Regime Permanente, de uma Máquina de Indução Trifásica a partir dos Ensaios, em Vazio e com o Rotor Bloqueado

João Francisco Ferreira Lucindo, 71324; Hugo Henrique Rodrigues de Oliveira, 71327

ELT 341 - Máquinas Elétricas I

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG

I. INTRODUÇÃO

Uma máquina de indução operando como motor ou como gerador tem uma variação da velocidade do rotor com a carga. Como consequência à frequência do rotor é variável. Entretanto, as perdas rotacionais (perdas no ferro mais as perdas por atrito e ventilação), que são função da velocidade e da frequência e as perdas no cobre do estator e do rotor, que são função da carga, não são constantes. Geralmente, quando a máquina está em vazio as perdas por atrito e ventilação são altas e as perdas no ferro do rotor são baixas. Por outro lado, quando a máquina está com carga nominal as perdas por atrito e ventilação são baixas, enquanto as perdas no ferro do rotor são altas. Já as perdas no ferro do estator são constantes desde a operação em vazio até a carga nominal porque o motor é alimentado na tensão e frequência constantes. Desta forma as perdas rotacionais, para uma alimentação com tensão e frequência constantes, podem ser consideradas constantes. Uma forma de determinar essas perdas (perdas Joule e perdas rotacionais), quando os dados de projeto não estão disponíveis, é através dos ensaios em vazio e com o rotor bloqueado.

II. Objetivo

Pretende-se analisar o desempenho de uma máquina de indução trifásica a partir dos ensaios em vazio e com o rotor bloqueado de forma semelhante ao caso dos transformadores. A finalidade desses ensaios é analisar a performance de uma máquina de indução referente às perdas no cobre e no ferro e a partir daí determinar as várias características de operação, diante

da determinação dos parâmetros elétricos do circuito equivalente.

III. Ensaios

Ensaio a vazio:

O ensaio em vazio é feito alimentando o motor na tensão e frequência nominais, sem carga acoplada no eixo. A partir deste ensaio obtém-se as perdas no ferro e as perdas por atrito e ventilação (perdas mecânicas) e também os parâmetros do ramo de magnetizante. Algumas vezes, este teste em vazio é feito com uma tensão variável, que leva a uma plotagem do gráfico da figura 01. O ponto *a* corresponde à operação na tensão nominal. Pontos experimentais abaixo de *b* não são considerados porque a velocidade do rotor diferencia muito da velocidade síncrona. A extrapolação da curva até o eixo das ordenadas dá uma aproximação razoável das perdas por atrito e por ventilação em velocidades nominais.

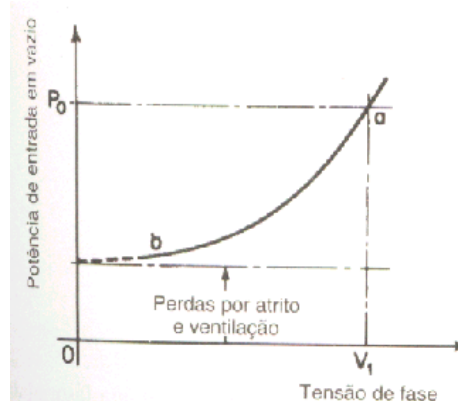


Figura 01 – Gráfico para determinação das perdas mecânicas

Por meio de equipamentos de medição são feitas medidas da tensão (V_0), corrente (I_0) e potência ativa (P_0). Como o motor gira com uma

velocidade próxima à síncrona, o escorregamento é muito baixo, aproximadamente igual a zero. Dessa forma o circuito do rotor fica em aberto e os parâmetros do circuito magnético podem ser determinados, ou seja, X_m e R_m , representativos do fluxo de magnetização e das perdas no ferro, respectivamente, figura 02.

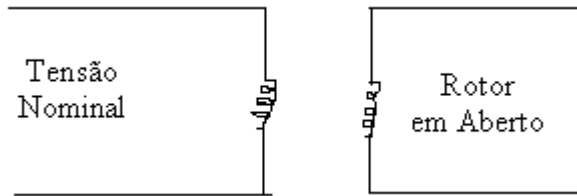


Figura 02 -Teste em Vazio do Motor de Indução Trifásico

Quando o motor está em vazio a potência de entrada representa três perdas: as perdas no cobre do estator, as perdas no ferro do estator, P_{FE} , e as perdas mecânicas, P_{MEC} . Em forma de equações temos:

$$P_o = 3 I_o^2 R_s + P_{FE} + P_{MEC}. \quad (01)$$

Onde,

R_s é a resistência do estator, por fase

A resistência do estator é determinada pela aplicação de uma tensão contínua variável em uma das fases do estator até circular a corrente nominal da bobina, onde a partir das medidas da tensão e da corrente obtém-se R_s . As perdas rotacionais incluem as perdas por atrito e ventilação mais as perdas no ferro do estator devidas às pulsações do fluxo nos dentes do estator, quando o rotor gira. Quando não se tem conhecimentos dessas perdas é admitido que as mesmas assumem valores iguais, portanto, $P_{FE} = P_{MEC}$. Nestas condições a corrente que circula no resistor de perdas no núcleo pode ser então calculada como segue:

$$I_P = \frac{P_{FE}}{3V_o} \quad (02)$$

Substituindo (01) em (02), após retirar P_{FE} da equação 01 obtém-se:

$$R_P = \frac{V_o}{I_P}$$

Para calcular a reatância de magnetização, deve-se primeiramente obter a componente reativa da corrente em vazio, I_ϕ . O ângulo do fator de potência em vazio é dado por:

$$\theta_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{3V_o I_o}$$

Consequentemente, $I_\phi = I_o \sin \theta_o$, daí tem-se:

$$X_m = V_o / I_\phi$$

OBS: R_P pode também ser calculado de forma semelhante a X_m , simplesmente utilizando a componente ativa da corrente I_o .

Ensaio com Rotor Bloqueado

Com o eixo do motor bloqueado (sem movimento), aplica-se uma tensão variável nos terminais do estator até circular a corrente nominal do motor. Com o rotor bloqueado ($S = 1$), a resistência variável (R'_R) fica muito pequena. O circuito do rotor passa a ter uma impedância significativamente menor. Como a tensão é baixa (em torno de 10% da nominal para a maioria dos motores) o ramo magnetizante, correspondente a reatância de magnetização e a resistência representativa das perdas no ferro, são desprezíveis. Não existem perdas rotacionais, pois, o rotor está bloqueado. Por meio de instrumentos de medidas são feitas medições da tensão (V_{RB}), corrente (I_{RB}), e potência ativa (V_{RB}). A potência total na entrada do estator representa as perdas elétricas no cobre, a plena carga referente ao estator e ao rotor. Também a partir desse ensaio são determinados os parâmetros, por fase, do circuito equivalente da máquina, ou seja, resistência do estator, R_s , reatância de dispersão do estator, X_s , resistência do rotor, R'_R , reatância do rotor, X'_{RB} , referidos ao estator.

Para máquinas maiores, operando nas condições nominais o escorregamento é baixo, resultando num baixo valor para a frequência do rotor. Isto causa uma variação bastante apreciável da resistência efetiva do rotor devido ao efeito pelicular, especialmente, para motores acima de 20 HP, de dupla gaiola e de barras profundas. Neste caso é recomendado que o ensaio com rotor bloqueado seja feito com frequência reduzida, da ordem de 25% da frequência nominal. A figura 03 mostra a configuração do ensaio.

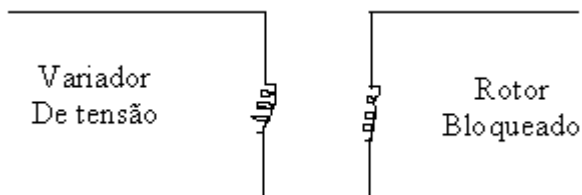


Figura 04 - Ensaio a Rotor Bloqueado do Motor de Indução Trifásico

Do ensaio obtém-se

$$R_{eq} = P_{RB} / (3 \cdot I_{RB}^2)$$

$$Z_{eq} = V_{RB} / \sqrt{3} (I_{RB})$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

$$R'_R = R_{eq} - R_S$$

R_{eq} representa a soma da resistência do estator (R_S) e a resistência do rotor referida ao estator (R'_R)

X_{eq} representa a soma da reatância de dispersão do estator (X_S) e a reatância de dispersão do rotor referida ao estator (X'_R). Normalmente considera $X_S = X'_R$.

OBS: Quando o rotor de um motor de indução está bloqueado uma tensão, cerca de 10% a 25% da nominal é suficiente para atingir a corrente nominal do motor. As perdas no núcleo da máquina são proporcionais ao produto do quadrado da tensão de alimentação pelo quadrado da densidade de fluxo. Nestas condições, a não ser o caso de máquinas que apresentam uma elevada reatância a rotor bloqueado, onde a tensão de alimentação pode chegar a 33% da tensão nominal, as perdas no núcleo podem ser consideradas desprezíveis.

Portanto, a potência de entrada no estator representa a perdas no cobre associadas ao estator e ao rotor.

IV. Material Utilizado

- Duas máquinas de indução trifásicas;
- Dois varivolts 220 V, 20 A;
- Três watímetros monofásicos;
- Dois tacômetros
- 4 multímetros;
- Fios de ligação;

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fez-se todos esses ensaios e os resultados obtidos podem ser organizados na Tabela 1.

Ensaio	Potência(W)	Tensão(V)	Corrente(A)
Vazio	280	220	3.9
Rotor bloqueado	203	71	9
Teste CC	-	12.3	9.09

Com tais valores ensaiados, foi possível calcular os parâmetros do circuito equivalente da máquina.

Sabe-se que:

$$P_{RT} = 70 + 480 = 550 \text{ W}$$

$$P_0 = 470 - 170 = 300 \text{ W.}$$

Aplicando tensão contínua variável em uma das fontes do estator, até que a corrente nominal circule a bobina, tem-se:

$$R_S = \frac{V_{cc}}{I_N}$$

$$R_S = \frac{12}{8.97} = 1.3378 \Omega$$

Admitindo-se que as perdas no ferro e as perdas mecânicas são iguais, tem-se:

$$P_{FE} = \frac{P_0 - 3I_0^2 R_s}{2} = \frac{300 - 3 * 4^2 * 1.3378}{2}$$

$$P_{FE} = 117.89 \text{ W}$$

Logo,

$$I_p = \frac{117.89}{3 * 220} = 0.1786 \text{ A}$$

$$R_p = \frac{220}{0.1786} = 1231.63 \Omega$$

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{P_0}{3V_0 I_0} = \cos^{-1} \frac{300}{3 * 220 * 4} = 83.475^\circ$$

$$I_\varphi = 4 * \sin 83.475^\circ = 3.974 \text{ A}$$

Portanto,

$$X_m = \frac{220}{3.974} = 55.359 \Omega$$

Além disso, do ensaio de rotor bloqueado, tem-se:

$$R_{eq} = \frac{550}{3 * 9^2} = 2.2634 \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{71}{\sqrt{3}} = 40.99 \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{1675.21} = 40.93 \Omega$$

$$R'_R = 2.2634 - 1.3378 = 0.9256 \Omega$$

Portanto, a potência de entrada é dada por:

$$P_e = \sqrt{3} * 220 * 31.8 * 0.8 = 9693.94 \text{ W}$$

E o escorregamento é:

$$s = \frac{1800 - 1690}{1800} = 0.061$$

As perdas no entreferro são:

$$P_g = 3 * \frac{0.9256}{0.061} * 13.21^2 = 7939.107 \text{ W}$$

As perdas no cobre do rotor são:

$$P_{cu2} = 3 * 0.9256 * 13.21^2 = 500 \text{ W}$$

A potência desenvolvida é:

$$P_d = 7.94 - 0.5 = 7.44 \text{ KW}$$

As perdas rotacionais são:

$$P_{rot} = 300 - 3 * 1.3378 * 4^2 = 235.79 \text{ W}$$

A potência de saída é:

$$P_s = 7.44 - 0.236 = 7.21 \text{ KW}$$

O rendimento é:

$$\eta = \frac{7.21}{9.69} * 100 = 74.40 \%$$

E o conjugado desenvolvido é:

$$T_N = T_D = \frac{7440 * 60}{2 * \pi * 1690} = 42.039 \text{ N.m}$$

VI. CONCLUSÃO

Através dos ensaios realizados na prática foi possível aprender a determinar os parâmetros do circuito equivalente de um MIT através de ensaios muito simples.

A grande vantagem da determinação desses parâmetros é a possibilidade da modelagem do mesmo, podendo-se assim fazer diversas simulações e aplicações no controle.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas. 6ª. ed. [S.l.]: [s.n.], v. I.