

Exercício 1 – P1

Os ensaios de um motor de indução trifásico de 460 V, 100 hp, 8 pólos, 60 Hz, estator conectado em Y e rotor em gaiola de esquilo, fornecem os seguintes resultados:

Teste em vazio: 460 V, 60 Hz, 40 A, 4,2 kW;

Teste com rotor bloqueado: 100 V, 60 Hz, 140 A, 8 kW;

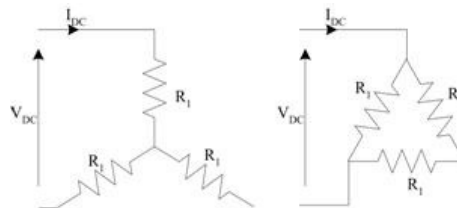
Resistência CC média entre dois terminais do estator: 0,152 Ω ;

(a) Determine os parâmetros do circuito equivalente. (1 ponto)

(b) O motor é conectado a uma fonte trifásica de 460 V, 60 Hz e gira a 873 rpm. Determine a corrente de entrada, o fator de potência, a potência de entrada, a potência no entreferro, a perda no cobre do rotor, a potência mecânica desenvolvida, a potência de saída e o rendimento do motor. (1,5 ponto)

a) Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente - procedimento

- Inicialmente, mede-se a resistência CC do estator, determinando-se o valor de R_1 .



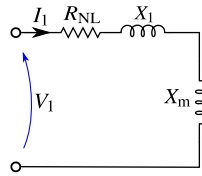
$$R_{1Y} = \frac{1}{2} \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{1}{2} * 0,152 = 0,076 \Omega$$

$$R_{1\Delta} = \frac{3}{2} \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

a) Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente - procedimento

• Teste em vazio

Aplica-se tensão nominal ao estator sem qualquer carga mecânica no rotor e mede-se V_1 , I_1 e P_{NL} . Para a situação em vazio, $n \approx n_s$ ($s \approx 0$). Do circuito equivalente, temos:



$$V_1 = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3}} = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265,6V$$

$$Z_{NL} = \frac{V_1}{I_1} = \|R_{NL} + jX_{NL}\| = \frac{265,6}{40} = 6,64\Omega$$

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_1^2} = \frac{4200}{3 \cdot 40^2} = 0,875\Omega = R_1 + P_{rotacionais}$$

$$X_{NL} = X_1 + X_m = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = \sqrt{6,64^2 - 0,875^2} = 6,58 = X_1 + X_m$$

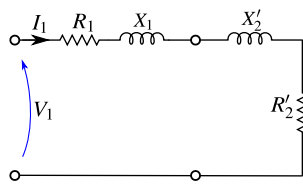
As perdas rotacionais pode ser obtidas por:

$$P_{rot} = P_{NL} - 3I_{NL}^2 R_1 = 4200 - 3 \cdot 0,076 \cdot 40^2 = 3835,2W$$

a) Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente - procedimento

• Teste com rotor bloqueado

Aplica-se tensão reduzida de forma a obter corrente nominal no estator com o rotor bloqueado e mede-se V_1 , I_1 e P_{BL} . Para a situação com rotor bloqueado, $n = 0$ ($s = 1$). Do circuito equivalente (desprezando-se a reatância de magnetização), temos:



$$R_{BL} = \frac{P_{BL}}{3I_1^2} = \frac{8000}{3 \cdot 140^2} = 0,1361\Omega = R_1 + R'_2$$

$$Z_{BL} = \frac{V_1}{I_1} = \|R_{BL} + jX_{BL}\| = \frac{100/\sqrt{3}}{140} = 0,4124\Omega$$

Assim, temos:

$$X_{BL} = \sqrt{Z_{BL}^2 - R_{BL}^2} = 0,3893\Omega = X_1 + X'_2 \quad (50/50\%)$$

$$X_{BL} \frac{f_{nom}}{f_{RB}} \approx X_1 + X'_2$$

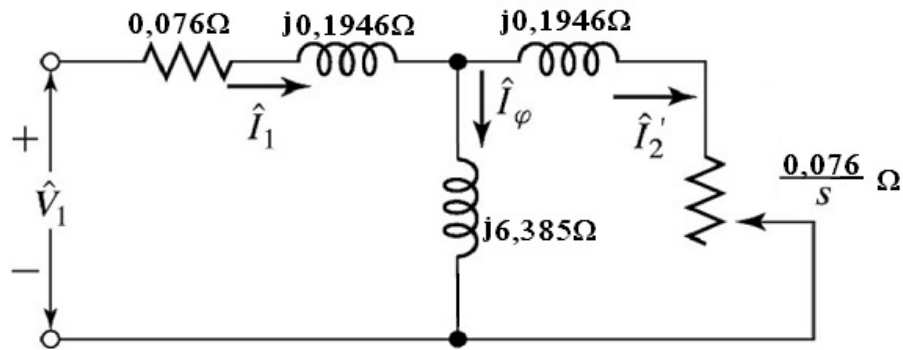
$$R_1 = 0,076\Omega$$

$$R'_2 = 0,0601\Omega$$

$$X_1 = X'_2 = 0,195\Omega$$

$$X_m = 6,385\Omega$$

a) Circuito equivalente



b) Fonte trifásica, 460V, 60Hz, motor gira a 873 rpm → s=0,03 (3%)

$$V_1 = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265,6 \text{ V/fase}$$

$$\text{Para } s = 0,03 \rightarrow Z_1 = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R_2' / s + jX_2)}{R_2' / s + j(X_1 + X_m)}$$

$$Z_1 = 1,8 + j0,9075 \Omega \rightarrow I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = \underline{\underline{131,74 \angle -26,75^\circ \text{ A}}}$$

$$FP = \cos(26,75^\circ) = 0,893$$

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \phi = 93725 \text{ W}$$

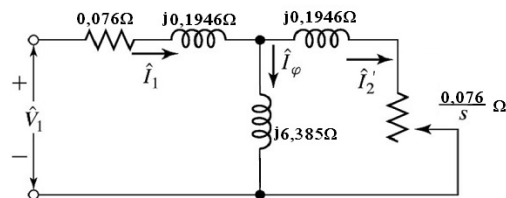
$$P_{gap} = P_1 - 3R_1 I_1^2 = 89468 \text{ W}$$

$$P_{cu,rotor} = sP_{gap} = 2683 \text{ W}$$

$$P_{mec} = (1-s)P_{gap} = 87075 \text{ W}$$

$$P_{out} = P_{mec} - P_{rotacional} = 83240 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_1} = 88,8\%$$



Exercício 2 – P2

2) Uma máquina de indução trifásica de 460 V, 60 Hz, 6 pólos, tem os seguintes parâmetros para o seu circuito equivalente monofásico:

$$R_1 = 0,2 \, \Omega; \quad X_1 = 1,055 \, \Omega;$$

$$R_2' = 0,28 \, \Omega; \quad X_2' = 1,055 \, \Omega;$$

$$X_m = 33,9 \, \Omega;$$

Este motor é conectado a uma fonte trifásica de 460 V, 60 Hz.

- (a) Determine o torque de partida (0,5 ponto)
- (b) Determine o torque máximo e a velocidade para esta condição. (1 ponto)
- (c) Se o motor gira uma carga com $T_L = 180 \, \text{N.m}$, determine a velocidade de operação. Assuma que próximo à velocidade síncrona o torque do motor é proporcional ao escorregamento. Despreze as perdas rotacionais. (1 ponto)

Exercício 2 – (a) Torque de partida?

$$V_{th} = \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} V_1 = 257,56 \angle 0,33^\circ \, \text{V}$$

$$Z_{th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = 0,1881 + j1,0242 \, \Omega$$

$$\text{para } s = 1 \Rightarrow T = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s}$$

$$T = \frac{3}{377/3} \frac{257,56^2}{\left(0,1881 + \frac{0,28}{1}\right)^2 + (1,0242 + 1,055)^2} \frac{0,28}{1}$$

$$T = 97,62 \, \text{N.m}$$

Exercício 2 – (b) Torque máximo e velocidade correspondente?

$$T_{\max} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2}{\left(R_{\text{th}} + \frac{R_2'}{s_{T\max}}\right)^2 + (X_{\text{th}} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s_{T\max}}$$

Torque máximo ocorre para :

$$\frac{R_2'}{s_{T\max}} = \left\| R_{\text{th}} + j(X_{\text{th}} + X_2') \right\| \Rightarrow s_{T\max} = 0,1341 \text{ ou } 13,41\%$$

$$T_{\max} = 347,94 \text{ N.m}$$

$$n_{T\max} = (1 - 0,1341) * 1200 = 1039 \text{ rpm}$$

Exercício 2 – (c) velocidade para carga de 180 N.m? (ps. torque linear)

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2}{\left(R_{\text{th}} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\text{th}} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s} \approx \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2}{R_2'} s = 180 \text{ N.m}$$

$$s = 0,0318 \text{ ou } 3,18\%$$

$$n = (1 - s) * 1200 = 1161,8 \text{ rpm}$$

Exercício 3 – P2

3) Uma máquina de indução trifásica de 250 kW, 460 V, 60Hz, 8 pólos, é impulsionada por uma turbina eólica. Os parâmetros do circuito equivalente são:

$$\begin{aligned}R_1 &= 0,015 \, \Omega; & L_1 &= 0,385 \, \text{mH}; \\R_2' &= 0,035 \, \Omega; & L_2' &= 0,358 \, \text{mH}; \\L_m &= 17,24 \, \text{mH};\end{aligned}$$

Esta máquina de indução é conectada a um sistema elétrico via barra infinita de 460 V, através de um alimentador com resistência de $0,01 \, \Omega$ e indutância de $0,08 \, \text{mH}$. A turbina eólica impulsiona a máquina de indução com escorregamento de $-2,5\%$. Uma caixa de engrenagens é usada para adequar a velocidade da turbina à velocidade do gerador, de forma que para cada giro da turbina o gerador gira 30 vezes.

- (a) Determine a velocidade do gerador e a velocidade da turbina eólica. (0,5 ponto)
- (b) Determine a tensão nos terminais da máquina de indução. (1,0 ponto)
- (c) Determine a potência entregue ao sistema elétrico, bem como o fator de potência na barra infinita. (0,5 ponto)
- (d) Determine a eficiência do sistema (gerador+alimentador). Assuma que as perdas rotacionais e no núcleo são 3 kW. (0,5 ponto)

Exercício 3 – a) Velocidade do gerador e da turbina

$$\text{para } s = -2,5\% \text{ e } n_{\text{sync}} = \frac{120f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{8} = 900 \text{rpm}$$

$$n_{\text{gerador}} = n_{\text{sync}} (1 - s) = 922,5 \text{rpm}$$

$$n_{\text{turbina}} = \frac{n_{\text{gerador}}}{30} = 30,75 \text{rpm}$$

Exercício 3 – b) Tensão nos terminais do gerador

$$V_{\infty} = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265,6 \text{ V/fase}$$

$$\text{Para } s = -0,025 \rightarrow Z_{GI} = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R_2' / s + jX_2')}{R_2' / s + j(X_1 + X_m)}$$

$$Z_{GI} = -1,2713 + j0,5487 \Omega \rightarrow I_1 = \frac{V_{\infty}}{Z_{GI} + Z_{Alimentador}}$$

$$I_1 = \frac{265,6}{-1,2713 + j0,5487 + 0,01 + j0,03} = 191,39 \angle -155,35^\circ \text{ A}$$

$$V_1 = V_{\infty} - Z_{alimentador} * I_1 = 265 \angle -1,3^\circ \text{ V}$$

Exercício 3 – c) Potência entregue ao sistema e fator de potência

$$FP = \cos(-1,3 + 155,35^\circ) = -0,8991 \text{ indutivo}$$

$$P_{\infty} = 3V_1 I_1 \cos \phi = 3 * 265 * 191,39 * (-0,8991)$$

$$P_{\infty} = -136802 \text{ W (injetada na rede)}$$

Exercício 3 – d) eficiência do sistema Gerador+Alimentador

$$P_{\infty} = P_{out} = 138290W$$

$$P_1 = P_{\infty} + 3 * R_{alimentador} * I_1^2 = 139390W$$

$$P_{gap} = P_1 + 3R_1 I_1^2 = 141040W$$

$$P_{cu,rotor} = sP_{gap} = 0,025 * 141040 = 3526W$$

$$P_{mec} = (1 - s)P_{gap} = 1,025 * 141040 = 144566W$$

$$P_{in} = P_{mec} + P_{rotacional} = 144566 + 3000 = 147566W$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{138290}{147566} = 93,71\%$$

Exercício 4 – P2

4) Um motor de indução trifásico tem as seguintes características: 460 V, 200 hp, 60 Hz, 1760 rpm, fator de potência de 0,85 atrasado e rendimento de 90% em carga nominal. Durante partida direta, este motor consome uma corrente 6 vezes maior que a corrente nominal. Um autotransformador é usado para partir a máquina com tensão reduzida. Determine:

- (a) A corrente nominal do motor. (0,5 ponto)
- (b) Qual deve ser a tensão de saída do autotransformador de forma que a corrente de partida seja limitada ao dobro da corrente nominal do motor? (1 ponto)
- (c) Determine a relação entre o torque de partida para o caso (b) e para o caso de partida direta. (1 ponto)

Exercício 4 – a) Corrente Nominal

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{200hp * 746}{P_1} = 0,90 \Rightarrow P_1 = 165780W$$

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \varphi \Rightarrow I_1 = \frac{165780}{3 * 460 / \sqrt{3} * 0,85} = 244,79A$$

Exercício 4 – (b) Autotransformador para limitar a corrente de partida a $2I_{Nominal}$

na partida :

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{460 / \sqrt{3}}{Z} = 6 * 244,79 \Rightarrow Z_{partida} = 0,1808\Omega$$

$V_{autotransformador}$ para que $I_{partida}$ seja $2 * I_{nominal}$:

$$V_{autotransformador} = Z I_{partida} = 0,1808 * (2 * 244,79) = 88,53V$$

$$V_{autotransformador, Linha} = \sqrt{3} * 88,53 = 153,3V$$

Exercício 4 – (c) relação entre os torques de partida nos dois casos

$$T = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2')^2} \frac{R_2'}{s}$$

s = 1 para os dois casos :

$$\frac{T_{\text{autotrafo}}}{T_{\text{direta}}} = \frac{V_{th, \text{autotrafo}}^2}{V_{th, \text{direta}}^2} = \frac{(K * 153,33 / \sqrt{3})^2}{(K * 460 / \sqrt{3})^2} = 0,1111 \text{ ou } 11,11\%$$