Exercício 1 – P2

1) Uma máquina de indução tem as seguintes características: 208 V, 60 Hz, seis pólos, 1140 rpm, estator conectado em Δ, classe B. As seguintes medições foram obtidas nos teste em vazio e de rotor bloqueado:

- Teste em vazio: 208 V; 22,0 A; 1200 W; 60 Hz
- Teste de rotor bloqueado: 24.6 V; 64,5 A; 2200 W; 15 Hz
- Teste CC para determinação da resistência do estator: 13,5 V; 64 A

(a) Apresente o circuito equivalente com os valores dos parâmetros. No cálculo da resistência do rotor, deve-se empregar a metodologia recomendada pelo IEEE, isto é a reatância de magnetização não deve ser desprezada. (1 ponto)

(b) Determina a corrente e o torque de partida (1 ponto)

(c) Determine a corrente e o fator de potência nominal. (1 ponto)

(d) Determine a eficiência da máquina. (1 ponto)

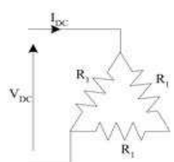
(e) Se fosse possível conectar uma resistência externa ao rotor desta máquina, determine o valor da resistência por fase para que o máximo torque ocorra na partida. (1 ponto)

Relação percentual entre as reatâncias do rotor e do estator

Tipo do Motor	X1	X2
Rotor bobinado	50%	50%
Classe A	40%	60%
Classe B	40%	60%
Classe C	30%	70%
Classe D	50%	50%

Exercício 1 – P2

a) **Solução do teste CC:**



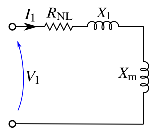
$$R_{1\Delta} = \frac{3}{2}\frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{3}{2}\frac{13{,}5}{64} = 0{,}316\,\Omega$$

$$R_{1Y} = \frac{R_{1\Delta}}{3} = 0{,}105\,\Omega \text{ (resistência do estator por fase)}$$

Deve ficar claro que os parâmetros do circuito equivalente são os mesmos independentemente se os testes foram realizados para a máquina de indução conectada em Δ ou Y.

Exercício 1 – P2

Solução teste em vazio:



As perdas rotacionais para essa condição são:

$$P_{NL} = 1200\text{ W} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{Rot} = P_{NL} - 3R_1I_1^2 = 1200 - 3\times 0{,}105\times 22^2 = \underline{\underline{1047\text{ W}}}$$

$$V_1 = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120{,}1\text{ V/fase} \qquad Z_{NL} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{120{,}1}{22} = 5{,}459\,\Omega$$

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_1^2} = \frac{1200}{3\times 22^2} = 0{,}826\,\Omega$$

$$X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = \sqrt{5{,}459^2 - 0{,}826^2} = 5{,}396\,\Omega\ (= X_1 + X_m)$$

Exercício 1 – P2

Solução teste em rotor bloqueado:

$$R_{BL} = \frac{P_{BL}}{3I_1^2} = \frac{2200}{3\times 64{,}5^2} = 0{,}176\,\Omega$$

$$Z_{BL} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{24{,}6}{64{,}5\sqrt{3}} = 0{,}22\,\Omega \Rightarrow X_{BL,15\,Hz} = \sqrt{Z_{BL}^2 - R_{BL}^2} = \sqrt{0{,}22^2 - 0{,}176^2} = 0{,}132\,\Omega$$

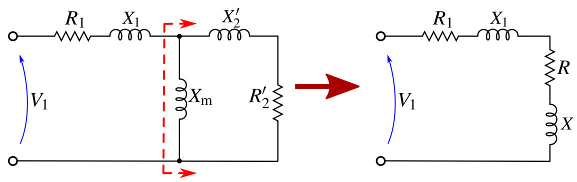
$$\boxed{X_{BL,60\,Hz} = \frac{60}{15}X_{BL,15\,Hz} = 0{,}528\,\Omega}$$

$$\boxed{\begin{aligned} X_1 &= 0{,}4\times X_{BL,60\text{ Hz}} = 0{,}211\,\Omega \\ X_2 &= 0{,}6\times X_{BL,60\text{ Hz}} = 0{,}317\,\Omega \end{aligned}}$$

$$\boxed{X_{NL} = X_1 + X_m \Rightarrow X_m = 5{,}396 - 0{,}211 = 5{,}185\,\Omega}$$

Exercício 1 – P2

Solução teste em rotor bloqueado:



$$R = \frac{X_m^2}{R_2^{'2} + \left(X_2^{'} + X_m\right)^2} R_2^{'} \quad \Rightarrow \quad R \cong \left(\frac{X_m}{X_2^{'} + X_m}\right)^2 R_2^{'} \Rightarrow R_2^{'} \cong \left(\frac{X_2^{'} + X_m}{X_m}\right)^2 R$$

$$\boxed{R = R_{BL} - R_1 = 0{,}176 - 0{,}105 = 0{,}071\,\Omega}$$

$$\boxed{R_2^{'} = \left(\frac{0{,}317 + 5{,}185}{5{,}185}\right)^2 \times 2 = \underline{\underline{0{,}079\,\Omega}}}$$

Exercício 1 – P2

b)

Na partida, temos que:

$$\text{Para } s = 1 \rightarrow Z_1 = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m(R_2 + jX_2)}{R_2 + j(X_2 + X_m)}$$

$$Z_1 = 0{,}1763 + \text{i}0{,}5107\,\Omega \rightarrow I_{1,\text{partida}} = \frac{208/\sqrt{3}}{Z_1} = \underline{\underline{222{,}2\angle\text{-}70{,}9^\circ\ \text{A}}}$$

$$\omega_s = \frac{4\pi \times 60}{6} = 125{,}7\ \text{rad/s} \qquad V_{th} = 115{,}4\ \text{V}$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = 0{,}097 + i0{,}205\ \ \Omega$$

$$I_2^{'} = \left|\frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_2^{'}}\right| = \frac{115{,}4}{\sqrt{(0{,}097 + 0{,}079)^2 + (0{,}205 + 0{,}317)^2}} = 209{,}5\ \text{A}$$

$$T_{m,\text{partida}} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{3}{\omega_s}\frac{R_2^{'} I_2^{'2}}{s} = \frac{3}{125{,}7}\frac{0{,}079 \times 209{,}5^2}{1} = \underline{\underline{83{,}5\ \text{N}\cdot\text{m}}}$$

Exercício 1 – P2

c)

Para condições nominais:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - 1140}{1200} = 0{,}05$$

$$\text{Para } s = 0{,}05 \rightarrow Z_1 = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m\left(R_2/s + jX_2\right)}{R_2/s + j(X_1 + X_m)} = 1{,}412 + \mathrm{i}0{,}888\,\Omega$$

$$I_{1,\text{nominal}} = \frac{V_1}{Z_1} = 72\angle\text{-}32{,}2^{\text{o}}\ \text{A}$$

$$\text{fp} = \cos(\text{-}32{,}2^{\text{o}}) = 0{,}846$$

Exercício 1 – P2

d)

$$P_{\text{entrada}} = 3V_1 I_1 \cos\theta_1 = 3\times 120{,}1\times 72\times 0{,}846 = 21954\ \text{W}$$

$$I_2^{'} = \left|\frac{V_{\text{th}}}{Z_{\text{th}} + Z_2^{'}}\right| = \frac{115{,}4}{\sqrt{\left(0{,}097 + \frac{0{,}079}{0{,}05}\right)^2 + \left(0{,}205 + 0{,}317\right)^2}} = 65{,}2\ \text{A}$$

$$P_{\text{ag}} = \frac{3\times R_2 \times I_2^2}{s} = 20314\ \text{W}$$

$$P_{\text{mec}} = (1\text{-s})\text{P}_{\text{ag}} = 19299\ \text{W}$$

$$P_{\text{saída}} = P_{\text{mec}} - P_{\text{rot}} = 19299 - 1047 = 18252\ \text{W}$$

$$\eta = \frac{18252}{21954} = 83{,}1\%$$

Exercício 1 – P2

e)

$$s_{\mathrm{Tmáx}} = \frac{R_2^{'} + R_{ext}}{\sqrt{R_{\mathrm{th}}^2 + \left(X_{\mathrm{th}} + X_2^{'}\right)^2}} = 1$$

$$R_{ext} = 0{,}451\,\Omega$$

Exercício 2 – P2

1) Um motor de indução tem as seguintes características: 460 V, 110 hp, 4 pólos, 60 Hz, conexão Δ, escorregamento nominal de 5%, eficiência de 92% e fator de potência de 0,87 atrasado. Durante partida direta, este motor desenvolve um torque mecânico de 1,9 vez maior que torque mecânico nominal e consome uma corrente 7,5 vezes maior que a corrente nominal. Este motor deve ser partido com um autotransformador com tensão reduzida. Determine:

(a) Qual deve ser a tensão de saída do autotransformador de forma que o torque de partida seja igual ao torque nominal do motor? (1 ponto)

(b) Qual será o módulo da corrente fornecida pela rede no instante de partida desta máquina considerando o autotransformador projetado no item anterior? (1 ponto)

Exercício 2 – P2

a)

O torque mecânico desenvolvido por fase é dado por:

$$T_{\text{mec}} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{\text{th}}^2}{\left(R_{\text{th}} + \frac{R_2^{'}}{s}\right)^2 + \left(X_{\text{th}} + X_2^{'}\right)^2} \frac{R_2^{'}}{s}$$

Portanto, o torque de partida é proporcional a tensão aplicada:

$$\frac{T_{\text{st2}}}{T_{\text{st1}}} = \frac{V_{\text{th2}}^2}{V_{\text{th1}}^2} = \frac{V_2^2}{V_1^2}$$

Se torque de partida de 1,9×T_{nominal} é desenvolvido para uma tensão de 460 V, então para a situação em que o torque de partida é igual a T_{nominal}, a tensão aplicada deve ser:

$$\frac{1 \times T_{\text{nominal}}}{1{,}9 \times T_{\text{nominal}}} = \frac{V_2^2}{460^2} \Rightarrow V_2 = 333{,}72\text{V}$$

Exercício 2 – P2

b)

A corrente de partida é diretamente proporcional a tensão aplicada. Logo,

$$\frac{I_{\text{st2}}}{I_{\text{st1}}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{334}{460} \Rightarrow I_{\text{st2}} = 0{,}726 \times I_{\text{st1}}$$

Porém, $\text{I}_{\text{st1}} = 7{,}5 \times \text{I}_{\text{nominal}}$:

$$I_{\text{st2}} = 0{,}726 \times 7{,}5 \times \text{I}_{\text{nominal}} = 5{,}445 \times \text{I}_{\text{nominal}}$$

A corrente nominal $\text{I}_{\text{nominal}}$, pode ser encontrada dos dados de fluxo de potência da máquina:

$$P_{IN} = \frac{P_{OUT}}{\eta} = \frac{110 \times 746}{0{,}92} = 89{,}2\text{ kW}$$

$$P_{IN} = \sqrt{3} \times V_{L1} \times I_{\text{nominal}} \times \text{fp} \Rightarrow I_{\text{nominal}} = \frac{89200}{\sqrt{3} \times 460 \times 0{,}87} = 128{,}7\text{ A}$$

Logo, a corrente de partida da máquina de indução é:

$$I_{\text{st2}} = 5{,}445 \times \text{I}_{\text{nominal}} = 5{,}445 \times 128{,}7 = 700{,}7\text{ A}$$

A corrente I_{st2} é a corrente na saída do autotransformador. Para obter a corrente na entrada, basta considerar a relação de espiras do autotrafo:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{460}{334} = 1{,}377 \quad \Rightarrow \quad I_{\text{linha}} = \frac{\text{I}_{\text{st2}}}{1{,}377} = \frac{700{,}7}{1{,}377} = 508{,}9\text{ A}$$

Exercício 3 – P2

3) A curva de magnetização de uma máquina de indução de 3 hp, 220 V, 60Hz, quatro pólos e estator em delta é obtida ao se acionar o seu eixo na velocidade síncrona, por uma fonte mecânica externa, e no mesmo sentido do campo girante estabelecido pela fonte trifásica de 60Hz que alimenta o estator. Ao se variar, gradualmente, a magnitude da tensão aplicada, obteve-se os correspondentes valores da corrente de linha, dados na seguinte tabela:

Vs (V)	20	50	80	110	142	160	180	200	220	240
Is (A)	0,30	0,65	1,040	1,44	1,96	2,31	2,86	3,50	4,53	5,24

Se a máquina funciona no modo gerador, acionada na velocidade de 1.800 rot/min, determine o valor aproximado da capacitância de um banco de capacitor conectado em delta nos terminais de fase, para que se gere em vazio a tensão terminal nominal. (Dica: despreze a impedância do estator). (1 ponto)

Exercício 3 – P2

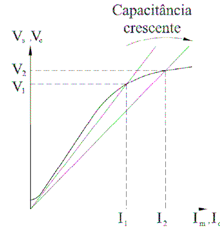
Inicialmente calcula-se o valor da reatância de magnetização do circuito equivalente estrela, quando a tensão de terminal é 220 V:

$$X_m = \frac{220/\sqrt{3}}{4,53} = 28,04\ \Omega$$

Para a condição de auto-excitação:

$$X_{CY} = X_m$$

$$X_{C\Delta} = 3 \times X_{CY} = \frac{1}{\omega \times C_\Delta} \Rightarrow C_\Delta = \frac{1}{3 \times 377 \times 28,04} = 31,5\,\mu F$$



(a) Tensão de terminal a vazio

Exercício 4 – P2

4) Uma máquina de indução trifásica tem as seguintes características: 280 V, 60 Hz, 20 hp, 4 pólos. Esta máquina será alimentada em 50 Hz. Qual valo de tensão que deve ser empregada para que a máquina opere de forma adequada? Justifique. (1 ponto)

$$\boxed{\frac{V^{60}}{V^{50}} = \frac{60}{50} \Rightarrow V^{50} = \frac{280 \times 50}{60} = 233{,}33\ \mathrm{V}}$$

Justificativa:

Para f = 50 Hz, as resistências permanecem inalteradas, porém as reatância serão reduzidas de um fator igual 50/60 do valor original. Nesse caso, para que a corrente não se eleve, evitando-se a saturação da máquina ou mesmo danificando os enrolamentos, a tensão deve ser reduzida.