

Exercício 1 – P3

1) Uma máquina síncrona trifásica tem as seguintes características: 1 MVA, 2300 V, 60 Hz, reatância síncrona saturada de 1,25 W em tensão nominal, resistência de armadura desprezível e eficiência de 0,95 em velocidade nominal. A máquina é conectada a uma barra infinita.

- (a) Determine a tensão de excitação e o ângulo de potência quando a máquina opera como motor síncrono com fator de potência 0,85 indutivo e fornecendo 500 hp. (1,0 ponto)
- (b) A corrente de campo é reduzida em 40% mas mantendo a mesma potência de saída. Determine a corrente do estator e o fator de potência nessas condições (1,0 pont)
- (c) A máquina perderá o sincronismo nas condições de operação do item (b)? Justifique. (1,0 ponto)

Exercício 1 – P3 (Ex. 6.16 Sen)

a) $P_{\text{out}} = 500 * 746 = 373 \text{ kW}$

$$P_{\text{in}} = \frac{373000}{0.95} = 392.6 \text{ kW}$$
$$P_{\text{in}} = \sqrt{3} V_t I_a \cos \phi \Rightarrow I_a = \frac{392600}{\sqrt{3} * 2300 * 0.85} = 115.9 \text{ A}$$
$$\cos \phi = 0.85 \Rightarrow \phi = 31.8^\circ$$
$$E_f = V_t - jX_s * I_a = \frac{2300}{\sqrt{3}} - j1.25 * (115.9 \angle -31.8^\circ) = 1257 \angle -5.6^\circ \text{ V}$$

Em pu:

$$Z_{\text{base}} = \frac{2300^2}{1 \times 10^6} = 5.29 \Omega$$
$$X_s = \frac{1.25}{5.29} = 0.236 \text{ pu}$$
$$P_{\text{in}} = \frac{392600}{1 \times 10^6} = 0.393 \text{ pu}$$
$$P_{\text{in}} = V_t I_a \cos \phi \Rightarrow I_a = \frac{0.393}{1 * 0.85} = 0.462 \text{ pu}$$
$$\cos \phi = 0.85 \Rightarrow \phi = 31.8^\circ$$
$$E_f = V_t - jX_s * I_a = 1 - j0.236 * (0.462 \angle -31.8^\circ) = 0.947 \angle -5.6^\circ \text{ pu}$$

Exercício 1 – P3

b) $|E_f'| = 0.6 * |E_f| = 0.6 * 1257 = 754.2 \text{ V}$

$$P = \frac{3 * E_f' * V_t}{X_s} \sin \delta = \frac{500 * 746}{0.95} = 392600 \text{ W} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \delta = \sin^{-1} \left(\frac{392600 * 1.25}{3 * 754.2 * \frac{2300}{\sqrt{3}}} \right) = 9.40^\circ$$

$$I_a = \frac{V_t - E_f'}{j * X_s} = \frac{2300 / \sqrt{3} - (754.2 \angle -9.40^\circ)}{j * 1.25} = 477.3 \angle -78.08^\circ \text{ A}$$

Em pu,

$$|E_f'| = 0.6 * |E_f| = 0.6 * 1257 = 754.2 \text{ V} \Rightarrow |E_f'| = \frac{754.2}{2300 / \sqrt{3}} = 0.568 \text{ pu}$$

$$P = \frac{E_f' * V_t}{X_s} \sin \delta \Rightarrow 0.393 = \frac{0.568 * 1}{0.236} \sin \delta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \delta = \sin^{-1} \left(\frac{0.393 * 0.236}{0.568} \right) = 9.40^\circ$$

$$I_a = \frac{V_t - E_f'}{j * X_s} = \frac{1 - (0.568 \angle -9.40^\circ)}{j * 0.236} = 1.903 \angle -78.08^\circ \text{ pu}$$

c) Não há perda de sincronismo, pois o ângulo de potência é menor que 90° .

Exercício 2 – P3

2) Uma máquina síncrona trifásica de pólos salientes tem as seguintes características: $X_d = 1.2 \text{ pu}$, $X_q = 0.6 \text{ pu}$ e resistência de armadura desprezível.

(a) A máquina opera como motor consumindo 0.8 pu de potência ativa e fator de potência de 0.8 capacitivo.

(i) Determine o ângulo de potência e a tensão de excitação em pu e desenhe o diagrama fasorial (1 ponto)

(ii) Determine a potência ativa devido à excitação e devido à saliência da máquina (1 ponto)

(b) A máquina agora opera como um gerador fornecendo 0.8 pu de potência ativa com fator de potência 0.8 indutivo. Determine a tensão de excitação em pu e o ângulo de potência (1 ponto)

Exercício 2 – P3

a.i)

$$= \phi$$

$$\cos \phi = 0.8 \Rightarrow \phi = 36,8^\circ$$

$$\sin \phi = 0,6$$

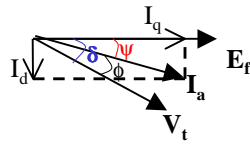
$$P_{in} = V_t * I_a * \cos \phi \Rightarrow I_a = \frac{0,8}{1 * 0,8} = 1 \text{ pu}$$

$$\tan \delta = \frac{I_a X_q \cos \phi}{V_t + I_a X_q \sin \phi} = \frac{1 * 0,6 * 0,8}{1 + 1 * 0,6 * 0,6} = 19,44^\circ$$

$$\begin{aligned} E_f &= V_t \cos \delta + X_d I_d = V_t \cos \delta + X_d I_a \sin(\phi + \delta) = \\ &= 1 * \cos(19,44^\circ) + 1,2 * 1 * \sin(36,8^\circ + 19,44^\circ) = 1,94 \text{ pu} \end{aligned}$$

Exercício 2 – P3

b)



$$\psi = \delta - \phi$$

$$\cos \phi = 0,8 \Rightarrow \phi = 36,8^\circ$$

$$\sin \phi = 0,6$$

$$P_{in} = V_t * I_a * \cos \phi \Rightarrow I_a = \frac{0,8}{1 * 0,8} = 1 \text{ pu}$$

$$\tan \delta = \frac{I_a X_q \cos \phi}{V_t - I_a X_q \sin \phi} = \frac{1 * 0,6 * 0,8}{1 - 1 * 0,6 * 0,6} = 36,8^\circ$$

$$E_f = V_t \cos \delta + X_d I_d = V_t \cos \delta + X_d I_a \sin(\phi - \delta) = 1 * \cos(36,8^\circ) + 1,2 * 1 * \sin(0^\circ) = 0,8 \text{ pu}$$

Exercício 3 – P3

Os seguintes dados foram obtidos a partir do ensaio de um motor de indução monofásico de 1/4hp, 120V, 60Hz, 1730 rpm:

- Resistência do estator: 2,9 Ω
- Teste com rotor bloqueado: 43V, 5A, 140W
- Teste em vazio: 120V, 3,5A, 125W

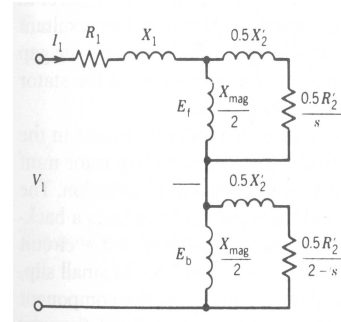
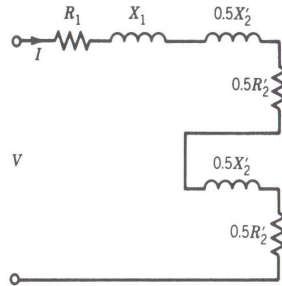
a) obtenha os parâmetros do circuito equivalente

b) determine as perdas rotacionais

Exercício 3 – P3 – ensaio com rotor bloqueado (s=1)

Teste com rotor bloqueado: 43V, 5A, 140W

$$j 0,5 X_2' + 0,5 R_2' \ll 0,5 X_{mag}$$



$$R_1 = 2,9 \Omega$$

$$P_{BL} = 5^2 (2,9 + R_2') = 140 W \Rightarrow R_2' = 2,7 \Omega$$

$$Z_{BL} = 43 / 5 = 8,6 \Omega$$

$$8,6^2 = (2,9 + 2,7)^2 + (X_1 + X_2')^2 \Rightarrow X_1 + X_2' = 6,53 \Omega$$

$$X_1 = X_2' = 6,53 / 2 = 3,26 \Omega$$

Exercício 3 – P3 – ensaio em vazio (s ≈ 0)

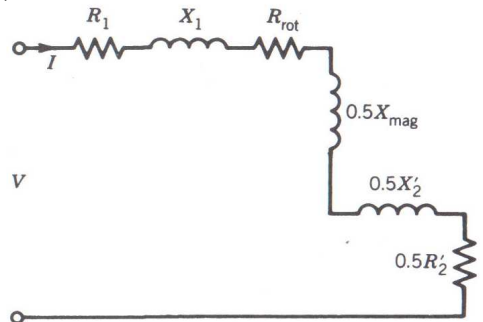
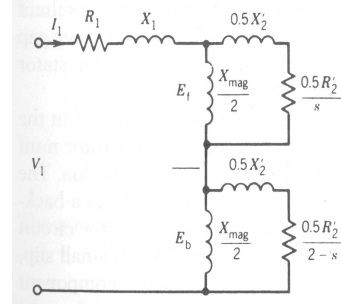
Teste em vazio: 120V, 3,5A, 125W

$$j 0,5 X_2' + 0,5 \frac{R_2'}{s} \gg 0,5 X_{mag}$$

$$j 0,5 X_2' + 0,5 \frac{R_2'}{2-s} \ll 0,5 X_{mag}$$

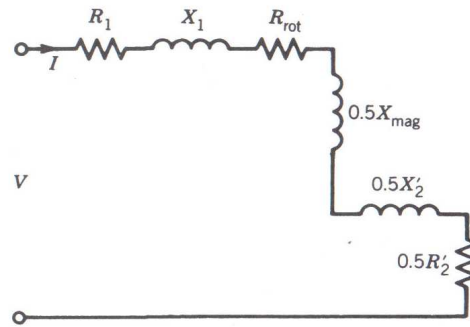
$$\frac{0,5 R_2'}{2-s} = 0,5 R_2' + 0,5 R_2' \left(\frac{1 - (2-s)}{2-s} \right)$$

$$= P_{cu, b} + P_{mec, b}$$



Exercício 3 – P3– ensaio em vazio ($s \cong 0$)

Teste em vazio: 120V, 3,5A, 125W

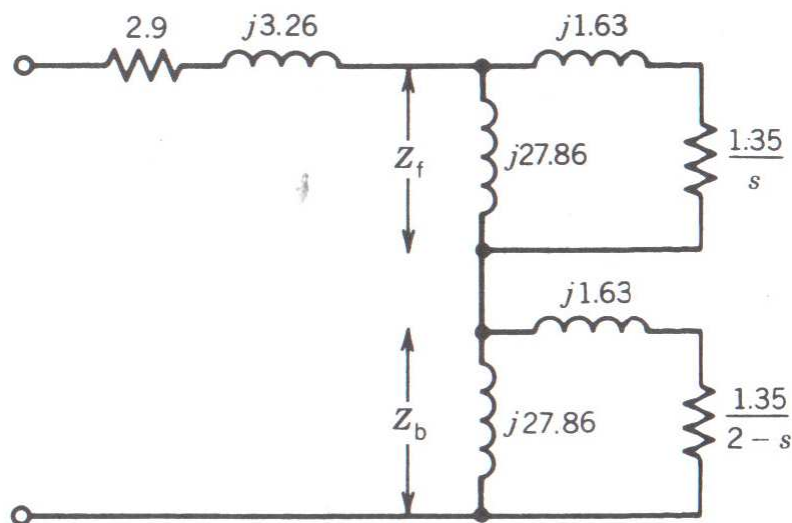


$$P_{NL} = 3,5^2(2,9 + 0,5R'_2 + R_{rot}) = 3,5^2 R_{NL} = 140W \Rightarrow R_{NL} = 10,2\Omega$$

$$Z_{NL} = 120 / 3,5 = 34,3\Omega$$

$$34,3^2 = 10,2^2 + (0,5X_{mag} + X_1 + 0,5X'_2)^2 \Rightarrow X_{mag} = 55,72\Omega$$

Exercício 3 – P3– Circuito equivalente



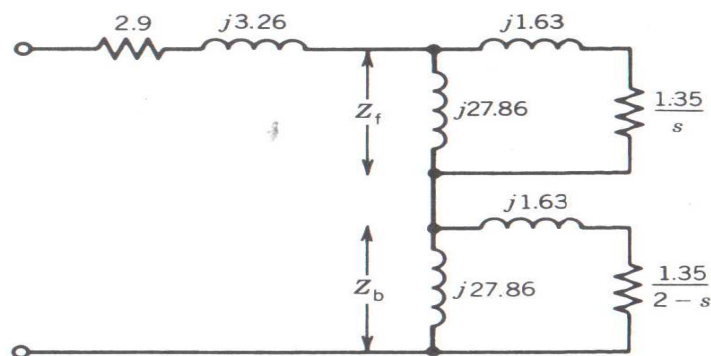
Exercício 3 – P3– b) perdas rotacionais

$$P_{NL} = 3,5^2(2,9 + 0,5R_2') + P_{rot} = 140W$$

$$P_{rot} = 72,94W$$

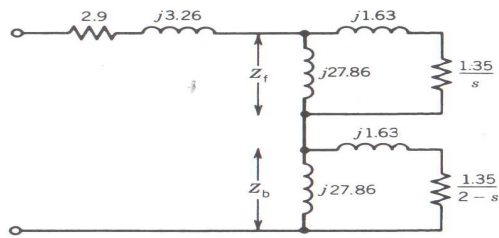
Exercício 3 – P3

Considerando o motor do exemplo 7.1, determine a corrente de entrada, a potência, o fator de potência, o torque desenvolvido, a potência de saída, o rendimento do motor, a potência no gap, e a perda no cobre do rotor, se o motor gira a velocidade nominal e está conectado a uma fonte de 120V: dados de placa: 1/4hp, 120V, 60Hz, 1730 rpm;



Exercício 3 – P3 - escorregamento

$n=1730$ rpm; $n_{syn}=1800$ rpm



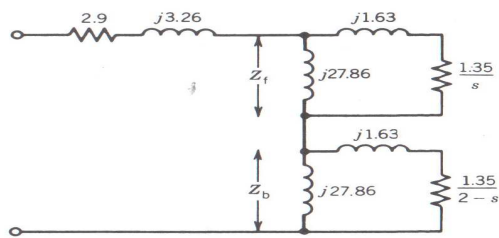
$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} = \frac{1800 - 1730}{1800} = 0,039 = 3,9\%$$

$$Z_f = R_f + jX_f = 13 + j16,79\Omega$$

$$Z_b = R_b + jX_b = 0,61 + j1,55\Omega$$

$$Z_{total} = Z_1 + Z_f + Z_b = 16,51 + j21,6 = 27,19\angle 52,61^\circ \Omega$$

Exercício 3 – P3– Corrente no estator, fator de potência e potência



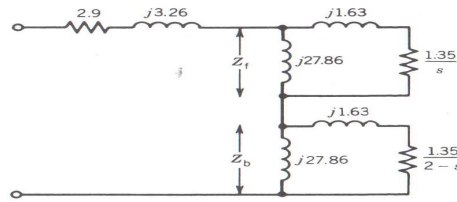
$$I_1 = V_1 / Z_{total} = 120 / 27,19\angle 52,61^\circ = 4,41\angle -52,61^\circ A$$

$$f.p. = \cos 52,61 = 0,61 \text{ indutivo}$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi = 120 * 4,41 * 0,61 = 322,81W$$

Exercício 3 – P3– Torque, Potência mecânica e rendimento

$$n_{syn}=1800 \text{ rpm} \rightarrow 188,5 \text{ rad/s}$$



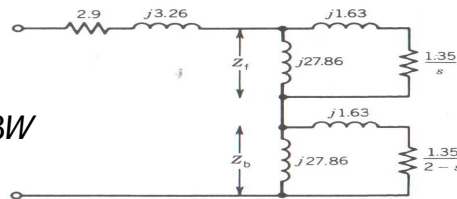
$$T = \frac{I_1^2}{\omega_{syn}} (R_f - R_b) = \frac{4,41^2}{188,5} (13 - 0,61) = 1,28 \text{ N.m}$$

$$P_{mec} = T \omega_{syn} (1 - s) = 231,87 \text{ W}$$

$$P_{out} = P_{mec} - P_{rot} = 231,87 - 72,94 = 158,93 \text{ W} = 0,213 \text{ hp}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{158,93}{322,81} = 49,23\%$$

Exercício 3 – P3– Potência no gap devido aos campos direto e reverso, e perdas no cobre do rotor



$$P_{gf} = I_1^2 R_f = 4,41^2 * 13 = 252,83 \text{ W}$$

$$P_{gb} = I_1^2 R_b = 4,41^2 * 0,61 = 11,86 \text{ W}$$

$$P_g = P_{gf} + P_{gb} = 264,69 \text{ W}$$

$$P_{cu,2} = sP_{gf} + (2 - s)P_{gb} = 0,039 * 252,83 + (2 - 0,039) * 11,86 \\ = 9,86 + 23,23 = 33,12 \text{ W} \Rightarrow 10,25\% \text{ de } P_1$$

$$P_{cu,1} = I_1^2 R_1 = 4,41^2 * 2,9 = 56,4 \text{ W} \Rightarrow 17,47\% \text{ de } P_1$$

$$P_{rot} = 72,94 \text{ W} \Rightarrow 22,59\% \text{ de } P_1$$