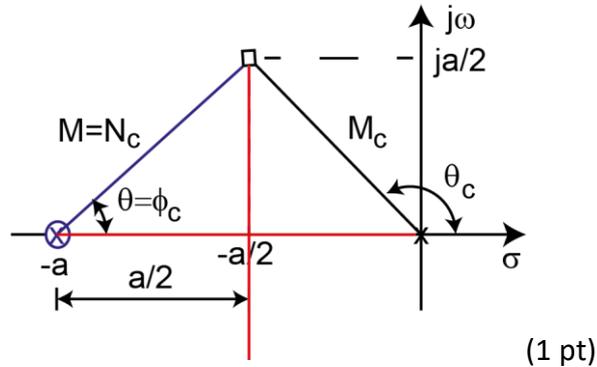


Gabarito Questão 1 - Controle

a)



(1 pt)

Condição de ângulo:

$$\phi_c - \theta_c - 2\theta = -(2n + 1)180^\circ, n = 0, 1, 2, \dots \text{ (1 pt)}$$

Condição de módulo:

$$\frac{k_p k N_c}{M^2 M_c} = 1 \text{ (1 pt)}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a/2}{a/2} = 45^\circ \text{ (0,5 pts)}$$

$$\theta_c = 180 - \tan^{-1} \frac{a/2}{a/2} = 135^\circ \text{ (0,5 pts)}$$

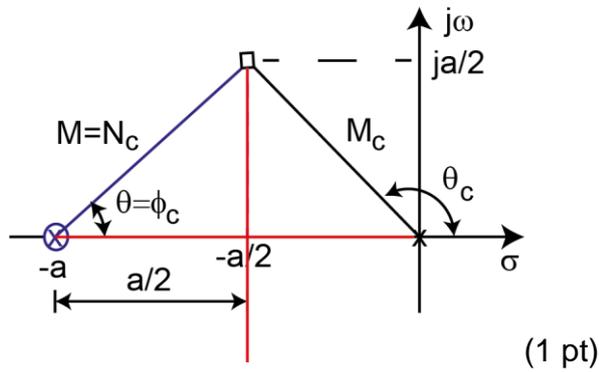
$$\phi_c = -180^\circ + \theta_c + 2\theta = -180^\circ + 135^\circ + 2 \cdot 45^\circ = 45^\circ \text{ (0,5 pts)}$$

$$-\frac{1}{T_i} = -a \rightarrow T_i = \frac{1}{a} \text{ (1 pt)}$$

$$M = M_c = N_c = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{2a^2}{4}} = \sqrt{\frac{a^2}{2}} \text{ (0,5 pts)}$$

$$\frac{k_p k N_c}{M^2 M_c} = 1 \rightarrow k_p = \frac{M^2 M_c}{k N_c} = \frac{M^3}{k M} = \frac{M^2}{k} = \frac{a^2}{2k} \text{ (1 pt)}$$

a)



Condição de ângulo:

$$\phi_c - \theta_c - 2\theta = -(2n + 1)180^\circ, n = 0, 1, 2, \dots \text{ (1 pt)}$$

Condição de módulo:

$$\frac{k_p k N_c}{M^2 M_c} = 1 \text{ (1 pt)}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a/2}{a/2} = 35^\circ \text{ (0,5 pts)}$$

$$\theta_c = 180 - \tan^{-1} \frac{a/2}{a/2} = 135^\circ \text{ (0,5 pts)}$$

$$\phi_c = -180^\circ + \theta_c + 2\theta = -180^\circ + 135^\circ + 2 \cdot 45^\circ = 45^\circ \text{ (0,5 pts)}$$

$$-\frac{1}{T_i} = -a \rightarrow T_i = \frac{1}{a} \text{ (1 pt)}$$

$$M = M_c = N_c = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{2a^2}{4}} = \sqrt{\frac{a^2}{2}} \text{ (0,5 pts)}$$

$$\frac{k_p k N_c}{M^2 M_c} = 1 \rightarrow k_p = \frac{M^2 M_c}{k N_c} = \frac{M^3}{k M} = \frac{M^2}{k} = \frac{a^2}{2k} \text{ (1 pt)}$$

b)

Considerando $R(s)=0$ e $N(s)=0$:

$$E(s) = -Y(s) = -G(s)[U(s) + D(s)] = -G(s)[C(s)E(s) + D(s)]$$

$$\rightarrow E(s)[1 + G(s)C(s)] = -G(s)D(s) \rightarrow E(s) = -\frac{G(s)}{1+C(s)G(s)}D(s) \text{ (1 pt)}$$

Para $D(s) = \frac{1}{s}$,

$$E(s) = -\frac{\frac{k}{(s+a)^2}}{1+k_p\frac{\frac{1}{s}k}{(s+a)^2}}\frac{1}{s} = -\frac{ks}{s(s+a)^2+k_pk\left(s+\frac{1}{T_i}\right)s}\frac{1}{s} \text{ (1 pt)}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s\frac{-ks}{s(s+a)^2+k_pk\left(s+\frac{1}{T_i}\right)s}\frac{1}{s} = 0 \text{ (1 pt)}$$

Referências Bibliográficas:

Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. 5ª edição, São Paulo: Pearson Education do Brasil,2010.

Gabarito Questão 2 - Controle

a)

$$e_{ss} = \frac{1}{k_v} = 0,1 \rightarrow k_v = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ (0,5 pts)}$$

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s C(s)G(s) = k_c \beta 2 = 10 \rightarrow k = k_c \beta = \frac{10}{2} = 5 \text{ (0,5 pts)}$$

b)

$$\text{Margem de ganho: } K_g = -|G_1(j\omega_{180})| = -3,15 \text{ (1 pt)}$$

$$\text{Margem de fase: } \gamma = 180^\circ + \angle G_1(j\omega_g) = 180^\circ - 189^\circ = -9^\circ \text{ (1 pt)}$$

O sistema em malha-fechada é instável porque $K_g < 0$ e $\gamma < 0$. (1 pt)

c)

$$\angle G_1(j\omega_g) = -180^\circ + 40^\circ + 5^\circ = -135^\circ \rightarrow \omega_g = 1,22 \text{ (1 pt)}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\omega_g}{10} \rightarrow T = \frac{10}{\omega_g} = \frac{10}{1,22} \text{ (1 pt)}$$

$$|G_1(j\omega_g)| + 20 \log \frac{1}{\beta} = 0 \rightarrow \beta = 10^{|G_1(j\omega_g)|/20} = 10^{\frac{16,6}{20}} = 6,76 \text{ (1 pt)}$$

$$k_c \beta = 5 \rightarrow k_c = \frac{5}{\beta} = \frac{5}{6,76} \text{ (1 pt)}$$

d)

Vantagem: resposta transitória mais rápida (menor tempo de subida, menor tempo de pico) devido a maior frequência de cruzamento de ganho. (1 pt)

Desvantagens: maior ganho ou menor atenuação de ruídos de medição devido a faixa de passagem maior. (1 pt)

Referências Bibliográficas:

Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. 5ª edição, São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

Gabarito Questão 3 - Controle

a)

$$M_c = \begin{bmatrix} 0 & ab \\ b & -ab \end{bmatrix} \text{ (1 pt)}$$

$$|M_c| = -ab^2 \neq 0 \rightarrow \text{sistema é totalmente controlável. (1 pt)}$$

$$M_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -a & a \end{bmatrix} \text{ (1 pt)}$$

$$|M_o| = a \neq 0 \rightarrow \text{sistema é totalmente observável. (1 pt)}$$

b)

Opção de solução 1:

$$Q_o = |\lambda I - A| = \lambda^2 + 2a\lambda + a^2 \text{ (1pt) (1 pt)}$$

$$Q_f = (\lambda + 2a)(\lambda + 5a) = \lambda^2 + 7a\lambda + 10a^2 \text{ (1 pt)}$$

$$k_c = [10a^2 - a^2 \quad 7a - 2a] = [9a^2 \quad 5a] \text{ (1 pt)}$$

$$M_c^{-1} = \frac{1}{-ab^2} \begin{bmatrix} -ab & -ab \\ -b & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{b} & \frac{1}{b} \\ \frac{1}{ab} & 0 \end{bmatrix} \text{ (0,5 pts)}$$

$$q_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{ab} & 0 \end{bmatrix} \text{ (0,5 pts)}$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_1 A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{ab} & 0 \\ -\frac{1}{b} & \frac{1}{b} \end{bmatrix} \text{ (1 pt)}$$

$$k = k_c T^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{9a}{b} - \frac{5a}{b} & \frac{5a}{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4a}{b} & \frac{5a}{b} \end{bmatrix} \text{ (1pt)}$$

Opção de solução 2:

$$A_f = A - Bk = \begin{bmatrix} -a & a \\ 0 & -a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} [k_1 \quad k_2] = \begin{bmatrix} -a & a \\ -bk_1 & -a - bk_2 \end{bmatrix} \text{ (2 pts)}$$

$$|\lambda I - A_f| = \begin{vmatrix} \lambda + a & -a \\ bk_1 & \lambda + a + bk_2 \end{vmatrix} = \lambda^2 + (2a + bk_2)\lambda + a^2 + abk_1 + abk_2 \text{ (1 pt)}$$

$$Q_f = (\lambda + 2a)(\lambda + 5a) = \lambda^2 + 7a\lambda + 10a^2 \text{ (1 pt)}$$

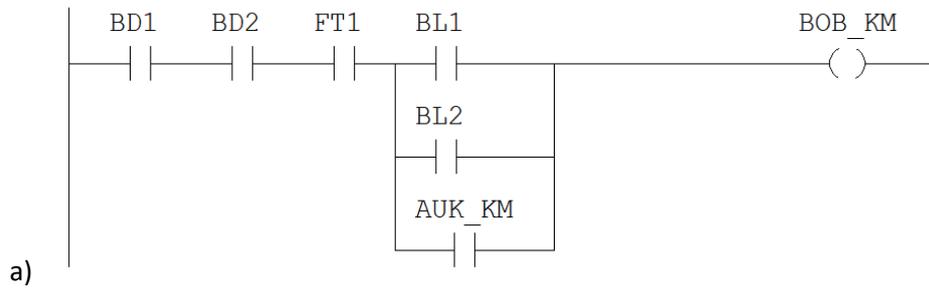
$$2a + bk_2 = 7a \rightarrow k_2 = \frac{7a-2a}{b} = \frac{5a}{b} \text{ (1 pt)}$$

$$a^2 + abk_1 + abk_2 = 10a^2 \rightarrow k_1 = \frac{10a^2 - a^2 - abk_2}{ab} = \frac{10a^2 - a^2 - 5a^2}{ab} = \frac{4a}{b} \text{ (1 pt)}$$

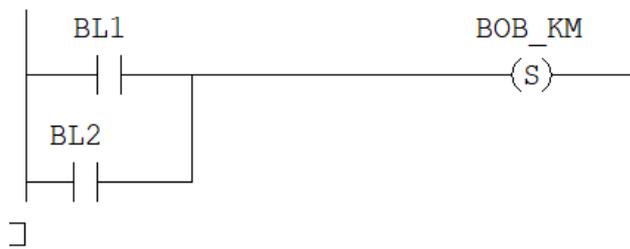
Referências Bibliográficas:

Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. 5ª edição, São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

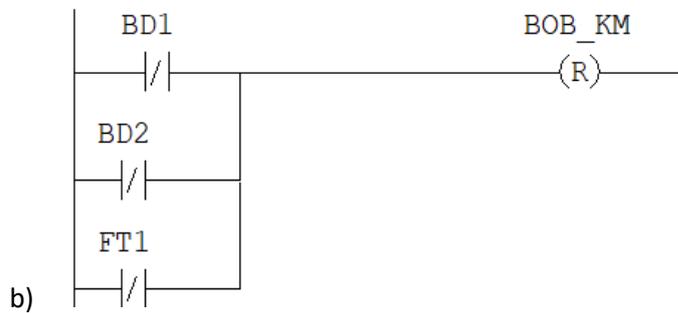
Gabarito Questão 4 Automação



0001



0002



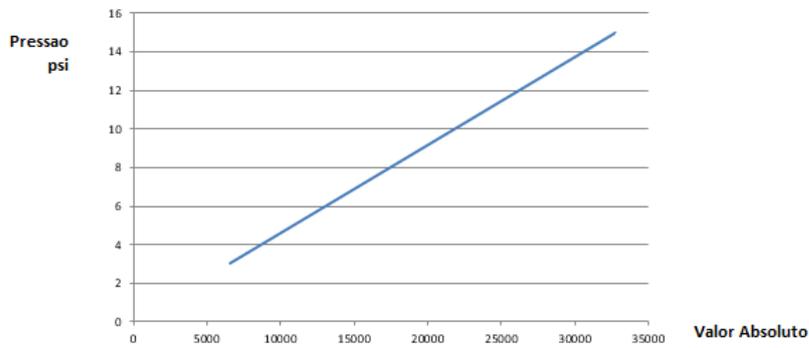
Referências Bibliográficas:

- Bryan, L. A.; BRYAN, E. A. Programmable Controllers: Theory and Implementation. Atlanta, USA: Industrial Text Company Publication, 1997. Pag 295.
- Franchi, Claiton Moro, CAMARGO, Valter Luís Arlindo de. Controladores Lógicos Programáveis - Sistemas Discretos e Analógicos. 3º ed. São Paulo, Érica, 2020. Pag. 128.

Gabarito Questão 5 - Automação

a)

Gráfico:



Cálculos:

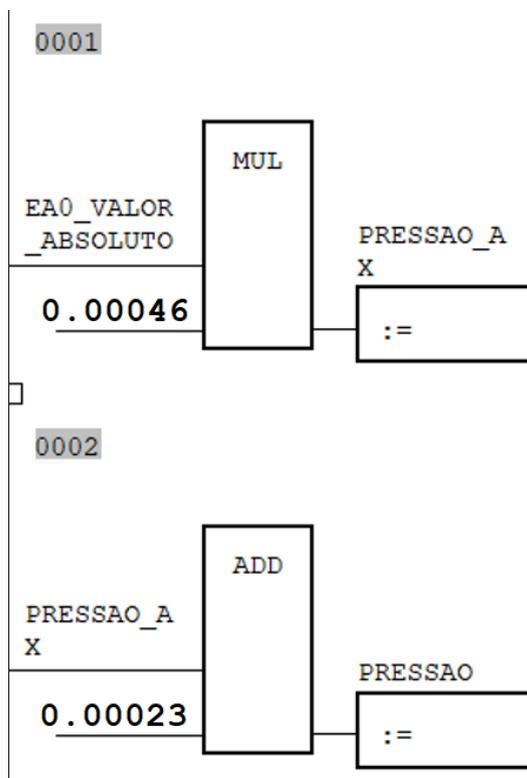
Eixo Y	3	a	15	psi
--------	---	---	----	-----

Eixo X	6553	a	32767	Valor Absoluto
--------	------	---	-------	----------------

1) Coef. Inclinação (A) $A = \frac{15,00 - 3,00}{32767 - 6553} = \frac{12}{26214} = 0,0004578$

2) Offset (B) $B = 3,00 - 0,00046 \times 6553 = 0,0002289$

Em Ladder:



b)

Gráfico:

Cálculos:

Eixo Y	0	a	100	%
Eixo X	3	a	15	PRESSÃO (psi)

1) Coef. Inclinação (A) $A = \frac{100,00 - 0,00}{15 - 3} = \frac{100}{12} = 8,3333333$

2) Offset (B) $B = 0,00 - 8,33333 \times 3 = -25$

Gráfico:

Cálculos:

Eixo X	0	a	100	%
Eixo Y	204	a	1023	Valor Absoluto

1) Coef. Inclinação (A) $A = \frac{1023,00 - 204,00}{100 - 0} = \frac{819}{100} = 8,19$

2) Offset (B) $B = 204,00 - 8,19 \times 0,00 = 204$

Em Ladder IEC 1131-3:

0001

0002

0003

0004

Referências Bibliográficas:

- Bryan, L. A.; BRYAN, E. A. Programmable Controllers: Theory and Implementation. Atlanta, USA: Industrial Text Company Publication, 1997. Pag 189 a 196 e 201 a 207.

Gabarito Questão 6 Automação

a) Quanto aos aspectos construtivos:

- O Cabo de Interligação deve ter pelo menos duas vias isoladas.
- O Cabo de Interligação deve ser do tipo par trançado.
- O Cabo de Interligação deve ser do tipo Cabo blindado.

b) Quanto aos aspectos de ligação:

- O Cabo de Interligação deve ter as suas duas vias ligadas, de forma isolada e polarizada, nos terminais (+) e (-) do transmissor e nos terminais (+) e (-) da Entrada Analógica, respectivamente.
- O Cabo de Interligação deve ter a sua malha de blindagem aterrada.
- O Cabo de Interligação deve ter a sua malha de blindagem aterrada em apenas um dos lados, do lado do cartão de entrada analógica.

Referências Bibliográficas:

- Bryan, L. A.; BRYAN, E. A. Programmable Controllers: Theory and Implementation. Atlanta, USA: Industrial Text Company Publication, 1997. Pag 200, fig. 7-15 .

Gabarito Questão 7 – Máquinas Elétricas

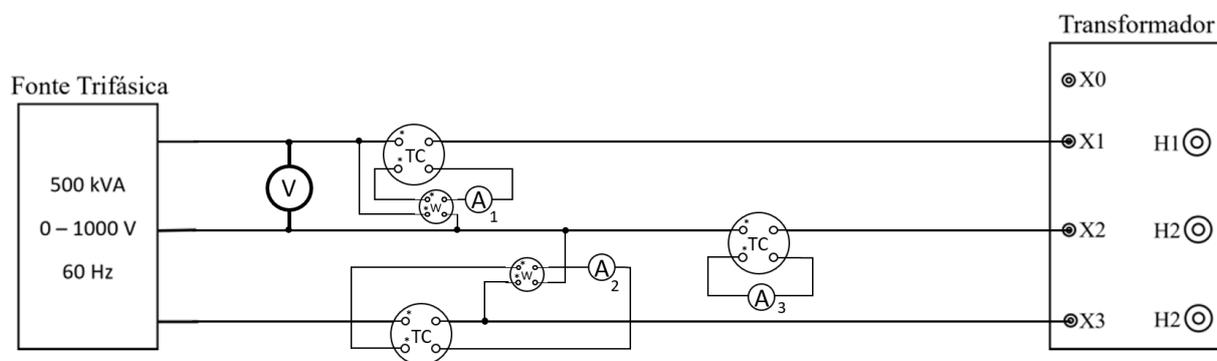
O ensaio de circuito aberto (ou a vazio), nesse caso, deve ser feito no lado de tensão inferior, com tensão nominal de 220 V.

Como espera-se uma corrente de excitação de 20 A, os amperímetros e a bobina de corrente dos wattímetros irão requerer o uso de transformadores de corrente (TC) com relação 25/5 A.

Para medição de potência trifásica emprega-se o método dos dois wattímetros, com as bobinas de potencial conectadas a uma fase comum que não contém as bobinas de corrente.

As bobinas de potencial dos wattímetros e o voltímetro apresentam campos de medição para conexão direta, sem o uso de transformadores de potencial (TP).

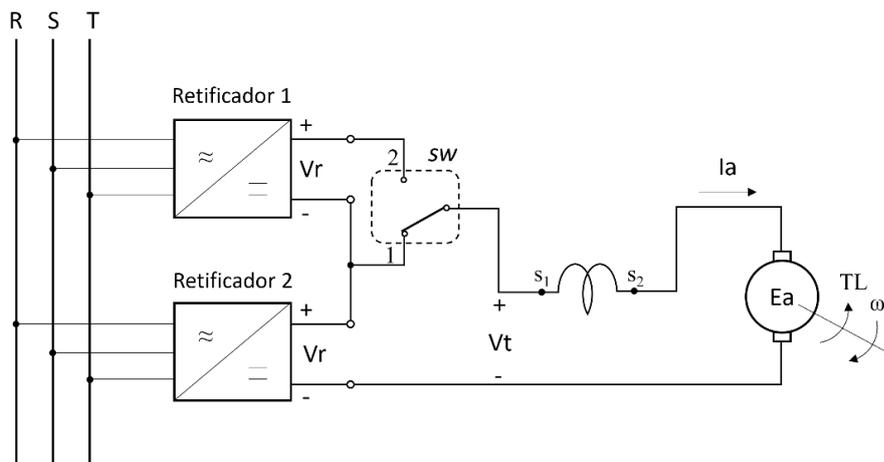
As conexões dos instrumentos e transformadores de corrente para a realização do ensaio solicitado são representadas na figura seguinte:



Referências Bibliográficas:

- Del Toro, V.; Fundamentos de máquinas elétricas, Editora LTC, 1999 (Seções 2.3 e 2.9).
- Fitzgerald, A.E.; KINGSLEY Jr., C. & UMANS, S.D.; Máquinas elétricas, 7a. ed., McGraw Hill, 2014 (Seção 2.8).
- Sen, P.C.; Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1997 (Seção 2.2).

Gabarito Questão 8 – Máquinas Elétricas



A carga mecânica é de conjugado (TL) constante.

Item (a)

a corrente de armadura I_{a2} , em relação ao valor inicial I_{a1} , em regime permanente, após a manobra da chave SW para a posição 2.

Como a corrente de armadura e a corrente de campo série são iguais e a máquina opera na porção linear de sua curva de saturação, pode-se admitir que a corrente de armadura (I_a) e o fluxo polar φ são linearmente proporcionais:

$$\varphi = k_1 \cdot I_a \quad (1)$$

Temos ainda que o torque desenvolvido (T) pelo motor depende do fluxo polar (φ) e da corrente de armadura (I_a), sendo dado por:

$$T = k_t \cdot \varphi \cdot I_a \quad (2)$$

Substituindo a equação (1) em (2) temos:

$$T = k_t \cdot k_1 \cdot I_a^2 \quad (3)$$

Em regime permanente o torque motor equilibra o torque da carga, que é constante, assim teremos, de acordo com (3):

$$k_t \cdot k_1 \cdot I_a^2 = \text{constante} \quad (4)$$

De acordo com (4), após a mudança da chave SW para a posição 2 a corrente de armadura não sofrerá alterações em regime permanente, ou seja, $I_{a1} = I_{a2}$.

Item (b)

A tensão rotacional (E_a), induzida no enrolamento da armadura, depende do fluxo polar (φ) e da velocidade angular do rotor (ω), sendo dada por:

$$E_a = k_e \cdot \varphi \cdot \omega$$

A hipótese de perdas elétricas desprezíveis permite igualar a tensão E_a à tensão terminal aplicada ao motor (V_t), levando a:

$$V_t = k_e \cdot \varphi \cdot \omega$$

Portanto, a velocidade angular ω pode ser obtida fazendo:

$$\omega = \frac{V_t}{k_e \cdot \varphi}$$

Como $\varphi = k_1 \cdot I_a$ teremos:

$$\omega = \frac{V_t}{k' \cdot I_a}$$

Em que $k' = k_e \cdot k_1$

Como foi verificado no item (a) que a corrente I_a tem valor constante, a velocidade do rotor será proporcional à tensão V_t .

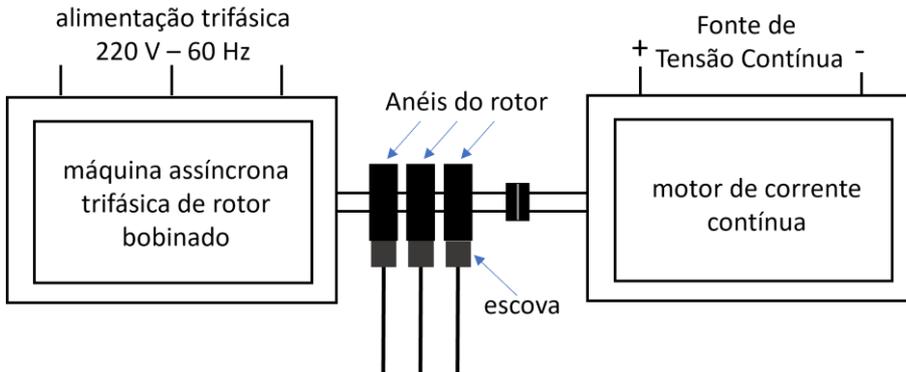
Ao se comutar a chave SW da posição 1 para a posição 2, a tensão V_t será alterada do valor V_r para o valor $2V_r$, o que irá dobrar o valor da velocidade do motor. Assim teremos:

$$\omega_2 = 2 \cdot \omega_1$$

Referências Bibliográficas:

- Del Toro, V.; Fundamentos de máquinas elétricas, Editora LTC, 1999 (Seção 8-1).
- Sen, P.C.; Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1997 (Seção 9.1).
- Fitzgerald, A.E.; KINGSLEY Jr., C. & UMANS, S.D.; Máquinas elétricas, 7a. ed., McGraw Hill, 2014 (Seção 7.1)

Gabarito Questão 9 – Máquinas Elétricas



O campo girante produzido no enrolamento do estator terá velocidade n_s dada pela expressão seguinte:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

A velocidade do rotor da máquina assíncrona será a mesma velocidade do motor de corrente contínua.

Tomaremos o sentido da velocidade n_s do campo girante do estator como positivo, de tal sorte que se o motor de corrente contínua girar no mesmo sentido do campo girante sua velocidade n será também positiva. Caso o rotor do motor c.c. gire em sentido oposto ao do campo girante do estator da máquina assíncrona, assumiremos sua velocidade n como sendo negativa.

Há dois casos a considerar:

- I) $n = 600 \text{ rpm}$ no mesmo sentido de giro do campo girante do estator da máquina assíncrona:

Nesse caso o escorregamento s valerá:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - 600}{1200} = 0,5$$

A frequência f_r das tensões induzidas no rotor da máquina assíncrona é dada por:

$$f_r = s \cdot 60 \text{ Hz} = 30 \text{ Hz}$$

Se os enrolamentos de estator e de rotor por fase são idênticos, a relação de transformação entre eles é unitária. A tensão entre anéis (Vaneis) será a tensão de linha no enrolamento do rotor, dada por:

$$V_{\text{vaneis}} = s \cdot \frac{220}{1} \cdot \sqrt{3} = 190 \text{ V}$$

- II) $n = - 600 \text{ rpm}$ (o rotor da máquina assíncrona é acionado a 600 rpm em sentido oposto ao sentido de giro do campo girante do estator):

Nesse caso o escorregamento s valerá:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - (-600)}{1200} = 1,5$$

A frequência f_r das tensões induzidas no rotor da máquina assíncrona será dada por:

$$f_r = s \cdot 60 \text{ Hz} = 90 \text{ Hz}$$

A tensão entre anéis (Vaneis) será a tensão de linha no enrolamento do rotor, dada por:

$$V_{\text{aneis}} = s \cdot \frac{220}{1} \cdot \sqrt{3} = 570 \text{ V}$$

Referências Bibliográficas:

- Fitzgerald, A.E.; KINGSLEY Jr., C. & UMANS, S.D.; Máquinas elétricas, 7a. ed., McGraw Hill, 2014 (Seção 6.1).
- Sen, P.C.; Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1997 (Exemplo Resolvido 5.7).

Gabarito Questão 10 – Máquinas Elétricas

Se a resistência da armadura (R_a) pode ser desprezada, a impedância síncrona (Z_s) é igual à reatância síncrona (X_s).

A potência ativa por fase (P) do gerador varia senoidalmente com o ângulo de carga (δ) e pode ser calculada com a expressão:

$$P = \frac{V_t \cdot E_f}{X_s} \cdot \text{sen} \delta$$

A potência reativa por fase (Q) do gerador, por sua vez é dada por:

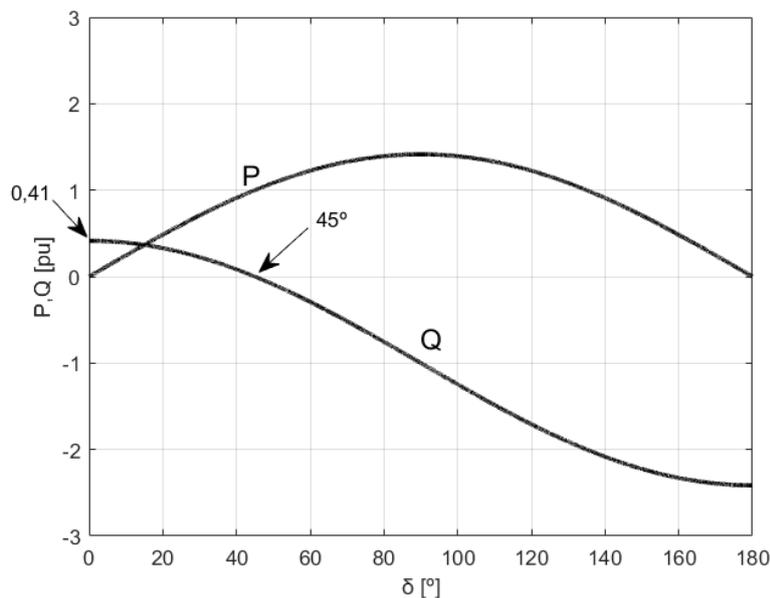
$$Q = \frac{V_t \cdot E_f}{X_s} \cdot \text{cos} \delta - \frac{V_t^2}{X_s}$$

O valor máximo da potência ativa (P_{max}) ocorre para ângulo de carga igual a 90° . Substituindo os valores dados teremos:

$$P_{max} = \frac{1 \cdot \sqrt{2}}{1} = \sqrt{2} \text{ pu}$$

A potência reativa Q varia cossenoidalmente com o ângulo de carga (δ), sendo nula quando $E_f \cdot \text{cos} \delta - V_t = 0$.

As curvas solicitadas estão reproduzidas no gráfico seguinte:



Referências Bibliográficas:

- Sen, P.C.; Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1997 (Seção 6.5 – Power and Torque Characteristics).