CONCURSO ITA 2025

EDITAL: 02/ITA/2025

CARGO: PESQUISADOR

PERFIL: PQ-10

CADERNO DE QUESTÕES

1. Esta prova tem duração de **4 (quatro) horas**.
2. Você poderá usar **apenas** caneta esferográfica de corpo transparente com tinta preta, lápis ou lapiseira, borracha, régua transparente simples e compasso. **É proibido portar qualquer outro material escolar ou equipamento eletrônico.**
3. Você recebeu este **caderno de questões e um caderno de respostas** que deverão ser devolvidos ao final do exame.
4. O caderno de questões é composto por 4 **questões dissertativas**.
5. As **questões dissertativas devem ser respondidas exclusivamente no caderno de respostas**. Responda sequencialmente as questões, usando caneta preta.
6. **É obrigatória a devolução do caderno de questões e do caderno de respostas**, sob pena de desclassificação do candidato.
7. **Aguarde o aviso para iniciar a prova. Ao terminá-la, avise o fiscal e aguarde-o no seu lugar**.

A questão 1 se refere ao seguinte problema:

O modelo dinâmico do subsistema elétrico do equivalente bifásico de um motor de indução trifásico de dois polos pode ser descrito via: (i) as correntes no estator da máquina; (ii) e os fluxos magnéticos concatenados do rotor. As relações fundamentais, utilizando notação complexa ($j = \sqrt{-1}$), são

$$\boldsymbol{\psi}_{s,\alpha\beta} = \ell_s \mathbf{i}_{s,\alpha\beta} + M \exp(j\theta_m)\, \mathbf{i}_{r,\alpha\beta} \tag{1}$$
$$\boldsymbol{\psi}_{r,\alpha\beta} = \ell_r \mathbf{i}_{r,\alpha\beta} + M \exp(-j\theta_m)\, \mathbf{i}_{s,\alpha\beta} \tag{2}$$

Note que o índice s serve para indicar se a variável está associada com o circuito do e**s**tator, já o índice r está associado com o **r**otor. O índice $\alpha\beta$ é para indicar que a variável está na base $\alpha\beta$. A notação complexa adotada implica em $\mathbf{x}_{\alpha\beta} = x_\alpha + jx_\beta$ para uma variável genérica $\mathbf{x}$. É possível utilizar uma notação matricial com variáveis reais:

$$\begin{bmatrix} \psi_{s,\alpha} \\ \psi_{s,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_s & 0 \\ 0 & \ell_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s,\alpha} \\ i_{s,\beta} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos\theta_m & -\operatorname{sen}\theta_m \\ \operatorname{sen}\theta_m & \cos\theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r,\alpha} \\ i_{r,\beta} \end{bmatrix} \tag{3}$$
$$\begin{bmatrix} \psi_{r,\alpha} \\ \psi_{r,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_r & 0 \\ 0 & \ell_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r,\alpha} \\ i_{r,\beta} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos\theta_m & \operatorname{sen}\theta_m \\ -\operatorname{sen}\theta_m & \cos\theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s,\alpha} \\ i_{s,\beta} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Pode ser conveniente utilizar

$$1 - \frac{M^2}{\ell_s \ell_r} = \sigma \tag{5}$$

Seguem as definições das grandezas envolvidas:

- ℓ_s é a indutância equivalente do estator da máquina (constante);
- ℓ_r é a indutância equivalente do rotor da máquina (constante);
- M é a indutância mútua equivalente da máquina (constante);
- σ é a dispersão magnética (constante);
- $\boldsymbol{\psi}_{s,\alpha\beta}$ é o fluxo magnético concatenado do estator em um sistema de coordenadas fixo no estator;
- $\boldsymbol{\psi}_{r,\alpha\beta}$ é o fluxo magnético concatenado do rotor em um sistema de coordenadas fixo no estator;
- $\mathbf{i}_{s,\alpha\beta}$ é a corrente do estator em um sistema de coordenadas fixo no estator;
- $\mathbf{i}_{r,\alpha\beta}$ é a corrente do rotor em um sistema de coordenadas fixo no estator;
- θ_m é o ângulo mecânico de rotação da máquina.

Questão 1. (**2,5**) Utilizando como variáveis de estado $\mathbf{i}_{s,\alpha\beta}$ e $\boldsymbol{\psi}_{r,\alpha\beta}$, deduza as <u>equações de estado</u> da parte elétrica do motor de indução sabendo que

$$\mathbf{v}_{s,\alpha\beta} = R_s \mathbf{i}_{s,\alpha\beta} + \frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi}_{s,\alpha\beta} \tag{6}$$
$$0 = R_r \mathbf{i}_{r,\alpha\beta} + \frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi}_{r,\alpha\beta} \tag{7}$$

em que R_s é a resistência do estator; R_r é a resistência do rotor; e $\mathbf{v}_{s,\alpha\beta}$ é a tensão de alimentação do circuito do estator ($\mathbf{v}_{s,\alpha\beta} = v_{s,\alpha} + jv_{s,\beta}$). Veja que o modelo final, no formato de equação de estados, <u>não</u> deve conter os termos $\boldsymbol{\psi}_{s,\alpha\beta}$ e $\mathbf{i}_{r,\alpha\beta}$. A resposta pode ser apresentada utilizando a notação complexa, ou com variáveis reais.

Questão 2. (**2,5**) O circuito da Figura 1 é um conversor CC–CA trifásico com filtro LC alimentando uma carga resistiva. Assuma que as chaves presentes são todas ideais; os indutores, capacitores e a carga resistiva são todos equilibrados. Apresente o modelo no formato de equações de estado utilizando o método da média na base $\alpha\beta 0$ e também na base $dq0$. As variáveis de estado devem ser as correntes no indutor L e as tensões nos capacitores C.

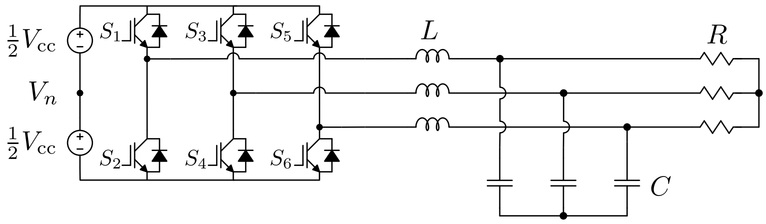

Figura 1: Conversor CC–CA trifásico contendo circuito RLC.

Utilize a seguinte transformada $\alpha\beta 0$:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{8}$$

e a seguinte transformada $dq0$:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \operatorname{sen}\phi & 0 \\ -\operatorname{sen}\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

sendo que x é uma variável genérica qualquer; os índices $\{a, b, c\}$ indicam as fases do sistema trifásico; os índices $\{\alpha, \beta, 0\}$ indicam as componentes da base $\alpha\beta 0$; e os índices $\{d, q, 0\}$ indicam as componentes da base $dq0$.

Questão 3. (**2,5**) O sistema visto na Figura 2 representa um conversor de dois quadrantes para acionamento de um motor CC. Considere que a estrutura opera no modo de condução descontínua e que os semicondutores são ideais. Determine: (i) a corrente de pico que flui pelo motor; (ii) a tensão média de saída v_{AB}; e (iii) a corrente média no interruptor.

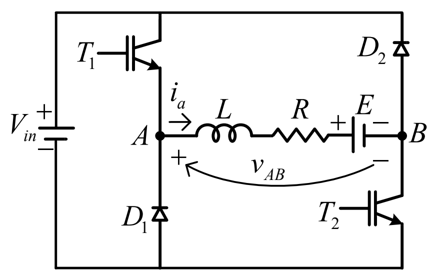

Figura 2: Conversor CC–CC de dois quadrantes.

Adote a seguinte simplificação

$$\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \approx 1 - \frac{t}{\tau} \tag{10}$$

em que τ é a constante de tempo do circuito, além de que $\tau >> T$ com T o período de comutação.

Questão 4. (**2,5**) O circuito apresentado na Figura 3 mostra um retificador monofásico controlado que alimenta um motor de corrente contínua.

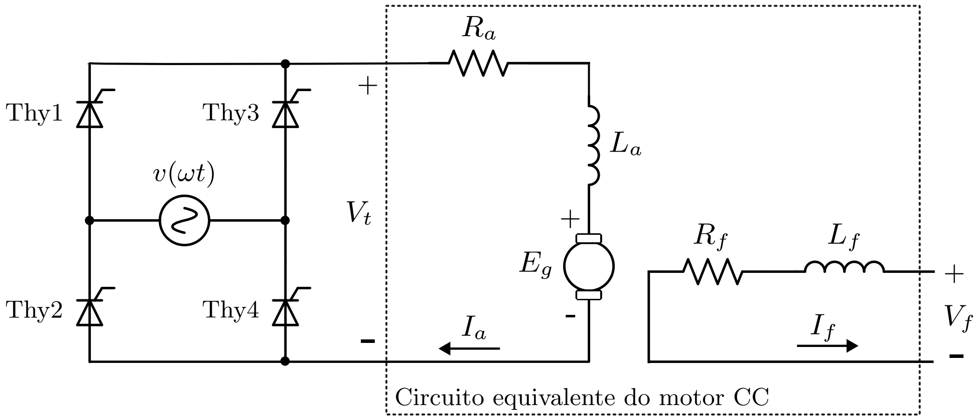

Figura 3: Retificador monofásico controlado com motor CC

As equações que descrevem o modelo elétrico do motor são:

$$V_t = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_g \tag{11}$$

$$V_f = I_f R_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \tag{12}$$

onde a força contraeletromotriz (E_g) é dada por:

$$E_g = \omega_r L_{af} I_f \tag{13}$$

O torque eletromagnético (T_e) é definido por:

$$T_e = L_{af} I_f I_a \tag{14}$$

e está relacionado à dinâmica mecânica do sistema pela equação:

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r + T_L \tag{15}$$

As grandezas envolvidas no sistema são:

- R_a: Resistência da armadura
- R_f: Resistência do campo
- L_a: Indutância própria da armadura
- L_f: Indutância própria do campo
- L_{af}: Indutância mútua entre as bobinas de campo e as da armadura
- T_e: Torque eletromagnético
- T_L: Torque de carga
- J: Momento de inércia
- B_m: Coeficiente de atrito viscoso
- ω_r: Velocidade angular do rotor

Considerando tiristores ideais, o motor CC operando com corrente de armadura contínua (condução contínua) e que a carga é de 50% da carga nominal, determine o ângulo de disparo α que mantenha a velocidade nominal do motor.

A resposta deve ser em função das seguintes variáveis: R_a, R_f, L_{af}, V_f, E, P_{nom} (potência nominal) e ω_{nom} (velocidade angular nominal). Considere também que $B_m = 0$ e que a tensão de entrada do retificador é $v(\omega t) = \sqrt{2}E\,\text{sen}(\omega t)$.

RASCUNHO

RASCUNHO

RASCUNHO

RASCUNHO