

Em regime permanente predomina a componente do atrito viscoso (6):  $T = k_D \omega$ .

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + k_D \omega \xrightarrow{J \frac{d\omega}{dt} = 0} T = k_D \omega \Leftrightarrow k_D = \frac{T}{\omega} \quad (6)$$

Binário nominal obtido por (7).

$$P_n = T_n \omega_n \Leftrightarrow T_n = \frac{P_n}{\omega_n} \Leftrightarrow T_n = \frac{P_n}{N_n \frac{2\pi}{60}} \Leftrightarrow T_n = \frac{2,2 \times 10^3}{1460 \times \frac{2\pi}{60}} \Leftrightarrow T_n = 14,3 \text{ Nm} \quad (7)$$

Considerando a característica electromecânica linear para valores de binário inferior ao do binário nominal (ver enunciado do problema) obtém-se a velocidade (8).

$$\frac{T_n}{\omega_s - \omega_n} = \frac{\frac{1}{2} T_n}{\omega_s - \omega} \Leftrightarrow \omega_s - \omega_n = \frac{1}{2} \omega_s - \omega_n \Leftrightarrow \omega = \omega_s - \frac{1}{2} (\omega_s - \omega_n) \Leftrightarrow \quad (8)$$

$$\omega = 1500 \times \frac{2\pi}{60} - \frac{1}{2} \times (1500 - 1460) \times \frac{2\pi}{60} \Leftrightarrow \omega = 155 \text{ rads}^{-1} = \frac{60}{\frac{2\pi}{155}} \rightarrow N = 1480 \text{ rpm}$$

Substituir (8) em (6) para calcular o valor do coeficiente de atrito viscoso (9).

$$T = k_D \omega \Leftrightarrow k_D = \frac{T}{\omega} \Leftrightarrow k_D = \frac{7,2}{155} \Leftrightarrow k_D = 0,0465 \text{ Nms} \quad (9)$$

### Bibliografia:

Palma, J. (1999), “*Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável*”, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999, ISBN 972-31-0839-9.

## **Problema 11**

**Regras: Existem 2 afirmações certas por cada questão. Cada resposta certa contabiliza 0,8 valores. Cada resposta errada desconta 0,2 valores.**

**Marque com X todas as afirmações correctas e só essas.** N° \_\_\_\_\_ Nome \_\_\_\_\_

**1) Num sistema de controlo em cadeia fechada é possível eliminar, em regime permanente, o efeito de uma perturbação localizada na cadeia de acção, se existir:**

- ☒ pelo menos um pólo na origem localizado à esquerda da perturbação.
- ☐ pelo menos um pólo na origem localizado à direita da perturbação.
- ☒ um compensador na cadeia de acção do tipo PI ou do tipo PID.
- ☐ pelo menos um pólo na origem localizado na cadeia de retroacção.

**2) Num motor de corrente contínua de magnetos permanentes...**

- ☒ o valor da tensão define aproximadamente a velocidade.
- ☐ não é possível inverter o sentido de rotação original.
- ☒ o binário varia proporcionalmente com a corrente de induzido.
- ☐ por enfraquecimento de fluxo obtêm-se velocidades elevadas.

**3) Relativamente aos accionamentos com máquinas de corrente contínua de excitação fixa, compare o método de controlo directo da velocidade com a técnica que usa um anel interno de controlo de corrente:**

- ☒ o método de controlo directo de velocidade tem uma estrutura mais simples.
- ☐ o método de controlo directo de velocidade estabelece o binário de forma explícita.
- ☐ só o controlo de velocidade com anel interno de corrente permite arranques suaves.
- ☒ o controlo de velocidade com anel interno de corrente permite autoprotecção contra sobrecargas.

**4) No comando escalar da máquina assíncrona trifásica a imposição de frequência nula, corresponde à imposição...**

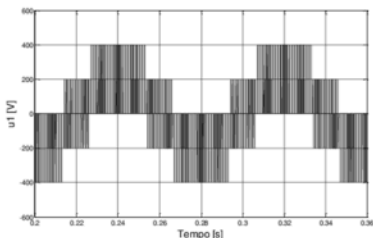
- ☒ de corrente contínua nas fases da máquina e binário de arranque nulo.
- ☐ de corrente com baixa frequência nas fases da máquina e de binário de arranque máximo.
- ☒ de uma característica electromecânica com simetria relativamente aos eixos T e  $\omega$ .
- ☐ de uma característica electromecânica sem simetria relativamente ao eixo T.

**5) Os accionamentos comandados com a técnica  $V/f$ , em regime permanente, permitem...**

- ☐ com enfraquecimento de fluxo, manter o binário nominal dentro da gama de velocidades  $[-\omega_n, +\omega_n]$
- ☒ sem enfraquecimento de fluxo, manter o binário nominal dentro da gama de velocidades  $[-\omega_n, +\omega_n]$
- ☐ sem enfraquecimento de fluxo, manter o binário nominal dentro e fora das velocidades  $[-\omega_n, +\omega_n]$
- ☒ com enfraquecimento de fluxo, variar o binário nominal fora da gama de velocidades  $[-\omega_n, +\omega_n]$

## Problema 12

Um variador eletrônico de velocidade (VEV) com comando V/f alimenta uma máquina assíncrona trifásica que aciona um ventilador. A máquina assíncrona trifásica tem as seguintes características nominais: 220/380V, 50Hz, 2,2kW, 1460rpm.



a) Justificadamente, apresente o esquema de blocos com uma possível solução para implementar a técnica de comando V/f. [cotação: 2 valores]

b) Considere a tensão simples  $u_1$  aplicada aos enrolamentos do estator da máquina ligados em estrela, representada na figura. Calcule o valor eficaz da tensão aplicada pelo VEV à máquina bem como o índice de modelação de amplitude  $m_a$ . O valor

eficaz da primeira harmónica da tensão simples aplicada à máquina, com o índice de modelação de amplitude  $m_a$ , e tensão no barramento  $U_{dc}$ , é dado por:  $U_{1ef} = \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}} \right] m_a U_{dc}$ . [cotação: 2 valores]

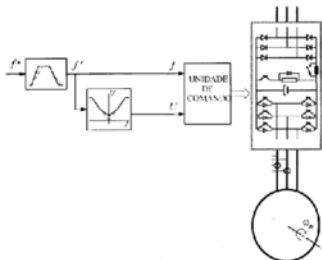
c) Com o variador a impor à máquina os seus valores nominais de tensão e frequência, esta desenvolve um binário motor de dois terços do binário nominal. Determine o valor do coeficiente de atrito de turbulência e o rendimento aproximado do ponto de funcionamento. [cotação: 2 valores]

### Resolução:

a)

A solução deverá conter os seguintes blocos ou subsistemas:

- Máquina Assíncrona trifásica;
- Circuito de potência constituído por três braços, circuito de guiamento/drivers e barramento de corrente contínua;
- Circuito de comando que permita o cálculo da amplitude da modulante ( $A_{mod}$ ) em função da frequência da modulante ( $f_{mod}$ ). Neste cálculo é necessário o valor da tensão no barramento de corrente contínua. A amplitude  $A_{mod}$  permite definir a amplitude de três sinais que serão comparados em cada instante com um sinal auxiliar chamado onda portadora. Esta onda portadora, será habitualmente uma onda triangular, definida por uma amplitude e uma frequência. A frequência da portadora é um aspecto importante porque impõe a frequência de comutação dos dispositivos semicondutores do circuito de potência. Este circuito de potência funciona como um ondulator de tensão, ou seja, um conversor com modo de funcionamento DC-AC. A amplitude da onda portadora deverá ser sempre superior à amplitude da modulante para evitar sobremodulações.



**b)**

Pela análise da evolução temporal da tensão simples aplicada ao estator da máquina, representadas na figura, obtém-se (1).

$$\Delta t = 0,32 - 0,24 \Leftrightarrow \Delta t = 0,08s \rightarrow f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0,08} \Leftrightarrow f = 12,5Hz \quad (1)$$

A análise da evolução temporal da tensão simples aplicada ao estator (enunciado do problema) permite concluir que esta assume valores de  $1/3$  e  $2/3$  da tensão  $U_{dc}$  do barramento de corrente contínua. Desta forma a tensão  $U_{dc}$  poderá ser obtida por dois processos (2) e (3). O seu resultado é uma tensão  $U_{dc}$  de 600V.

$$1/3 U_{dc} = 200 \Leftrightarrow U_{dc} = 600V \quad (2)$$

$$2/3 U_{dc} = 400 \Leftrightarrow U_{dc} = 3/2 \times 400 \Leftrightarrow U_{dc} = 600V \quad (3)$$

De acordo com o enunciado do problema o estator da máquina assíncrona está ligado em estrela. Desta forma a tensão aplicada é de 380V. Determinação da tensão de alimentação com a solução (4).

$$\frac{V_n}{f_n} = \frac{V}{f} \Leftrightarrow V = f \frac{V_n}{f_n} \Leftrightarrow V = 12,5 \times \frac{380}{50} \Leftrightarrow V = 95V \quad (4)$$

Com o resultado calculado em (4), o cálculo do índice de modulação é obtido com (6).

$$U_{1ef} = \frac{1}{2\sqrt{2}} m_a U_{dc} \xrightarrow{U_{12ef} = \sqrt{3} U_{1ef}} \frac{U_{1ef}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} m_a U_{dc} \Leftrightarrow U_{12ef} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a U_{dc} \Leftrightarrow$$

$$m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_{12ef}}{U_{dc}} \xrightarrow{U_{12ef} = 95V} m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \frac{95}{600} \Leftrightarrow m_a = 0,26 \quad (6)$$

**c)**

Características nominais:  $U_n=380V$ ;  $f_n=50Hz$ ;  $P_n=2,2kW$ ;  $N_n=1460rpm$ .

Binário motor desenvolvido:

Como a carga é um ventilador, o binário que predomina é o de turbulência (8).

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + k_A \omega^2 \quad (8)$$

No arranque do motor predomina a componente de inércia (9).

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + k_A \omega^2 \xrightarrow{k_A \omega^2 \approx 0} T \approx J \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

Em regime permanente predomina a componente de atrito resistente, ou seja, o atrito de turbulência (10).

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + k_A \omega^2 \xrightarrow{J \frac{d\omega}{dt} = 0} T = k_A \omega^2 \Leftrightarrow k_A = \frac{T}{\omega^2} \quad (10)$$

Cálculo do binário nominal (11).

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} \Leftrightarrow T_n = \frac{P_n}{N_n \frac{2\pi}{60}} \Leftrightarrow T_n = \frac{2,2 \times 10^3}{1460 \times \frac{2\pi}{60}} \Leftrightarrow T_n = 14,3Nm \quad (11)$$

Considerando a característica electromecânica linear para valores de binário inferior ao do binário nominal (ver enunciado do problema) (12).

$$\begin{aligned} \frac{T_n}{\omega_s - \omega_n} &= \frac{\frac{2}{3}T_n}{\omega_s - \omega} \Leftrightarrow \omega_s - \omega_n = \frac{2}{3}\omega_s - \omega_n \Leftrightarrow \omega = \omega_s - \frac{2}{3}(\omega_s - \omega_n) \Leftrightarrow \\ \omega &= 1500 \times \frac{2\pi}{60} - \frac{2}{3} \times (1500 - 1460) \times \frac{2\pi}{60} \Leftrightarrow \omega = 154,2 \text{ rads}^{-1} \xrightarrow{\times \frac{60}{2\pi}} N = 1473 \text{ rpm} \end{aligned} \quad (12)$$

Substituir (11) e (12) em (10) para calcular o valor do coeficiente de atrito de turbulência (13).

$$T = k_A \omega^2 \Leftrightarrow k_A = \frac{T}{\omega^2} \Leftrightarrow k_A = \frac{\frac{2}{3} \times 14,3}{154,2^2} \Leftrightarrow k_A = 4 \times 10^{-4} \text{ Nms}^2 \quad (13)$$

Cálculo do rendimento aproximado do ponto de funcionamento (14).

$$\eta \approx 1 - s \quad (14)$$

Cálculo do escorregamento (15).

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \Leftrightarrow s = \frac{1500 - 1473}{1500} \Leftrightarrow s = 1,8\% \quad (15)$$

Substituir (15) em (14) obtém-se (16).

$$\eta \approx 1 - s \Leftrightarrow \eta = 1 - 0,018 \Leftrightarrow \eta = 98,2\% \quad (16)$$