

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Conversores Electrónicos em Accionamentos

Teste Final – 25 de Junho de 2021

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (28)$$

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n = \frac{1}{\tau_e} \\ \omega_n^2 = \frac{5k_c k_e}{100\tau_e} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \omega_n = \frac{1}{2\xi\tau_e} = \frac{1}{\sqrt{2}\tau_e} \\ \frac{1}{2\tau_e^2} = \frac{5k_c k_e}{100\tau_e} \Leftrightarrow k_c = \frac{100}{2 \times 5k_e\tau_e} \Leftrightarrow k_c = \frac{100}{2 \times 5 \times 10 \times 1 \times 10^{-3}} = 1000 \end{cases} \quad (29)$$

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

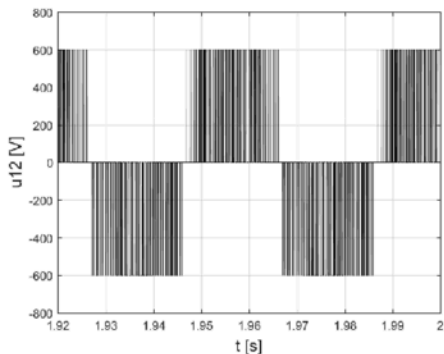
Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Conversores Electrónicos em Accionamentos

Teste Final – 25 de Junho de 2021

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29

Problema 2

Um Variador Electrónico de Velocidade (VEV), com comando V/f, alimenta uma máquina assíncrona trifásica. A máquina assíncrona trifásica tem as seguintes características nominais: 220/380V; 50Hz; 2,2kW; 1460rpm. A característica tensão-frequência é obtida com $U = \max(U_0 + 5,1 \times f; U_n / f_n \times f)$ e tensão $U_0=50V$.

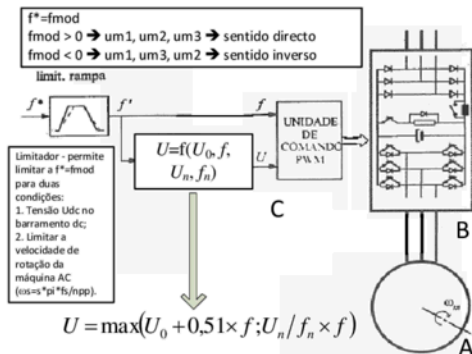


a) Justificadamente, apresente o esquema de blocos com uma possível solução para implementar a técnica de comando V/f com opção de inversão do sentido de rotação. Identifique a tensão U_0 e descreva a sua função/objectivo. Para a ligação em estrela dos enrolamentos do estator, justificadamente apresente o gráfico com a característica tensão-frequência para o intervalo $0 \leq f \leq f_n$. [cotação: 2 valores]

b) A figura representa a evolução temporal da tensão composta u_{12} (entre as fases 1 e 2) de saída do Variador Electrónico de Velocidade e aplicada ao estator da máquina assíncrona trifásica. O valor eficaz da primeira harmónica da tensão composta u_{12} , com o índice de modelação de amplitude m_a , e tensão U_{dc} no barramento DC, é dado por: $U_{12,1h} = \left[\sqrt{3} / (2\sqrt{2}) \right] m_a U_{dc}$. Calcule a tensão U_{dc} , o valor da tensão nominal aplicada pelo Variador Electrónico de Velocidade à máquina (ligação em estrela) e o índice de modelação de amplitude m_a . [cotação: 2 valores]

c) Admita novamente que o valor eficaz da primeira harmónica da tensão composta é dado por: $U_{12,1h} = \left[\sqrt{3} / (2\sqrt{2}) \right] m_a U_{dc}$. Para a ligação em estrela dos enrolamentos do estator da máquina, calcule justificadamente o valor de m_a para duas frequências: $f=10\text{Hz}$ e $f=40\text{Hz}$. [cotação: 2 valores]

a) Justificadamente, apresente o esquema de blocos com uma possível solução para implementar a técnica de comando V/f com opção de inversão do sentido de rotação. Identifique a tensão U_0 e descreva a sua função/objectivo. Para a ligação em estrela dos enrolamentos do estator, justificadamente apresente o gráfico com a característica tensão-frequência para o intervalo $0 \leq f \leq f_n$.



Uma possível solução deverá conter os seguintes blocos ou subsistemas:

- (A) Máquina assíncrona trifásica;
- (B) Circuito de potência constituído por: i) rectificador monofásico ou trifásico (dependente da potência) em ponte não controlado, ii) resistência de pré-carga do condensador, iii) barramento de corrente contínua, iv) *chopper* e resistência de energia de retorno, v) ondulator de tensão trifásico em ponte com circuito de guiamento/drivers;
- (C) 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 U_{dc} no barramento de corrente contínua. A amplitude A_{mod} permite definir a amplitude de três sinusóides 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 A_{port} e uma frequência f_{port} . 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.

Identificar a tensão U_0 e descrever a sua função/objectivo.

A tensão U_0 habitualmente é identificada como tensão de pedestal (*boost*). Permite estabelecer um valor mínimo da tensão aplicada no estator de máquina para uma frequência mínima (f_{min}). Este valor de frequência mínima poderá ser zero ou praticamente zero (Figura A). Torna-se importante estabelecer este valor mínimo de U_0 que irá corresponder um valor mínimo de binário ($T = f(U^2)$). Este valor mínimo de binário é importante e necessário quando existem características de binários de carga ou resistentes T_r elevados (Figura B).

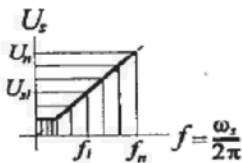


Figura B

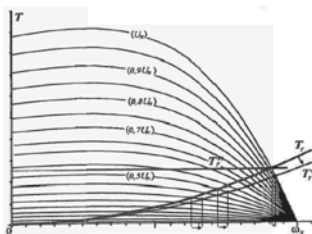


Figura C

Característica tensão-frequência para o intervalo $0 \leq f \leq f_n$:

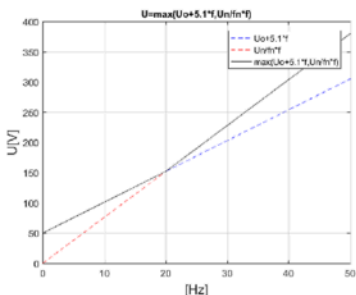
Desenhar a característica tensão-frequência para a equação (1) e (2) com uma variação da frequência (3). As características tensão-frequência são equações de recta com uma determinada ordenada na origem e inclinação. A característica tensão-frequência pretendida e de acordo com o enunciado do problema será obtida com a equação (4).

$$U = U_0 + 5,1 \times f \quad (1)$$

$$U = U_n / f_n \times f \quad (2)$$

$$0 \leq f \leq f_n \quad (3)$$

$$U = \max(U_0 + 5,1 \times f; U_n / f_n \times f) \quad (4)$$



```
clc; clear all;
Uo=50; Un=380; fn=50;
f=0:0.001:50;
Ua=Uo+5.1*f; %Ua=Uo+5.1*f
Ub=Un/fn*f; %Ub=Un/fn*f
U=max(Uo+5.1*f, Un/fn*f); %U=max(Uo+5.1*f, Un/fn*f)
plot(f,Ua,'--b',f,Ub,'--r',f,U,'-k'); grid on;
xlabel('\fontsize{14}[Hz]'); ylabel('\fontsize{14}U[V]');
title('\fontsize{10}U=max(Uo+5.1*f, Un/fn*f)');
legend('Uo+5.1*f', 'Un/fn*f', 'max(Uo+5.1*f, Un/fn*f)');
axis([0 50 0 400]);
%print -dbitmap
```

Com (1) é possível calcular o valor da tensão U para os dois valores limite da frequência f , respectivamente com (5), (6).

$$U = U_0 + 5,1 \times f \xrightarrow{f=0\text{Hz}} U = U_0 \Leftrightarrow U = 50\text{V} \quad (5)$$

$$U = U_0 + 5,1 \times f \xrightarrow[\begin{smallmatrix} f=50\text{Hz} \\ U_0=50\text{V} \end{smallmatrix}]{U=50+5,1 \times 50} U = 50 + 5,1 \times 50 \Leftrightarrow U = 305\text{V} \quad (6)$$

Com (2) é possível calcular o valor da tensão U para os dois valores limite da frequência f , respectivamente com (7), (8).

$$U = U_n / f_n \times f \xrightarrow[\begin{smallmatrix} f=0\text{Hz} \\ U_n=380\text{V} \\ f_n=50\text{Hz} \end{smallmatrix}]{U=380/50 \times 0} U = 380/50 \times 0 \Leftrightarrow U = 0\text{V} \quad (7)$$

$$U = U_n / f_n \times f \xrightarrow[\begin{smallmatrix} f=50\text{Hz} \\ U_n=380\text{V} \\ f_n=50\text{Hz} \end{smallmatrix}]{U=380/50 \times 50} U = 380/50 \times 50 \Leftrightarrow U = 380\text{V} \quad (8)$$

O ponto de intersecção das duas características (1), (2) pode ser calculado com (9). Resulta de igualar ambas as equações.

$$U_0 + 5,1f = \frac{U_n}{f_n} f \Leftrightarrow U_0 + 5,1f = \frac{U_n}{f_n} f \Leftrightarrow U_0 = \frac{U_n}{f_n} f - 5,1f \Leftrightarrow U_0 = \left(\frac{U_n}{f_n} - 5,1 \right) f \Leftrightarrow$$

$$f = \frac{U_0}{\frac{U_n}{f_n} - 5,1} \xrightarrow[\begin{smallmatrix} U_0=50\text{V} \\ U_n=380\text{V} \\ f_n=50\text{Hz} \end{smallmatrix}]{f=20\text{Hz}} f = 20\text{Hz} \quad (9)$$

Com a frequência obtida em (9) calcular o valor da tensão de forma equivalente (10), (11) com utilização de (1), (2).

$$U = U_0 + 5,1 \times f \xrightarrow[\begin{smallmatrix} U_0=50\text{V} \\ f=20\text{Hz} \end{smallmatrix}]{U=50+5,1 \times 20} U = 50 + 5,1 \times 20 \Leftrightarrow U = 152\text{V} \quad (10)$$

$$U = U_n / f_n \times f \xrightarrow[\begin{smallmatrix} f=20\text{Hz} \\ U_n=380\text{V} \\ f_n=50\text{Hz} \end{smallmatrix}]{U=380/50 \times 20} U = 380/50 \times 20 \Leftrightarrow U = 152\text{V} \quad (11)$$

b) A figura representa a evolução temporal da tensão composta u_{12} (entre as fases 1 e 2) de saída do Variador Electrónico de Velocidade e aplicada ao estator da máquina assíncrona trifásica. O valor eficaz da primeira harmónica da tensão composta u_{12} , com o índice de modelação de amplitude m_a e tensão U_{dc} no barramento DC, é dado por: $U_{12_{1h}} = \left[\sqrt{3} / (2\sqrt{2}) \right] m_a U_{dc}$. Calcule a tensão U_{dc} , o valor da tensão nominal aplicada pelo Variador Electrónico de Velocidade à máquina (ligação em estrela) e o índice de modelação de amplitude m_a .

A análise da evolução temporal da tensão composta u_{12} aplicada ao estator pelo Variador Electrónico de Velocidade (enunciado do problema) permite concluir que esta assume valores de $-U_{dc}$, 0, $+U_{dc}$ do barramento de corrente contínua. Desta forma a tensão U_{dc} poderá ser obtida por análise de evolução temporal da tensão u_{12} (12) e (13). O seu resultado permite concluir uma tensão U_{dc} de 600V.

$$u_{12} = +600\text{V} \rightarrow U_{dc} = 600\text{V} \quad (12)$$

$$u_{12} = -600\text{V} \rightarrow U_{dc} = 600\text{V} \quad (13)$$

De acordo com a figura, pela análise temporal da tensão composta u_{12} no estator da máquina, obtém-se (14). Foi escolhido um intervalo Δt correspondente a um período de u_{12} . Como exemplo foram considerados $t_f=1,98s$ e $t_i=1,94s$.

$$\Delta t = t_f - t_i \Leftrightarrow \Delta t = 1,98 - 1,94 = 0,04s \rightarrow f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0,04} \Leftrightarrow f = 25Hz \quad (14)$$

De acordo com o enunciado do problema, a característica tensão-frequência é obtida por (15)

$$U = \max(U_0 + 5,1 \times f; U_n / f_n \times f) \quad (15)$$

A característica tensão-frequência em (15) permite obter duas parcelas, respectivamente (16) e (17).

$$U = U_0 + 5,1 \times f \quad (16)$$

$$U = U_n / f_n \times f \quad (17)$$

Com a frequência de 25Hz calculada em (14) são calculadas duas tensões, respectivamente (18) e (19).

$$U = U_0 + 0,5 \times f \Leftrightarrow U = 50 + 5,1 \times 25 \Leftrightarrow U = 177,5V \quad (18)$$

$$U = U_n / f_n \times f \Leftrightarrow U = 380 / 50 \times 25 \Leftrightarrow U = 190V \quad (19)$$

Será escolhido o valor mais elevado (20), ou seja o máximo dos dois valores de (18) e (19).

$$U = \max\{177,5; 190\} \Leftrightarrow U = 190V \quad (20)$$

Determinação do índice de modulação m_a com (21) e utilização de (12) e (20).

$$U_{12_{th}} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a U_{dc} \Leftrightarrow m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_{12_{th}}}{U_{dc}} \xrightarrow[\substack{U_{12_{th}}=U=190V \\ U_{dc}=600V}]{ } m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \frac{190}{600} \Leftrightarrow m_a \approx 0,52 \quad (21)$$

```
clc; clear all;
tfinal=1.98; tinicial=1.94;
delta t=tfinal - tinicial;
f=1/delta t,
U0=50; f=25; Un=380; fn=50;
Ua=U0+5.1*f, Ub=Un/fn*f,
U=max (U0+5.1*f, Un/fn*f),
```

```
Udc=600; %Tensão Udc no barramento DC
ma=2*sqrt (2) *U/ (sqrt (3) *Udc),
```

```
f = 25.0000
Ua = 177.5000
Ub = 190
U = 190
ma = 0.5171
```

c) Admita novamente que o valor eficaz da primeira harmónica da tensão composta é dado por:

$U_{12_{th}} = \left[\sqrt{3} / (2\sqrt{2}) \right] m_a U_{dc}$. Para a ligação em estrela dos enrolamentos do estator da máquina, calcule justificadamente o valor de m_a para duas frequências: $f=10Hz$ e $f=40Hz$.

Com a frequência de 10Hz são calculadas duas tensões, respectivamente (22) e (23).

$$U = U_0 + 5,1 \times f \Leftrightarrow U = 50 + 5,1 \times 10 \Leftrightarrow U = 101V \quad (22)$$

$$U = U_n / f_n \times f \Leftrightarrow U = 380 / 50 \times 10 \Leftrightarrow U = 76V \quad (23)$$

Será escolhido o valor mais elevado (24), ou seja o valor máximo que foi calculado em (22) e (23)

$$U = \max\{101; 76\} \Leftrightarrow U = 101V \quad (24)$$

Determinação do índice de modulação com (25).

$$U_{12k} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a U_{dc} \Leftrightarrow m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_{12k}}{U_{dc}} \xrightarrow[U_{dc}=600V]{U_{12k}=101V} m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \frac{101}{600} \Leftrightarrow m_a \approx 0,28 \quad (25)$$

```
clc; clear all;
U0=50; f=10; Un=380; fn=50;
Ua=U0+5.1*f, Ub=Un/fn*f,
U=max (U0+5.1*f, Un/fn*f) ,
```

```
Udc=600; %Tensão Udc no barramento DC
ma=2*sqrt(2)*U/(sqrt(3)*Udc) ,
```

```
Ua = 101
Ub = 76
U = 101
ma = 0.2749
```

Com a frequência de 40Hz são calculadas duas tensões, respectivamente (26) e (27).

$$U = U_0 + 5,1 \times f \Leftrightarrow U = 50 + 5,1 \times 40 \Leftrightarrow U = 254V \quad (26)$$

$$U = U_n / f_n \times f \Leftrightarrow U = 380 / 50 \times 40 \Leftrightarrow U = 304V \quad (27)$$

Será escolhido o valor mais elevado (28), ou seja o valor máximo que foi calculado em (26) e (27).

$$U = \max\{254; 304\} \Leftrightarrow U = 304V \quad (28)$$

Determinação do índice de modulação com (29).

$$U_{12k} = 600V = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a U_{dc} \Leftrightarrow m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_{12k}}{U_{dc}} \xrightarrow[U_{dc}=600V]{U_{12k}=304V} m_a = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times \frac{304}{600} \Leftrightarrow m_a \approx 0,83 \quad (29)$$

```
clc; clear all;
U0=50; f=40; Un=380; fn=50;
Ua=U0+5.1*f, Ub=Un/fn*f,
U=max (U0+5.1*f, Un/fn*f) ,
```

```
Udc=600; %Tensão Udc no barramento DC
ma=2*sqrt(2)*U/(sqrt(3)*Udc) ,
```

```
Ua = 254
Ub = 304
U = 304
ma = 0.8274
```


Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Conversores Electrónicos em Accionamentos

Teste Final – 25 de Junho de 2021

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29