e-LEE
e-Learning tools for Electrical Engineering

Temática – Electrónica de Potência

Capítulo – Onduladores

Secção – Comando por Modulação de Largura de Impulso

COMANDO MLI (PWM) NO ONDULADOR TRIFÁSICO

INTRODUÇÃO

Este módulo mostra como pode fazer-se variar, por modulação de largura de impulso, o valor eficaz da 1ª harmónica das tensões de saída de um ondulador de tensão trifásico com carga ligada em estrela.

- Pré-requisitos: Princípio de funcionamento do comando por modulação de largura de impulso (MLI)
- nível : Bases da engenharia electrotécnica ou área de especialização
- duração estimada : 1/2 hora
- autor : Francis Labrique
- realização : Sophie Labrique
- versão portuguesa: Fernando Alves da Silva

Este projecto é financiado pela União Europeia no âmbito de uma acção Sócrates-Minerva. As informações nele contidas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores. A União Europeia declina toda a responsabilidade relativamente ao seu uso.

1. REGULAÇÃO DAS TENSÕES U'_A, U'_B, U'_C

Aplicando um comando MLI em cada um, dos três braços, os potenciais P_A, P_B, P_C seguem, em média, as ondas de referência P_{Aw}, P_{Bw}, P_{Cw} (figura 1).

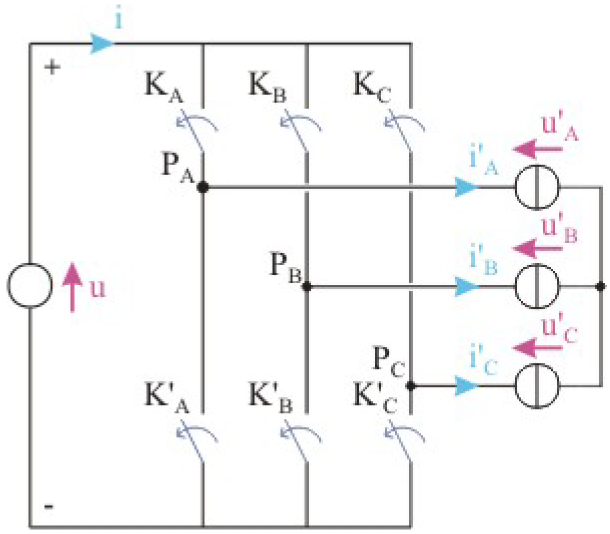

Figura 1

• Para uma carga trifásica equilibrada em estrela de neutro isolado, em valores instantâneos, tem-se:

$$u'_A = 2/3P_A - 1/3P_B - 1/3P_C$$
$$u'_B = 2/3P_B - 1/3P_A - 1/3P_C$$
$$u'_C = 2/3P_C - 1/3P_A - 1/3P_B$$

• Estas igualdades são ainda válidas em valores médios (operador linear):

$$\begin{aligned}
< u'_A(t) > &= \frac{1}{T}\int_{t-T/2}^{t+T/2} u'_A dt = \frac{2}{3} < P_A > -\frac{1}{3} < P_B > -\frac{1}{3} < P_C > \\
&\simeq \left[\frac{2}{3}P_{Aw}(t) - \frac{1}{3}P_{Bw}(t) - \frac{1}{3}P_{Cw}(t)\right]\frac{U/2}{\xi_0} \\
< u'_B(t) > &= \frac{1}{T}\int_{t-T/2}^{t+T/2} u'_B dt = \frac{2}{3} < P_B > -\frac{1}{3} < P_A > -\frac{1}{3} < P_C > \\
&\simeq \left[\frac{2}{3}P_{Bw}(t) - \frac{1}{3}P_{Aw}(t) - \frac{1}{3}P_{Cw}(t)\right]\frac{U/2}{\xi_0} \\
< u'_C(t) > &= \frac{1}{T}\int_{t-T/2}^{t+T/2} u'_C dt = \frac{2}{3} < P_C > -\frac{1}{3} < P_A > -\frac{1}{3} < P_B > \\
&\simeq \left[\frac{2}{3}P_{Cw}(t) - \frac{1}{3}P_{Aw}(t) - \frac{1}{3}P_{Bw}(t)\right]\frac{U/2}{\xi_0}
\end{aligned}$$

• Desejando que, em média u'_A, u'_B, u'_C sigam os valores de referência $u'_{Aw}(t), u'_{Bw}(t), u'_{Cw}(t)$, como $u'_A + u'_B + u'_C = 0$, é necessário impor a mesma restrição às referências:

$$u'_{Aw}(t) + u'_{Bw}(t) + u'_{Cw}(t) = 0$$

Sendo suficiente fazer (ver Princípio de funcionamento do comando por modulação de largura de impulso (MLI))

$$P_{Aw} = u'_{Aw}\frac{\xi_0}{U/2}$$
$$P_{Bw} = u'_{Bw}\frac{\xi_0}{U/2}$$
$$P_{Cw} = u'_{Cw}\frac{\xi_0}{U/2}$$

Com efeito, tem-se então:

$$< u'_A(t) > \simeq \frac{2}{3}u'_{Aw}(t) - \frac{1}{3}u'_{Bw}(t) - \frac{1}{3}u'_{Cw}(t) = u'_{Aw}(t)$$
$$< u'_B(t) > \simeq \frac{2}{3}u'_{Bw}(t) - \frac{1}{3}u'_{Aw}(t) - \frac{1}{3}u'_{Cw}(t) = u'_{Bw}(t)$$
$$< u'_C(t) > \simeq \frac{2}{3}u'_{Cw}(t) - \frac{1}{3}u'_{Aw}(t) - \frac{1}{3}u'_{Bw}(t) = u'_{Cw}(t)$$

Obtendo-se o resultando desejado, fazendo:

$$P_{Aw}(t) = u'_{Aw}(t)\frac{\xi_0}{U/2} + P_0(t)$$
$$P_{Bw}(t) = u'_{Bw}(t)\frac{\xi_0}{U/2} + P_0(t)$$
$$P_{Cw}(t) = u'_{Cw}(t)\frac{\xi_0}{U/2} + P_0(t)$$

O termo $P_0(t)$ apenas modifica a duração dos intervalos durante os quais se tem simultaneamente K_A, K_B e K_C em CONDUÇÃO, ou simultaneamente K_A, K_B e K_C ao CORTE, ou seja, apenas modifica a forma como se obtém $u'_A = u'_B = u'_C = 0$.

2. MODULAÇÃO MLI SINUSOIDAL (“SENO-TRIANGULO”)

Em regime permanente as tensões que desejamos aplicar na carga constituem um sistema trifásico equilibrado de tensões sinusoidais:

$$u'_{Aw} = U_0 \sin(\omega_r t)$$
$$u'_{Aw} = U_0 \sin(\omega_r t - 2\pi/3)$$
$$u'_{Cw} = U_0 \sin(\omega_r t - 4\pi/3)$$

Na modulação MLI sinusoidal, ou "seno-triângulo", faz-se:

$$P_{Aw} = u'_{Aw} \cdot \frac{\xi_0}{U/2} = \frac{U_0\xi_0}{U/2}\sin(\omega t)$$
$$P_{Bw} = u'_{Bw} \cdot \frac{\xi_0}{U/2} = \frac{U_0\xi_0}{U/2}\sin(\omega t - 2\pi/3)$$
$$P_{Cw} = u'_{Cw} \cdot \frac{\xi_0}{U/2} = \frac{U_0\xi_0}{U/2}\sin(\omega t - 4\pi/3)$$

Dado que se deve ter

$$-\xi_0 < P_{Aw}, P_{Bw}, P_{Cw} < \xi_0$$

As tensões $u'_{Aw}, u'_{Bw}, u'_{Cw}$ devem apresentar uma amplitude (valor de crista) tal que

$$-U/2 < U_0 < U/2$$

Como geralmente

$$U_0 = r\,U/2 \qquad 0 < r < 1$$

É possível escrever:

$$P_{Aw} = r\xi_0 \sin(\omega t)$$
$$P_{Bw} = r\xi_0 \sin(\omega t - 2\pi/3)$$
$$P_{Cw} = r\xi_0 \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

O coeficiente *r* designa-se índice de modulação.

Normalizando a amplitude da portadora (ou seja fazendo $\xi_0 = 1$) tem-se:

$$P_{Aw} = r\sin(\omega t)$$
$$P_{Bw} = r\sin(\omega t - 2\pi/3)$$
$$P_{Cw} = r\sin(\omega t - 4\pi/3)$$

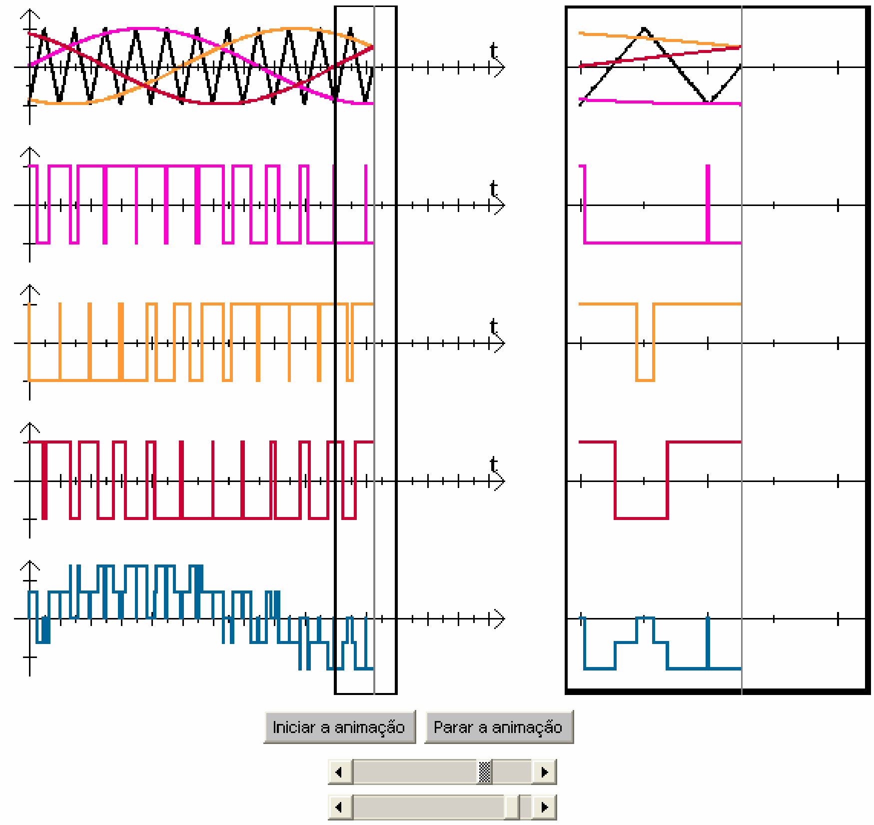

Figura 2

3. MODULAÇÃO OPTIMIZADA

A modulação MLI sinusoidal (seno-triângulo) pode ser optimizada fazendo:

$$P_{Aw} = r\sin(\omega t) + P_0(t)$$
$$P_{Bw} = r\sin(\omega t - 2\pi/3) + P_0(t)$$
$$P_{Cw} = r\sin(\omega t - 4\pi/3) + P_0(t)$$

Desde que se escolha convenientemente $P_0(t)$.

Por exemplo, uma boa escolha consiste em fazer com que P_0 seja capaz de centrar as referências (modulantes) em relação à portadora.

Se u'_{kw} for a mais alta das tensões de referência e se u'_{jw} for a mais baixa, centram-se as referências fazendo

$$P_0 = -\frac{(u'_{jw} + u'_{kw})}{2} \frac{\xi_0}{U/2}$$

Pode então obter-se na saída uma amplitude máxima da 1ª harmónica das tensões que pode atingir $1,15U/2$.