

Pontes Inversoras Trifásicas com Fonte de Tensão

Operação nos modos seis-pulsos e modulação senoidal

Prof. Dr. José Roberto B. A. Monteiro

Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

30 de junho de 2021



- ▶ Modo de Operação em Seis-Pulsos (*six-step*)
- ▶ Modo de Operação Utilizando Modulação em Largura de Pulso (PWM)



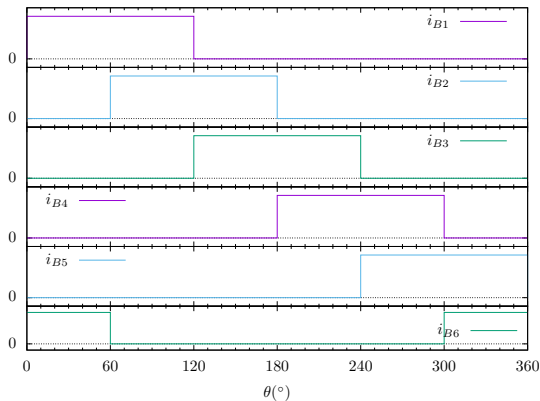
Modo Seis-Pulsos

- ▶ Modo Seis-Pulsos 120° ou com 2 chaves em condução simultânea
- ▶ Modo Seis-Pulsos 180° ou com 3 chaves em condução simultânea



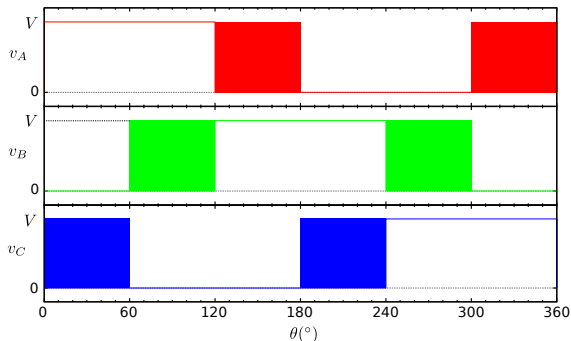
Modo Seis-Pulsos 120°

Forma de onda das correntes de base (ideais)



Modo Seis-Pulsos 120°

Forma de onda das tensões de fase na saída da ponte inversora

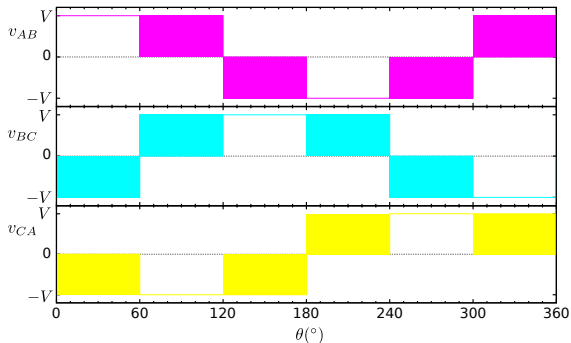


As áreas sólidas significam que a tensão pode ser qualquer valor entre 0 e V , dependendo da carga.



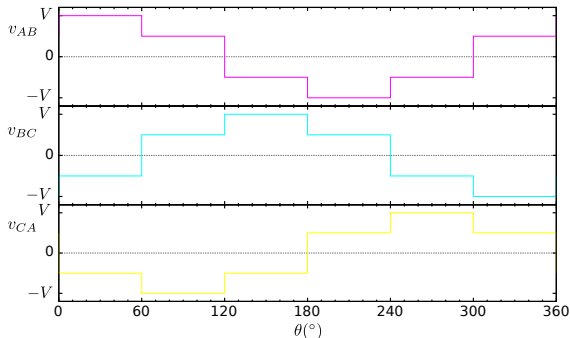
Modo Seis-Pulsos 120°

Forma de onda das tensões de linha na saída



Modo Seis-Pulsos 120° – Carga R

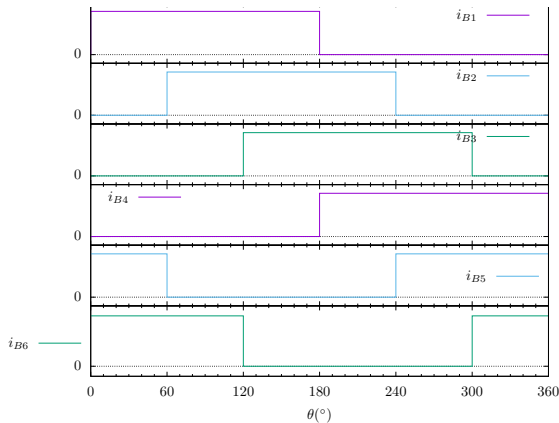
Forma de onda das tensões de linha para uma carga puramente resistiva equilibrada.



Tensão eficaz de linha: $V_R = \frac{\sqrt{2}}{2} V$

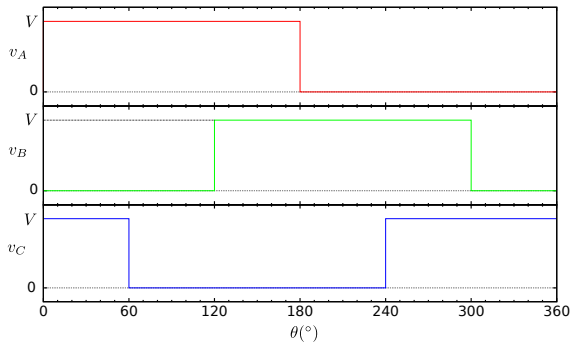


Forma de onda das correntes de base (ideais)



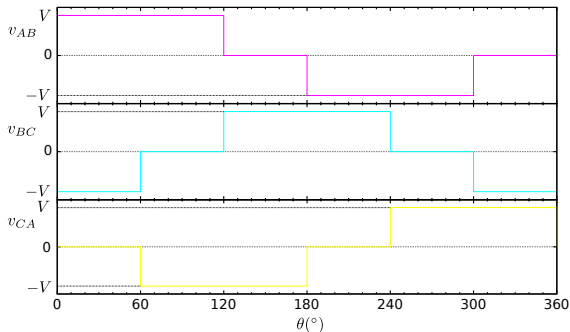
Modo Seis-Pulsos 180°

Forma de onda das tensões de fase na saída da ponte inversora



Modo Seis-Pulsos 180°

Forma de onda das tensões de linha na saída



Modo Seis-Pulsos 180°

Tensão eficaz de linha: $V_R = \sqrt{\frac{2}{3}}V \approx 0.8165V$

Tensão eficaz de 1º harmônico: $V_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi}V \approx 0.7797V$

Fator de Distorção Harmônica da tensão: $FDH = \frac{3}{\pi} \approx 0.9549$

Distorção Harmônica Total: $THD \approx 31.08\%$



Tipos Principais de Modulação

- ▶ Modulação em Largura de Pulso Escalar
- ▶ Modulação em Largura de Pulso Vetorial

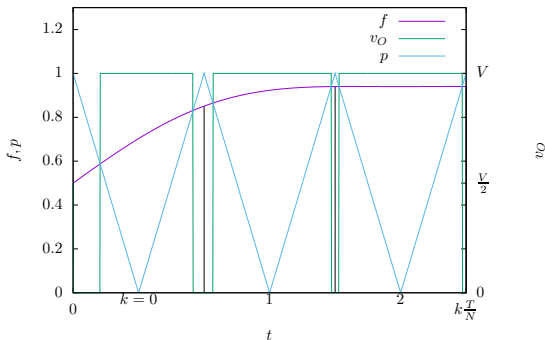


- ▶ Modulação em largura de pulso senoidal
- ▶ Modulação em largura de pulso com injeção de 3º harmônico
- ▶ Modulação em largura de pulso com subtração de valor mínimo/máximo



Geração analógica de MLP

Comparação de uma função modulante qualquer (g) com uma portadora triangular (p) para geração da tensão de saída (v_O) em um conversor operando por modulação em largura de pulso (PWM).



Modulação em Largura de Pulso Senoidal

PWM Senoidal

$$\begin{aligned}g_A(\omega t) &= \frac{1}{2} + M \frac{1}{2} \sin \omega t \\g_B(\omega t) &= \frac{1}{2} + M \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\g_C(\omega t) &= \frac{1}{2} + M \frac{1}{2} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)\end{aligned}\tag{1}$$

Onde: g_a , g_b e g_c são funções senoidais utilizadas para comparação com uma portadora triangular, M é o índice de modulação, de 0 a 1, e w é a frequência angular do componente fundamental desejado da tensão de saída.



Considerando uma frequência de portadora alta em relação à frequência fundamental, pode-se escrever o primeiro harmônico de tensão de saída como:

$$\begin{aligned}v_{A1}(\omega t) &= V \left(\frac{1}{2} + M \frac{1}{2} \sin \omega t \right) \\v_{B1}(\omega t) &= V \left(\frac{1}{2} + M \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\v_{C1}(\omega t) &= V \left(\frac{1}{2} + M \frac{1}{2} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right)\end{aligned}\tag{2}$$



MLP Senoidal: tensões de linha

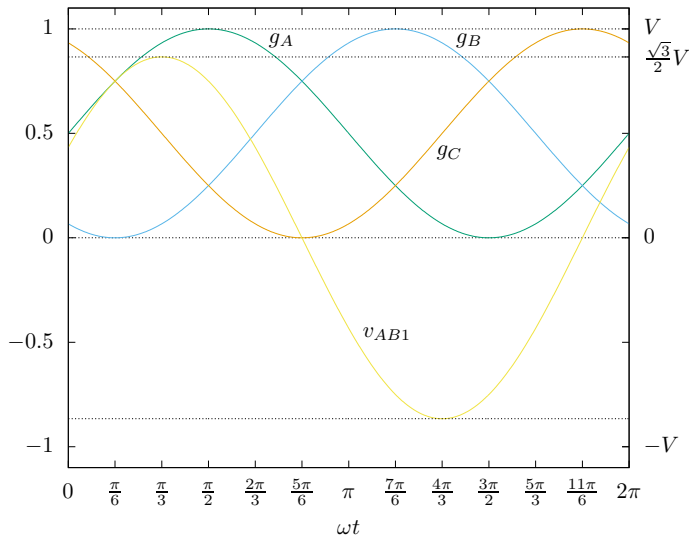
As tensões de linha de 1º harmônico para o PWM senoidal são:

$$\begin{aligned}v_{AB1}(\omega t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}MV \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \\v_{BC1}(\omega t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}MV \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \\v_{CA1}(\omega t) &= \frac{\sqrt{3}}{2}MV \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right)\end{aligned}\tag{3}$$

Como M varia de 0 a 1, tem-se que o valor de pico da tensão de linha, com $M = 1$, é de $0,866 \cdot V$ e não de V . Ou seja, não se aproveita toda a tensão do barramento.



MLP Senoidal: tensões de linha



Exemplo

Um inversor, operando no modo seis-pulsos 180° , possui uma tensão de barramento de 300V e alimenta uma carga RLC série em triângulo. Calcule a potência média dissipada pela carga para $R = 10\Omega$, $L = 1mH$ e $C = 100\mu F$ operando em uma frequência de 60Hz na saída.

Resolução:

A tensão de linha, que é aplicada a cada fase da carga, é equivalente à forma de onda de tensão da modulação em largura de pulso simples, vista na aula de inversores monofásicos em ponte completa:

$$v_{AB}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \sin(n(\omega t - \pi/6)) \quad (4)$$



$$V_1 = \frac{4 \cdot 300}{\sqrt{2} \cdot \pi} \sin \frac{\pi}{3} = 233,9V$$

$$V_3 = 0$$

$$V_5 = 46.78V$$

$$V_7 = 33,42V$$

$$V_9 = 0$$

$$V_{11} = 21,26V$$

$$V_{13} = 17.99$$

$$V_{17} = 13.75V$$

$$X_{L1} = \omega L = 2\pi 60 \cdot 1m = 0,376\Omega$$

$$X_{c1} = 1/(\omega C) = 1/(2\pi 60 \cdot 100e-6) = 26,53\Omega$$



$$|Z_1| = \sqrt{10^2 + (0,376 - 26,53)^2} = 28\Omega$$

$$|Z_5| = \sqrt{10^2 + (5 \cdot 0,376 - 26,53/5)^2} = 10,56\Omega$$

$$|Z_7| = 10,07\Omega$$

$$|Z_{11}| = 10,15\Omega$$

$$|Z_{13}| = 10,4\Omega$$

$$|Z_{17}| = 11,11\Omega$$

$$I_{OR} \approx 10,54\text{A (até o } 23^\circ)$$

$$I_{OR} \approx 10,63\text{A (até o } 101^\circ)$$

$$P_{O1\phi} = P_R = I_{OR}^2 R = (10,63)^2 10 = 1131\text{W}$$

$$P_O = 3P_{1\phi} = 3394\text{W}$$



Exemplo 2

Repita o exercício anterior, mas substituindo o indutor por outro de 100mH.

$$|Z_1| = 14,99\Omega$$

$$|Z_5| = 183,5\Omega$$

$$|Z_7| = 260,3\Omega$$



Exemplo 2

$$I_1 = 15,60\text{A}$$

$$I_3 = 0$$

$$I_5 = 0,255\text{A}$$

$$I_7 = 0,128\text{A}$$

$$I_{OR} \approx 15,60\text{A}$$

$$P_O = 3 \cdot 10 \cdot 15,60^2 = 7305\text{W}$$



Exemplo 3

Repita o exercício anterior, mas conectando a carga em estrela.

Resolução: Como não temos a equação para a tensão de fase na carga em estrela, iremos fazer uma transformação **matemática** de estrela para triângulo

$$\Rightarrow Z_{\Delta} = 3 \cdot Z_Y = 3(R + j(X_{L1} - X_{C1})) = (3R + j(3X_{L1} - 3X_{C1}))$$

$$R' = 30\Omega$$

$$X_{L1} = 2\pi \cdot fL = 37,7\Omega \Rightarrow X'_{L1} = 113,1\Omega$$

$$X_{C1} = 26,53\Omega \Rightarrow X'_{C1} = 79,59\Omega$$

$$|Z_1| = 44,97\Omega$$

$$|Z_3| = 315,2\Omega$$

$$|Z_5| = 550\Omega$$



Exemplo 3

$$I_1 = 5,20\text{A}$$

$$I_3 = 0$$

$$I_5 = 0,085$$

$$I_{OR} \approx 5,20\text{A}$$

$$P_O = 3 \cdot 10 \cdot 5,20^2 = 811\text{W}$$

