

PEA2503 Laboratório de Qualidade de Energia

Inversores operando com Modulação em Largura de Pulso

Prof. Lourenço Matakas Jr Versão 23/9/2014

1. Objetivos

- Rever os conceitos relativos à operação de conversores auto-comutados operando com modulação em largura de pulso (formas de onda, geração do sinal PWM, espectro das tensões e correntes resultantes, filtragem das tensões e correntes);

2. Conversores CA-CC autocomutados (revisão teórica)

Serão apresentados nos próximos itens uma breve revisão da teoria de inversores operando com modulação em largura de pulso [1] [2]. Este tipo de conversor tem larga aplicação na implementação de inversores para motores CA, sistemas de alimentação ininterrupta (No-Break), interfaces entre sistemas geradores de energias alternativas e armazenadores de energia com a rede elétrica, compensadores de perturbações na rede, etc.

2.1 Conversor CA-CC (inversor) Monofásico

A figura 1 mostra o circuito de um conversor CA-CC monofásico do tipo fonte de tensão, também conhecido como inversor. As chaves S1 e S2 operam de modo complementar, ou seja,  $S_2 = \overline{S_1}$ . A figura 1 também mostra a forma de onda do sinal de acionamento da chave superior S1, e a forma de onda da tensão de saída  $v_c(t)$  correspondente. Obtém-se assim um a tensão  $v_c(t)$  alternada com valor de pico  $+V_d$ .

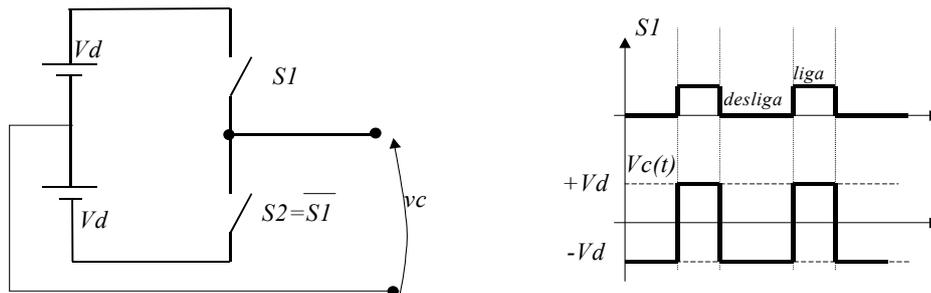


Figura 1 Inversor Autocomutado Monofásico, tipo fonte de tensão

As chaves devem ser autocomutadas, ou seja, devem ter a habilidade de ligar ou desligar, independentemente da carga, apenas obedecendo ao sinal de comando. Lembrar que nos tiristores, por exemplo, tem-se controle apenas do instante de ligação do circuito, ficando o instante de desligamento dependente da carga. Um diodo por seu lado, é uma chave que não permite controle dos instantes de chaveamento. A figura 2 ilustra algumas possibilidades de chaves autocomutadas [2].

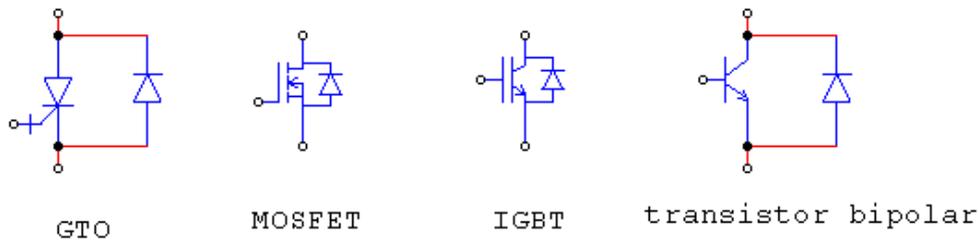


Figura 2 chaves empregadas em conversores auto-comutados

## 2.2 Modulação em largura de pulso

O inversor da figura apresenta apenas dois níveis distintos de tensão,  $+V_d$  e  $-V_d$ . A maioria das aplicações acima citadas requer a geração de valores intermediários de tensão entre  $-V_d$  e  $+V_d$ . Na impossibilidade de se obterem instantaneamente valores intermediários, opta-se por criar uma tensão  $v_c(t)$ , retangular, com período  $T_s$  (fixo ou variável) com dois níveis ( $\pm V_d$ ). A cada ciclo  $T_s$ , variam-se as durações de tempo que  $v_c(t)$  permanece em  $-V_d$  e  $+V_d$ , de modo que a média local de  $v_c(t)$  durante o período  $T_s$  seja igual ao valor de tensão desejado. Em outras palavras, desejando-se sintetizar um sinal arbitrário  $v_{ref}(t)$  a partir de um inversor com dois níveis  $\pm V_d$ , deve-se gerar um sinal  $v_c(t)$ , com largura de pulso variável de tal modo a garantir que a média local de  $v_c(t)$  seja igual à de  $v_{ref}(t)$ , num período  $T_s$ .

A figura 3 mostra as formas de onda do sinal desejado  $v_{ref}(t)$  e do sinal modulado em largura de pulso (PWM-pulse with modulation)  $v_c(t)$  na saída do inversor. O sinal de referência  $v_{ref}(t)$  têm valor de pico de 100V, frequência de 60Hz. O inversor opera com  $V_d = 100V$ , com vinte chaveamentos por ciclo de 60Hz, ou seja  $T_s = 16.666ms / 20$ . A análise da figura 3 mostra que na proximidade das passagens de  $v_{ref}(t)$  por zero, o valor médio de  $v_c(t)$  é aproximadamente nulo. Próximo do pico positivo (negativo) de  $v_{ref}(t)$  a saída  $v_c(t)$  fica praticamente todo o tempo em  $+V_d$  ( $-V_d$ ).

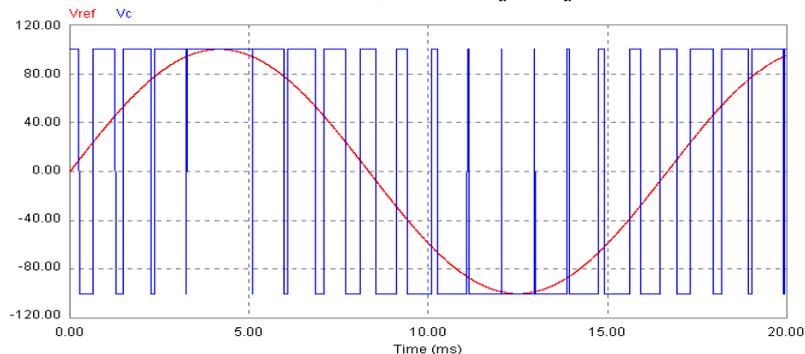


Figura 3 Formas de onda do sinal desejado  $v_{ref}(t)$  e do sinal modulado em largura de pulso  $v_c(t)$  na saída do inversor

Existem diversas estratégias para se conseguir o sinal modulado em largura de pulso  $v_c(t)$ . A mais utilizada é a modulação com portadora triangular, mostrada na figura 4, na qual o sinal de referência é comparado instantaneamente com um sinal triangular  $v_{tri}(t)$ , com valor de pico igual a  $+V_d$ , e período igual a  $T_s$ , que corresponde ao período de chaveamento do inversor. Se  $v_{ref}(t) > v_{tri}(t)$ , impõe-se  $v_c(t) = +V_d$ . Se  $v_{ref}(t) < v_{tri}(t)$ , impõe-se  $v_c(t) = -V_d$ . O diagrama de blocos do modulador associado ao inversor monofásico é mostrado na figura 5.

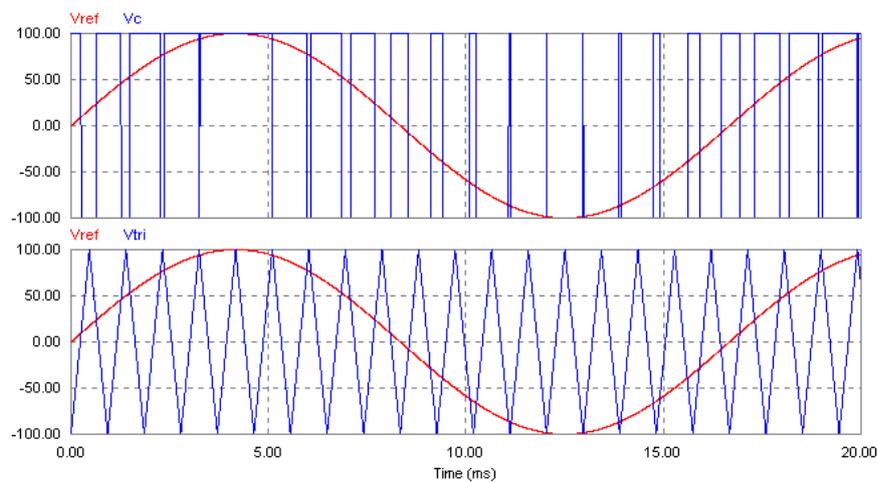


Figura 4 Modulador com Portadora triangular- formas de onda de  $v_{ref}(t)$ ,  $v_c(t)$  e  $v_{tri}(t)$

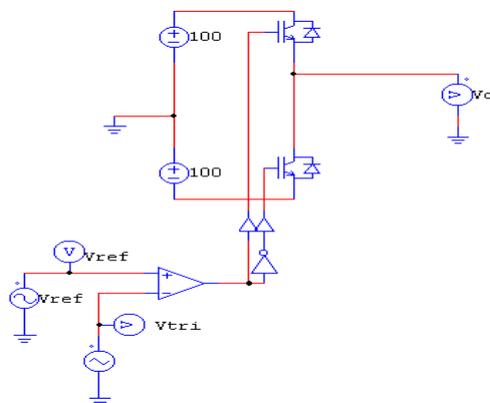


Figura 5 Modulador com Portadora triangular- diagrama de blocos + inversor

### 2.3 Espectro da Tensão gerada por Modulador PWM

Aplicando-se ao modulador PWM com portadora triangular um sinal  $v_{ref}(t)$  senoidal com amplitude  $V_{pico}$ , fase  $\alpha$  e frequência  $f$  (vide figura 6a com  $V_{pico}=1$ ), obtém-se na saída do inversor a tensão  $v_c(t)$  mostrada na figura 6a. Na figura 6 foi utilizada portadora triangular com frequência  $f_m = 30f$ . O espectro de  $v_c(t)$  (fig. 6b) mostra que seu componente fundamental apresenta a mesma amplitude que o sinal desejado  $v_{ref}(t)$ . Apesar de não

mostrado, afirma-se que a fase do componente fundamental de  $v_c(t)$  é a mesma que a de  $v_{ref}(t)$ . Este importante resultado, mostra que apesar da tensão  $v_c(t)$  ser retangular e aparentemente não ter nenhuma semelhança com  $v_{ref}(t)$ , ela pode ser decomposta em duas parcelas: uma na frequência  $f$ , idêntica a  $v_{ref}(t)$  e outra correspondente à soma de harmônicos que se situam nas proximidades dos múltiplos da frequência de chaveamento  $f_m$ . A minimização, ou seja, a filtragem desta segunda parcela será abordada a seguir.

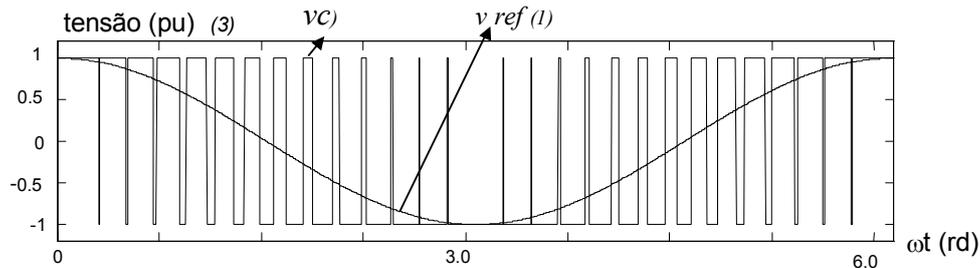


Figura 6a Formas de onda de  $v_{ref}(t)$  e  $v_c(t)$

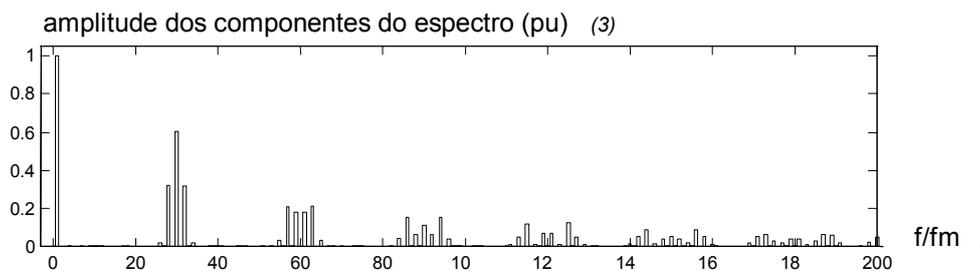


Figura 6b Espectro de  $v_c(t)$  ( $V_{pico} = 1$ ,  $V_d = 1$  e 30 pulsos por ciclo do sinal modulador)

#### 2.4 Filtragem da Corrente/ Tensão na saída do Inversor

Existem basicamente dois tipos de carga, as que requerem corrente filtrada, e as que requerem tensão filtrada. No primeiro grupo podem-se citar os motores CA, onde o torque depende da corrente nos enrolamentos. Neste caso a indutância e resistência do motor formam um filtro de primeira ordem. Neste primeiro grupo podem ser incluídas as aplicações de conversores conectados em paralelo com a rede, injetando corrente na mesma, tais como os geradores de reativos, filtros ativos, retificadores com elevado fator de potência, etc. Nestes, um indutor é inserido entre a rede e o inversor. No segundo grupo, incluem-se os inversores destinados a sistemas ‘Nobreak’, que requerem uma tensão filtrada.

As cargas do primeiro tipo podem ser representadas simplificadaamente pelo modelo da figura 7, contendo um ramo RL e uma eventual tensão  $e_a(t)$ . A amplitude  $I_{ef}(h)$  do componente de corrente de  $h^{\text{ésima}}$  ordem é dado pela eq.1.

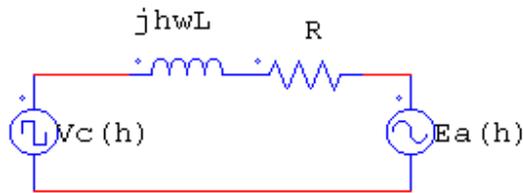


Figura 7 Circuito equivalente do filtro de corrente

$$I_{ef}(h) = \frac{|\dot{V}_{c_{ef}}(h) - \dot{E}_{a_{ef}}(h)|}{|R + jh\omega L|} \quad (1)$$

onde :  $\dot{V}_{c_{ef}}(h)$  : fasor correspondente ao  $h^{\text{ésimo}}$  harmônico de  $v_c(t)$   
 $\dot{E}_{a_{ef}}(h)$  : fasor correspondente ao  $h^{\text{ésimo}}$  harmônico de  $e_a(t)$   
 (geralmente é nulo para  $h > 1$ )

Nota-se para  $\omega \gg R/L$ , e supondo que a tensão  $e_a(t)$  não contenha harmônicos, tem-se:

$$I_{ef}(h) \sim \frac{|\dot{V}_{c_{ef}}(h)|}{h\omega L} \quad (2)$$

A eq. 2 mostra que a amplitude da corrente decai com o inverso da frequência, caracterizando o comportamento de um filtro passa baixas.

O filtro para as cargas que requerem tensão filtrada é composto por um indutor e um capacitor, conforme mostrado na figura 8. A carga é representada pelo resistor R.

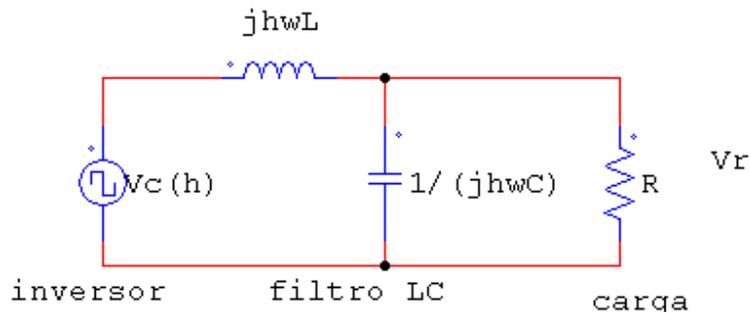


Figura 8 Circuito equivalente do filtro de tensão

Cada componente harmônico da tensão de saída  $v_r(t)$  pode ser calculado a partir da figura 8, e do conhecimento do espectro de  $v_c(t)$  de modo similar ao que indicado para o filtro de corrente.

### 3. Estudo do conversor CA-CC via Simulação

#### 3.1.1 Formas de Onda com carga RL

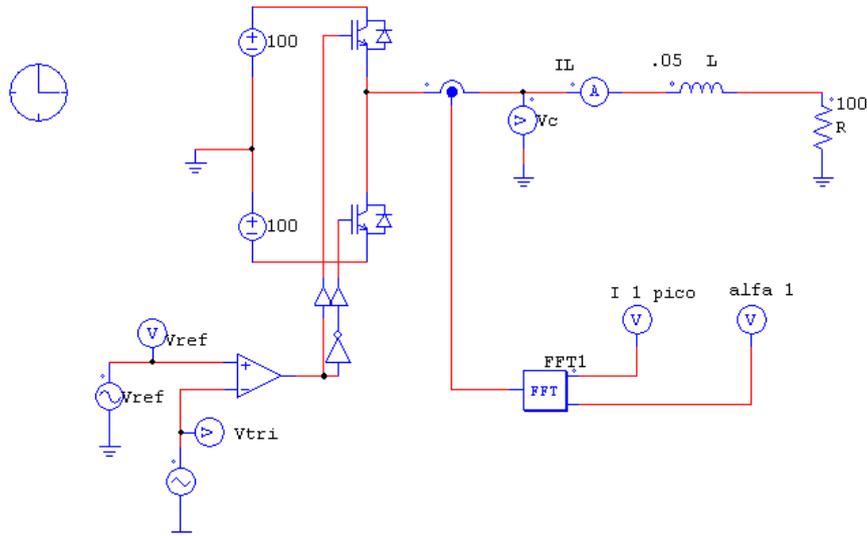


Figura 9 Circuito do inversor mais filtro RL

Utilizando o arquivo **exp6A.sch**, mostrado na figura 9 com:

- valor de pico de  $v_{ref}(t)=100V$ , frequência de 60Hz
- $V_d=100V$
- Frequência da portadora triangular =1200Hz
- $R=100\Omega$  e  $L=0.02H$

Pedem-se:

- Em um mesma página, plotar três gráficos, o primeiro com  $v_{ref}(t)$ ,  $v_c(t)$  e  $v_{tri}(t)$ ; o segundo com  $i_L(t)$ ,  $I_{1\_pico}$  (fundamental de  $i_L(t)$ ) e o terceiro com  $\alpha_1$  (fase de  $i_L(t)$  com relação a  $v_{ref}(t)$ );
- repetir o item a com  $L=0.1H$
- explicar a forma de onda de  $i_L(t)$  e sua relação com  $v_c(t)$  e com o valor de  $L$ .
- O que acontece com a ondulação, valor de pico da fundamental e da defasagem ao se aumentar  $L$ ?
- Calcular os valores do pico e da defasagem da fundamental da corrente  $i_L(t)$  e compará-los com os valores obtidos acima, via simulação.
- É vantajoso aumentar o valor de  $L$  para se reduzir a ondulação de corrente? Qual seria um valor limite para o valor de  $L$ ?

#### 3.1.2 Espectros das Tensões e Correntes

- Para  $L=0.02H$  obtenha em uma única página com dois gráficos, os espectros de  $v_c(t)$  e  $i_L(t)$ . Lembrar de “janelar” um ciclo da formas de onda. Sugere-se alterar o eixo x para exibir a faixa  $0 < f < 5000Hz$ .
- Repita o item a para  $L=0.1H$ .

- c. Para os dois valores de  $L$ , obtenha os componentes de 60Hz e 1200Hz da tensão  $v_c(t)$ , calcular os correspondentes componentes da corrente  $i_L(t)$  e compará-los aos valores obtidos nos itens acima.
- d. Compare os espectros os dois valores de indutância.

### 3.1.3 Influência da Frequência de Chaveamento

- a. Para  $L=0.02H$ , simular o sistema para frequência de portadora de 6000Hz, plotando em uma página os três gráficos do item 3.1.1a.
- b. Explicar o que aconteceu com a ondulação da corrente a partir do cálculo dos componentes harmônicos de 60 e 6000Hz e sua comparação com os valores obtidos via simulação.
- c. Comentar sobre a conveniência da operação com maiores frequências de chaveamento. Comparar os prós e contras de se aumentar  $L$  ou a frequência de chaveamento para a redução da ondulação na corrente

### 3.1.4 Influência do Índice de Modulação no espectro da tensão

- a- Para frequência de portadora de 1200Hz obtenha o espectro de  $v_c(t)$  (**janelar um ciclo!!!**) variando-se o valor de pico de  $v_{ref}(t)$ . Sugerem-se os valores: 100V, 60V, 30V e 0V. Comentar o comportamento dos grupos de harmônicos de alta frequência (amplitude e largura dos grupos de harmônicos), com a mudança da amplitude de  $v_{ref}(t)$ .
- b- Discutir a viabilidade de se operar um inversor com tensões de saída muito menores que a tensão CC ( $V_d$ )

### 3.1.5 Filtro de tensão

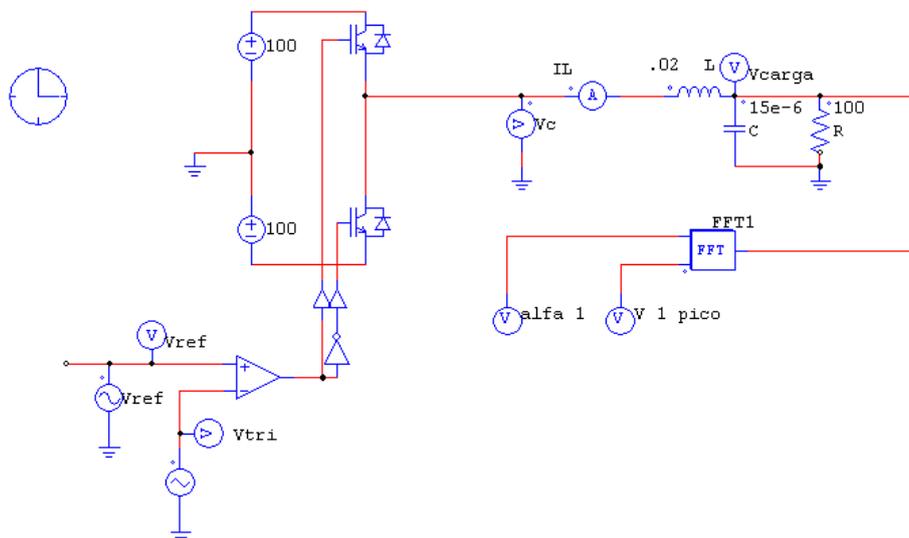


Figura 10 Circuito do inversor mais filtro LC

- a. Simular o sistema definido no arquivo **exp6-B.sch** plotando três gráficos em uma única página. O primeiro com os gráficos de  $v_{ref}(t)$ ,  $v_{carga}(t)$  e

$v_{1\_pico}$  (fundamental de  $v_{carga}(t)$ ); o segundo com  $i_L(t)$ , e o terceiro com  $\alpha_1$  (defasagem da fundamental de  $v_{carga}(t)$  com relação a  $v_{ref}(t)$ .)

- b. Plotar em um único gráfico os espectros de  $v_{carga}(t)$  e  $v_c(t)$ , calcular a atenuação ( $V_{carga\_pico} / V_{c\_pico}$ ) para a frequência de chaveamento e comparar com o valor teórico.
- c. Porque a corrente no indutor no caso RLC é parecida com a do caso RL?

### **3. Bibliografia**

[1] Matakas; Lourenço Jr, Inversores Autocomutados; Apostila PEA-EPUSP-2001

[2] Mohan; Undeland; "Power Electronics",