

SINGLE PHASE SINUSOIDAL INVERTER OPERATING ISOLATED DESIGN AND IMPLEMENTATION

Ernani A. Zielinski e João A. Vilela Jr

Universidade Federal do Paraná – UFPR

Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Politécnico – Curitiba - PR

ernanieaz@hotmail.com

Abstract. This paper presents the design and development of an isolated network sinusoidal frequency inverter with power of 230 W. The inverter operates with sinusoidal pulse width modulation (SPWM) three tiers and switching frequency of 40 kHz. The control is implemented digitally using the ARM® Cortex™-M4F Microcontroller. Project phases, such as sizing of the power devices and inductor construction details are presented. Electromagnetic interference problems are taken into consideration in the construction of the layout of the printed circuit board. A prototype was built and experimental results are presented, showing that for input voltages of 180 V to 250 V continuous to sinusoidal voltage converter output was set at 127 V effective in frequency of 60 Hz. These results validate the design methodology.

Palavras-chave: Controle digital, Inversor de frequência senoidal, Modulação PWM.

1. INTRODUÇÃO

Os inversores são utilizados para fazer a interligação de geradores eólicos, painéis fotovoltaicos e outras unidades geradoras de energia com a rede de distribuição. Rashid et al. [1] mostra outra aplicação importante desse equipamento no acionamento dos motores elétricos de indução e síncronos.

Nesse artigo, o inversor está gerando uma tensão senoidal para alimentar cargas isoladas, a partir de tensão contínua, que pode ser um banco de baterias. Essa

configuração é semelhante a de um nobreak, que quando há uma interrupção no abastecimento de energia passa a gerar uma tensão senoidal para suprir as cargas.

Existem várias topologias de inversor e tipos de modulação para obter uma tensão senoidal a partir de uma tensão contínua. Nesse trabalho será utilizada a modulação por largura de pulso senoidal (SPWM) a três níveis.

2. MODO DE OPERAÇÃO

O Inversor utilizado nesse trabalho é monofásico do tipo ponte completa, veja Figura 1. Barbi et al. [2] apresenta o princípio de operação desse conversor. No intervalo que o interruptor S1 está conduzindo e S2 não, a tensão no ponto Va é igual à tensão do barramento Vcc. Quando S2 conduz e S1 não, a tensão Va é igual a zero. Os dois interruptores de um braço não devem conduzir simultaneamente, pois a fonte Vcc ficaria em curto-circuito.

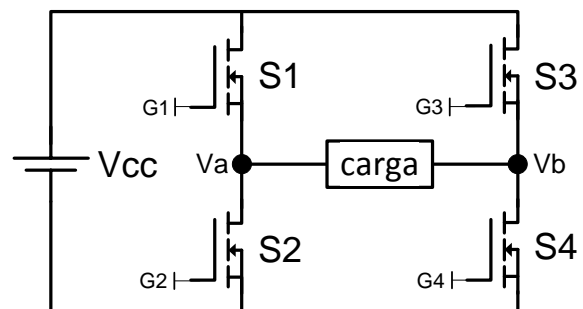


Figura 1. Topologia ponte completa.

Para gerar a tensão senoidal na saída do inversor é utilizada a SPWM a três níveis. A

Figura 2 mostra essa técnica, onde duas senóides defasadas de 180° são comparadas com uma triangular, determinando os sinais de comando dos interruptores. Cada braço do inversor é comandado pela comparação de uma das senóides com a triangular.

Em um semiciclo da senoide a tensão V_a vai ter largura de pulso maior que a da tensão V_b e no outro semiciclo ocorre o inverso. A tensão na carga é a diferença da tensão V_a com a tensão V_b . Dessa forma, no semiciclo que V_a tem largura de pulso maior, a tensão na carga vai ser V_{cc} ou zero e no outro semiciclo será $-V_{cc}$ ou zero. A frequência da tensão produzida na carga (V_{ab}) é o dobro da frequência de operação dos interruptores, sendo essa uma importante vantagem da modulação a três níveis.

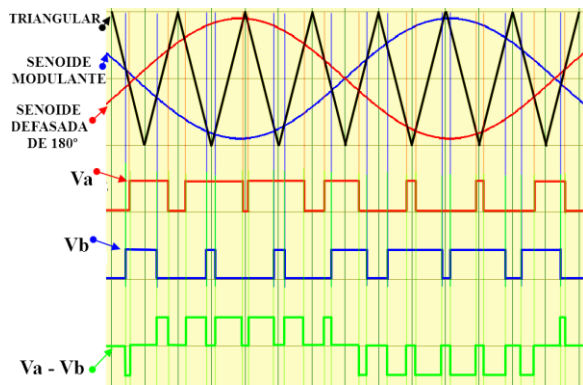


Figura 2. Sinal de controle com a modulação SPWM a três níveis.

A frequência de operação dos interruptores foi de 40 kHz, e o filtro de saída LC foi projetado para a frequência de 80 kHz devido à modulação a três níveis.

A malha de controle da tensão do inversor está ilustrada no diagrama de blocos da Figura 3. A tensão senoidal na saída do inversor é amostrada e seu valor eficaz é calculado. O valor eficaz da tensão é comparado com um valor de referência e o erro entre esses sinais passa por um compensador. O sinal na saída do compensador altera a amplitude da senoide modulante e, por consequência, o valor eficaz da tensão na saída do inversor.

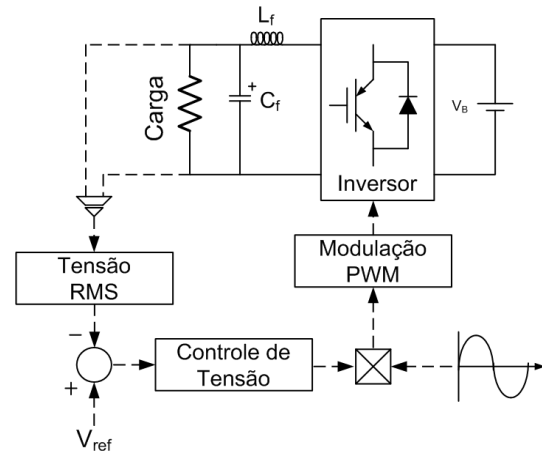


Figura 3. Diagrama de blocos do controle da tensão na saída do inversor.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO INVERSOR

O primeiro passo na construção do inversor é definir um microcontrolador que permita gerar a modulação SPWM e implementar na forma digital a lógica de controle apresentada na Figura 3. O microcontrolador escolhido foi o ARM® Cortex™-M4F.

Os interruptores escolhidos foram os MOSFETs IRF840 e para o acionamento dos braços de interruptores foram utilizados os drivers IR2104. Um circuito na saída dos drivers foi utilizado para gerar tensão negativa no Gate dos MOSFETs evitando acionamento indevido. O esquemático do circuito completo é apresentado na Figura 4.

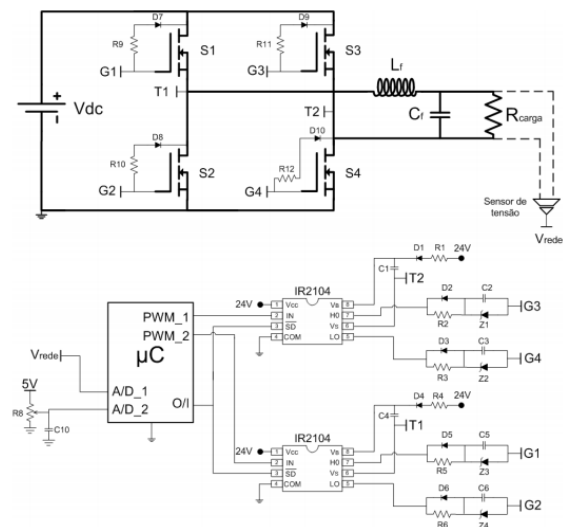


Figura 4. Esquema do inversor.

O circuito de amostragem da tensão é composto por um transformador abaixador, um divisor resistivo e um circuito capaz de aplicar um offset neste sinal para que possa ser lido pelo microcontrolador. Também conta com um filtro anti-aliasing, este serve para retirar sinais de frequências mais altas que metade da frequência de amostragem, evitando erros devido ao efeito aliasing. O filtro anti-aliasing utilizado nesse projeto é um filtro passa baixa de primeira ordem com frequência de corte em 4 kHz. O circuito é apresentado na Figura 5.

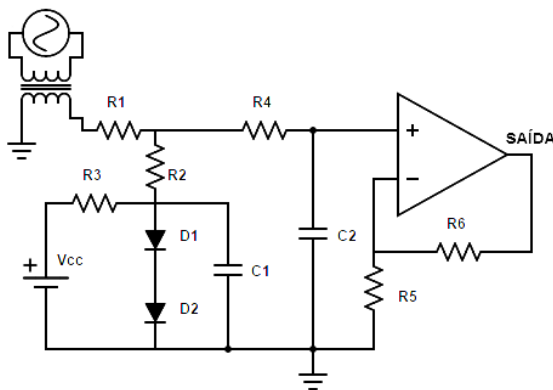


Figura 5. Circuito de condicionamento da tensão de saída do inversor.

Ao chavear os MOSFETS gera-se um sinal retangular em alta frequência na saída do inversor que contém uma componente senoidal em baixa frequência (60 Hz), com amplitude proporcional ao sinal senoidal utilizado para fazer a modulação *SPWM* a três níveis. Para eliminar a componente em alta frequência e manter apenas a senóide de baixa frequência é adicionado na saída do inversor um filtro passa baixa, composto por um indutor e um capacitor.

O indutor do filtro de saída (L_f) pode ser calculado através da Eq. (1), e alterado de acordo com a necessidade da variação de corrente do projeto com a Eq. (2), onde ΔI é a variação máxima de corrente desejada, V_{cc} é a tensão no barramento CC, e f a frequência de chaveamento do *SPWM*, C_f é o capacitor que é calculado através da Eq. (3) e

ζ o fator de amortecimento do filtro, tendo como referência de projeto Barbi et al. [2].

$$L_f = 1 / ((2/10) \times \pi \times f)^2 \times C \quad (1)$$

$$L_f \geq (\Delta I \times V_{cc}) / (\Delta I \times 4 \times f) \quad (2)$$

$$C_f = 10 / (4 \times \pi \times \zeta \times f \times R) \quad (3)$$

Utilizando os seguintes valores de projeto $\zeta = 1$, $R = 69 \Omega$ e $f = 80 \text{ kHz}$ na Eq.(3), obtemos $C_f = 144 \text{ nF}$. Com o valor de C_f e a frequência substituídos na Eq. (1) tem-se $L_f = 2,74 \text{ mH}$.

O indutor foi projetado com uma densidade de fluxo magnético de 0,3 T. O número de espiras é de 127 utilizando um entreferro de 1 mm, para suprir a corrente de 1,8 A. considerando a capacidade de corrente do cobre de 450 A/cm^2 são necessários $0,004 \text{ cm}^2$ de seção perpendicular do condutor ou 0,036 cm de raio. Todavia, em altas frequências, o efeito pelicular deve ser levado em consideração, onde a penetração máxima da corrente no condutor em 80 kHz é de 0,027 cm. Com isso faz-se necessário a utilização de dois fios em paralelo com raios menores que a penetração máxima, mais área total superior a $0,004 \text{ cm}^2$. A descrição dessa metodologia de projeto é apresentada por Mohan *et al.* [3].

O protótipo implementado pode ser visto na figura 7.

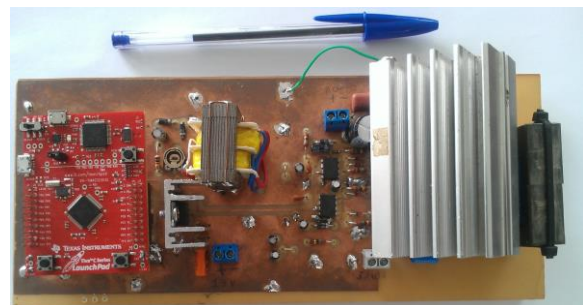


Figura 7. Protótipo.

Algumas considerações a respeito da interferência gerada pelo chaveamento devem ser observadas, o leiaute utilizado minimiza interferências eletromagnéticas no

circuito de controle, pois mantém esta etapa afastada da parte de potência, além de ter uma malha de terra sob os componentes.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram obtidos com o inversor operando numa condição próxima a nominal, alimentando uma carga resistiva de 69Ω . A tensão de referência foi ajustada para manter a tensão de saída em $127 V_{RMS}$. A Figura 8 foi obtida para o inversor operando com tensão 180 V no barramento CC. A Figura 9 foi obtida para o inversor operando com tensão 250 V no barramento CC.

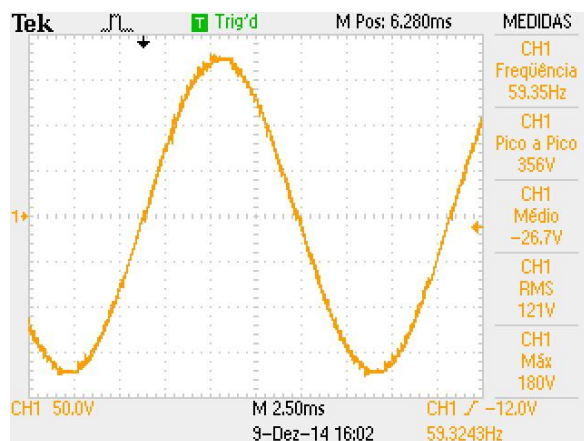


Figura 8. Tensão na saída do inversor com 180 V no barramento CC.

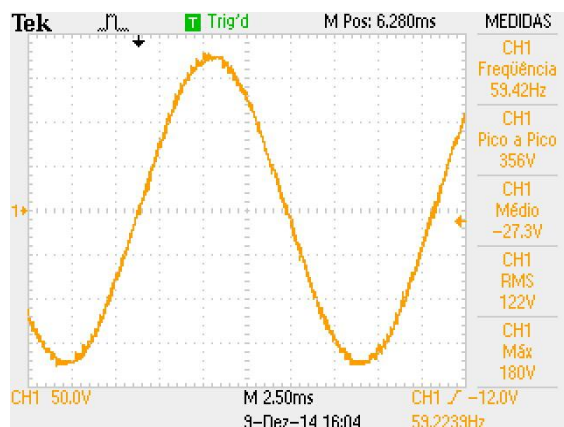


Figura 9. Tensão na saída do inversor com 250 V no barramento CC.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresentou aspectos de projeto e implementação de um inversor monofásico senoidal operando isolado. Os resultados experimentais mostram que a modulação *SPWM* foi efetiva, visto que a forma de onda da tensão na saída do inversor foi senoidal com baixa distorção harmônica, o que comprovam a validade do projeto executado.

O valor eficaz da tensão na saída do inversor permaneceu constante para uma ampla variação da tensão no barramento CC, mostrando que a malha de controle da tensão também operou adequadamente.

Agradecimentos

A realização deste projeto só foi possível graças à ajuda recebida de meu colega Orestes Beló Júnior.

REFERÊNCIAS

- [1] M.H. Rashid, *Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações*, 2ª edição, MAKRON books, 1999, pp. 436-467.
- [2] I. Barbi e D.C. Martins, *Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA*, Florianópolis: Edição dos Autores, 2008, pp. 393-395.
- [3] N. Mohan, *Eletrônica de Potência – Curso Introdutório*, editora LTC, 2014.