



CRICTE 2017

XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia



INVERSOR EM ÚNICO ESTÁGIO BASEADO NA TOPOLOGIA DUPLO FORWARD

João A. Vilela Jr.

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná
vilela@eletrica.ufpr.br

Marcelo A. Hartmann

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná
marcelo.hartmann@gmail.com

Resumo. *Este artigo apresenta o desenvolvimento de um microinversor para transferência de potência para a rede elétrica de baixa tensão, tendo como diferencial a adoção de uma nova topologia de conversão em único estágio. A potência nominal projetada para o inversor é 250 watts, com tensão de entrada em 50Vcc e saída em 127Vac. A comutação dos interruptores do primário ocorre em 80kHz e em seu controle é utilizado a técnica de modulação por largura de pulso (PWM) senoidal, que é refletida no secundário produzindo no filtro de saída uma corrente senoidal. A inversão do sentido da corrente é produzida através do acionamento dos interruptores do secundário que operam na frequência da rede, comutando sempre que a tensão da rede inverte de polaridade. A validação de resultados é apresentada através de um modelo desenvolvido em simulador com as devidas considerações das etapas de operação, controle e formas de onda.*

Palavras-chave: *Eletrônica de Potência. Inversores. Controle Digital.*

1. INTRODUÇÃO

Problemas ambientais e aumento da demanda estimularam o investimento para a geração de energia elétrica através de fontes renováveis. Dentre as alternativas, como demonstra Silva *et al.* [1], a geração

distribuída de energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma realidade capaz de trazer significativa contribuição a matriz energética mundial.

Tradicionalmente a conversão de energia solar fotovoltaica ocorre em dois estágios como na Ref. [1]. O primeiro CC-CC, onde é feita uma elevação da tensão de entrada, seguido por um estágio inversor CC-CA, que fará a injeção de corrente na rede elétrica.

Para, Brito *et al.* [2] e Srekanth *et al.* [3] a operação em dois estágios apresenta maior complexidade o que afeta o custo final do modelo. A opção apresentada por estes é o uso de topologias em um único estágio, integrando as etapas CC-CC e CC-CA.

Muitos conversores utilizam topologias derivadas da *forward* e *flyback*. Um destes métodos é a utilização do inversor *flyback* em condução descontínua, mas assim como o modelo de Ref. [3], o uso do indutor acoplado traz perdas significantes no entreferro e por essas razões não é indicado para sistemas de alta potência como mostra Barbi *et al.* [4].

Outro método para obter um inversor é na união de dois conversores CC-CC. Com esta metodologia várias estruturas podem ser desenvolvidas como demonstrado por Ref. [2], tendo em foco a elevação da vida útil médias destes sistemas.

Este artigo propõe-se a desenvolver uma topologia de microinversor em único estágio unindo dois conversores CC-CC *Forward*

operando em alta frequência com dois enrolamentos no secundário.

2. INVERSOR DUPLO FORWARD

A topologia proposta pode ser vista na Fig. 1, onde o enrolamento primário do transformador (N_p) recebe a tensão contínua da fonte, representada pela letra “E”, o tempo que o primário é exposto a essa tensão é controlado pelo chaveamento dos transistores S_1 e S_2 , desta forma limita-se a potência que será transferida à carga.

O microinversor possui quatro estágios de operação, demonstrados na Fig. 2. Para facilitar a compreensão a Fig. 3 apresenta as formas de onda em alta frequência do acionamento das chaves S_1 e S_2 , o comportamento da corrente no indutor de saída e no enrolamento primário do transformador.

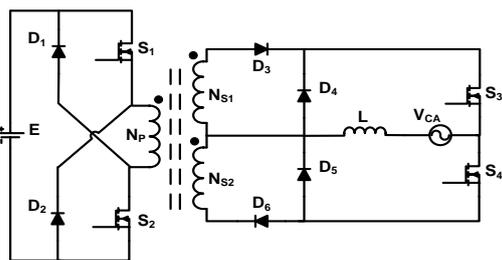


Figura 1. Inversor Duplo Forward.

A. Princípio de Funcionamento

No primeiro momento, Fig. 2 (A), as chaves S_1 e S_2 estão fechadas e a tensão da fonte (E) está sendo aplicada nos terminais do enrolamento primário do transformador (N_p). A chave S_3 também está conduzindo, enquanto que a S_4 está aberta, permitindo que a tensão no secundário do transformador (N_{S1}) seja aplicada no indutor de filtro (L) em série com a rede. Durante esse processo a energia é transferida tanto para a rede como para o indutor o qual armazena a energia em forma de campo magnético.

A segunda etapa de operação, Fig. 2 (B), ocorre quando há o bloqueio nos interruptores S_1 e S_2 , o que retira a tensão (E) do primário do transformador que passa por uma inversão de polaridade e inicia seu

processo de desmagnetização devolvendo a energia acumulada na indutância magnetizante para a fonte CC através dos diodos D_1 e D_2 .

Neste momento, também ocorre a inversão da tensão nos enrolamentos secundários do transformador e no indutor (L), onde os primeiros ficam bloqueados e o indutor passa a fornecer parte da sua energia armazenada para a rede elétrica através do diodo D_4 . Nesta etapa não há alterações nos estados dos transistores S_3 e S_4 .

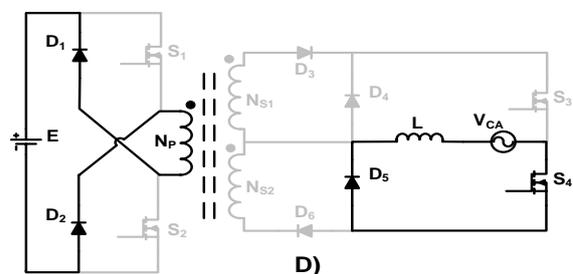
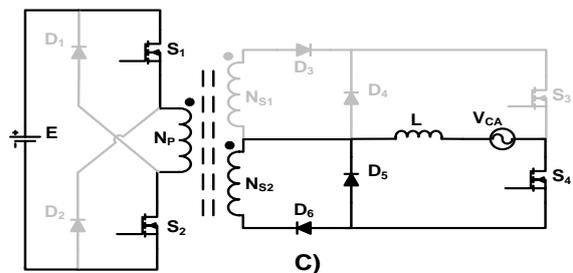
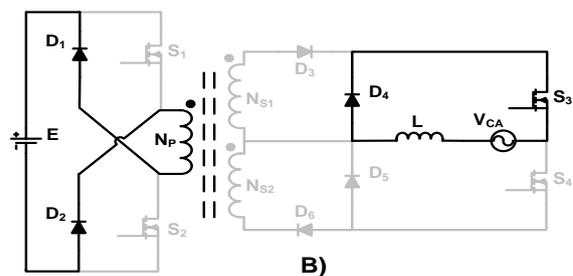
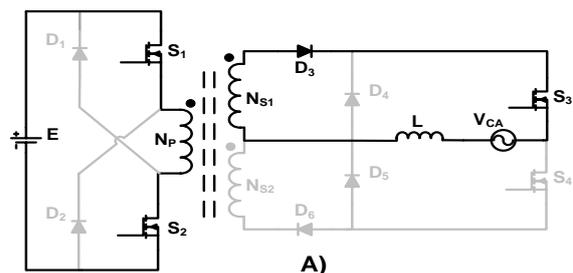


Figura 2. Estágios de Operação do Inversor Duplo Forward.

A terceira e quarta etapa de funcionamento, Fig. 2 (C) e (D) ocorrem no semi-ciclo negativo da rede, ambas com o

funcionamento similar as duas primeiras, com a diferença que nestas o transistor S_3 está bloqueado, enquanto o transistor S_4 está ativo, fornecendo ao indutor e a rede elétrica uma corrente com polaridade invertida.

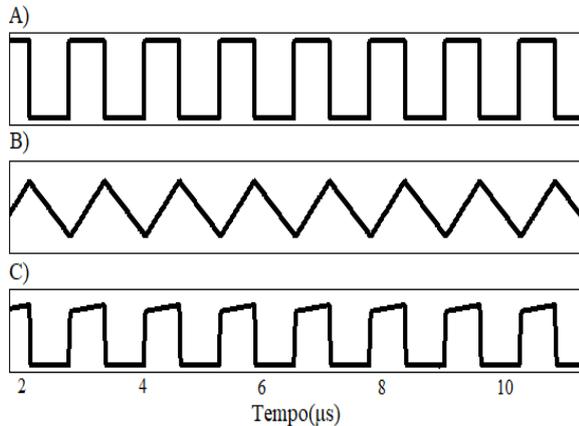


Figura 3. Formas de onda em alta frequência. A) Sinal de comando das chaves S_1 e S_2 . B) Corrente no indutor “L”. C) Corrente no enrolamento primário “ N_P ”.

3. CONTROLE DIGITAL

A Fig. 4 apresenta o inversor proposto com a malha de controle da corrente. O módulo da tensão da rede é utilizado como sinal de referência para o controle da corrente e a cada inversão da polaridade da tensão da rede as chaves S_3 e S_4 operam de forma complementar.

O indutor de filtro (L) e a rede CA ficam submetidos a uma tensão com largura de pulso variável (Modulação *PWM*) e com frequência fixa e igual a frequência de chaveamento dos interruptores do primário. Analisando as características desse conversor obtém-se a sua função de transferência apresentada na Eq. (1).

Onde “ kt ” é a razão de transformação do transformador, “L” é a indutância do filtro de saída e “E” é a tensão de entrada do inversor.

O projeto do compensador segue a metodologia apresentada por Ref. [6], os parâmetros para o desenvolvimento são apresentados na Tabela 1.

Os ganhos foram definidos em função do sensor de corrente: 0,165; do *PWM*: 1E-3;

e do conversor analógico-digital cuja leitura é em 3,3 volts com amostragem em 12 bits.

A frequência de cruzamento e a margem de fase selecionadas são respectivamente 3kHz e 30°. A função de transferência deste compensador, discretizado, pode ser visualizada na Eq. (2).

O diagrama de Bode deste conversor é apresentado na Fig. 5. A frequência de cruzamento e a margem de fase estão corrigidas após a discretização.

$$G(s) = \frac{E}{s \cdot L} \cdot k_t \quad (1)$$

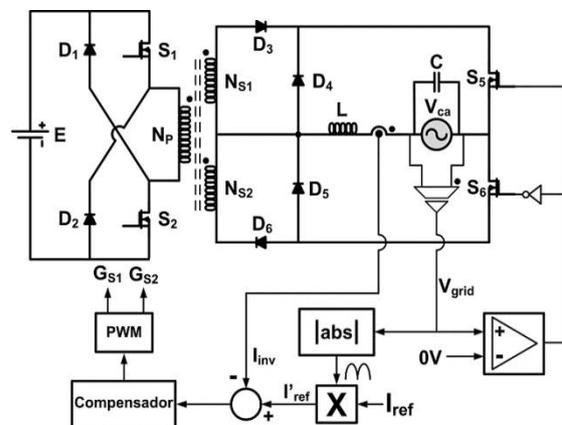


Figura 4. Circuito De Potência E Diagrama Em Blocos Da Malha De Controle Da Corrente.

Tabela 1 - Parâmetros Do Microinversor

Tensão de entrada	50V _{cc}
Tensão de saída	127V _{ac}
Potência nominal de saída	250W
Frequência de entrega de potência	60Hz
Frequência de comutação.	80kHz
Frequência de Amostragem de sinal	30kHz
Indutância do filtro de saída	5,5mH
Razão cíclica	0,5
Razão de Transformação	1:8

$$C(z) = \frac{2,257z^2 + 0,7641z - 1,493}{z^2 - 0,3468z - 0,6532} \quad (2)$$

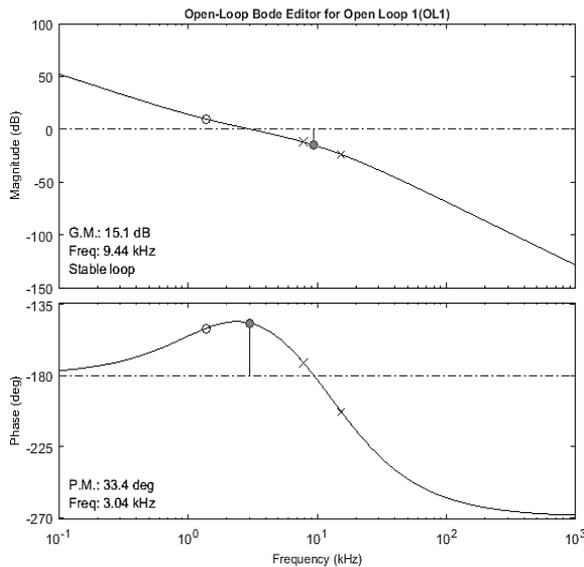


Figura 5. Diagrama de Bode do Inversor.

4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para a simulação foram utilizados os parâmetros exibidos na tabela 1.

A Fig. 6 mostra a tensão com pico de 180 volts e a corrente com pico de 2 ampères na saída do inversor, fornecendo uma potência de aproximadamente 250 watts para a rede elétrica, nota-se também que ambas estão em fase.

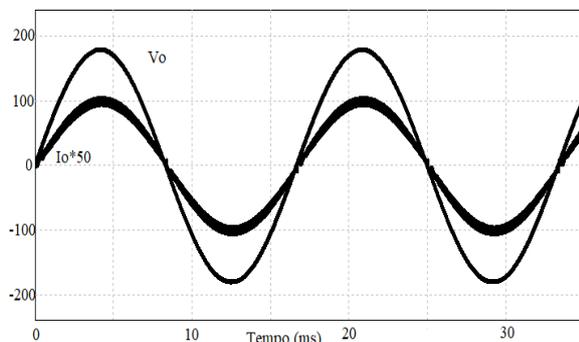


Figura 6. Tensão e Corrente de Saída do Inversor.

5. CONCLUSÃO

Neste projeto foi proposto um microinversor baseado na topologia Duplo *Forward* em único estágio combinado com uma técnica de modulação por largura de pulso, que é refletida no secundário e produz uma envoltória senoidal no filtro de saída.

Foram apresentadas suas etapas de operação e a construção de um controle por

meio de um compensador digital.

A análise dos resultados da simulação mostra um transitório após a abertura dos interruptores devido a indutância de dispersão no secundário, além disto o indutor não chega a se descarregar completamente durante a operação, para isto seria necessário aplicar uma tensão contrária para forçar sua descarga. Devido a isto a passagem por zero torna-se brusca e a energia durante essa transição é descarregada nos circuitos de proteção.

Entretanto o inversor mostra-se funcional e viável de implementação, devido sua baixa complexidade e custo de construção, tornando-se uma ótima opção para a geração de energia distribuída em baixas potências.

6. REFERÊNCIAS

- [1] S. A. O. D. Silva, I. P. Sampaio, f. M. D. Oliveira e f. R. Durand, "Sistema Fotovoltaico Com Condicionamento Ativo De Energia Usando MPPT Baseado Em PSO E Malha Feed-Forward De Controle De Tensão Do Barramento CC," *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 21, no. 1, Jun. 2016, pp. 105-116.
- [2] M. A. G. D. Brito, I. P. Sampaio, j. C. U. Peña e c. A. Canesin, "Família De Inversores Integrados Monofásicos E Trifásicos," *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 19, no. 4, Nov. 2014, pp. 368-376.
- [3] T. Srekanth, n. Lakshminarasamma and m. K. Mishra, "Coupled inductor-based single-stage high gain DC-AC buck-boost inverter," *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 8, Jun. 2016, pp. 1590-1599.
- [4] M. H. Lessing, e. Agostini e i. Barbi, "An active-clamping single-stage DC-AC flyback converter," *12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Nov. 2016, pp. 1-6.
- [5] N. MOHAN, *Eletrônica de Potência: Curso Introdutório*, Rio de Janeiro: 2014.