



Influência de taxa de modulação de amplitude em conversor estático CC-CA monofásico: Uma abordagem por simulação

Influence of amplitude modulation rate on single-phase DC-AC static converter: A simulation approach

Luiz Pessoa Dantas de Oliveira¹, Alberto Vinicius de Oliveira²

RESUMO

Este trabalho visa investigar a influência de taxa de modulação em amplitude em inversor de fonte de tensão (VSI) monofásico de ponte completa, por meio de simulação de circuitos elétricos. Neste contexto, parâmetros elétricos nos domínios do tempo e da frequência foram estudados, bem como Distorção Harmônica Total (DHT), que é um parâmetro relacionado à qualidade do sinal. Os resultados mostraram que taxas de modulação mais altas resultaram em distorções e componentes harmônicos adicionais no sinal de saída do VSI. Esses achados ressaltam a importância de selecionar cuidadosamente as taxas de modulação para otimizar o desempenho e a qualidade do sinal em inversores monofásicos de ponte completa.

PALAVRAS-CHAVE: inversor; qualidade de energia; SPWM.

ABSTRACT

This work aims to investigate the influence of amplitude modulation rate on a single-phase full-bridge voltage source inverter (VSI) by means of electrical circuit simulation. In this context, electrical parameters in the time and frequency domains were studied, as well as Total Harmonic Distortion (THD), which is a parameter related to signal quality. The results showed that higher modulation rates resulted in additional distortions and harmonic components in the VSI output signal. These findings highlight the importance of carefully selecting modulation rates to optimize performance and signal quality in single-phase full-bridge inverters.

KEYWORDS: inverter; energy quality; SPMW.

INTRODUÇÃO

A energia solar é uma fonte de energia renovável e tem ganhado proeminência globalmente (IPCC,2021) e é proveniente de painéis fotovoltaicos que convertem a luz solar em eletricidade de forma limpa, ou seja, sem emissões de poluentes. Aliado a esse fator, a busca por sustentabilidade, consciência ambiental e viabilidade econômica corroboram para sua atual ascensão como fonte de energia (ALLEN e KANNAN,2008). No contexto brasileiro, a energia solar ocupou a quarta posição na geração elétrica do país em 2022, ficando atrás somente de fontes como hidrelétrica, térmica e eólica, tornando a expansão da geração distribuída (especialmente micro e minigeração) um reflexo do movimento significativo em direção a essa tecnologia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2022).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar, por meio de estudo teórico e simulações, os parâmetros de qualidade de energia em um conversor CC-CA monofásico de ponte completa com filtro LC, aplicado a cargas resistivas de até 60W. Por fim, espera-se contribuir para uma melhor compreensão da otimização de desempenho

¹ Bolsista do CNPq. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil. E-mail: luizoliveira.2001@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4117155852661040.

² Docente no Curso/Departamento/Programa. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil. E-mail: avdo@utfpr.edu.br. ID Lattes: 9819918454025148.

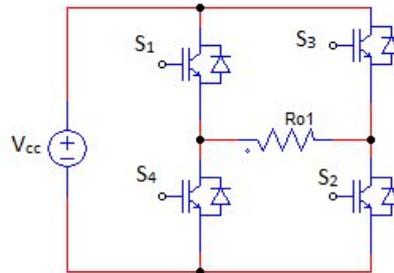


dos conversores, por meio do análise de eficiência energética, taxa de distorção harmônica total e estabilidade na tensão de saída desses conversores.

REFERENCIAL TEÓRICO

O circuito clássico do inversor ponte completa é ilustrado na figura 1, o qual possui quatro chaves semicondutoras estáticas do tipo IGBT. A presença do diodo no IGBT torna o dispositivo bidirecional em corrente e unidirecional em tensão (CANESIN,2021).

Figura 1 - Circuito básico do VSI monofásico com carga resistiva



Fonte: Autoria Própria

A sintetização de uma tensão de saída CA se dá pela comutação das chaves. A tensão v_o pode assumir os seguintes valores: $+V_{cc}$, $-V_{cc}$ ou zero, dependendo de qual par de chaves (S) estiver acionado. A tabela 1 apresenta a tensão obtida no terminal de saída para cada combinação permitida de par de chaves.

Tabela 1. Combinação de par de chaves

Chaves fechadas	Tensão na saída (v_o)
S ₁ e S ₂	$+V_{cc}$
S ₃ e S ₄	$-V_{cc}$
S ₁ e S ₃	0
S ₂ e S ₄	0

Fonte: Autoria própria

No presente trabalho, utilizou-se modulação SPWM para geração de uma senoidal na saída do inversor, além de ter como destaque a característica de não possuir elevado conteúdo harmônico de baixa frequência, fato presente na forma de onda quadrada (AHMED,2008) e (CANESIN,2021).

A Distorção Harmônica Total (DHT) é um dos parâmetros de qualidade e mede a amplitude das componentes harmônicas ($V_{n,rms}$) presentes no sinal de saída em relação à amplitude da componente fundamental ($V_{1,rms}$) (YUDITYA et al.,2020). A DHT de tensão é determinada por:

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} \quad (1)$$

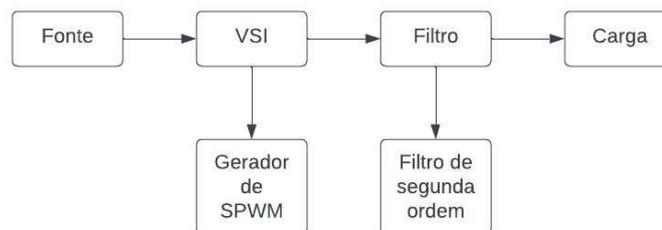


Neste trabalho, de modo a se obter a filtragem do sinal harmônico presente na saída do inversor ponte completa para recuperação do sinal modulante, optou-se pela escolha do filtro passivo LC, típico de sistemas de segunda ordem, o qual é composto por uma indutância em série conectada com a saída do circuito VSI e um elemento capacitivo de derivação. Adicionalmente, cabe-se destacar que o filtro LC pode ser utilizado para conexão dos inversores com a rede elétrica em casos que, por exemplo, a atenuação do conteúdo harmônico necessária é elevada e inviabiliza o uso do filtro L (DAL PULPO,2015).

MATERIAIS E MÉTODOS

O diagrama de blocos que representa o circuito inversor de ponte completa utilizado para sintetização do sinal modulante na saída do inversor é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de blocos do circuito inversor de ponte completa



Fonte: Autoria Própria

O diagrama (Figura 2) ilustra o circuito inversor de ponte completa utilizado para sintetização do sinal modulante na saída: dotado de uma fonte de tensão CC de 30V, com o circuito da Figura 1, sendo representado pelo VSI e por um gerador de sinal SPWM que é responsável pela ativação das chaves presentes no VSI, além do filtro LC aplicado de forma a se obter na saída apenas o sinal de interesse: 60 Hz (sinal modulante). Por fim, a carga presente no terminal de saída do circuito é de caráter puramente resistivo.

Além disso, com foco na análise sobre a taxa de distorção harmônica total envolvendo-se a modulação por largura de pulso senoidal bipolar, para diferentes valores de m_a , esta seção ilustra os passos realizados para execução do método empregado quando aplicados ao conversor CC-CA monofásico. Desta forma, dois diferentes valores de índices de modulação em amplitude (m_a) foram definidos, cujos valores são: 1,0 e 5,0 de forma a se observar o comportamento da forma de onda da tensão presente na saída do inversor. Tais valores foram selecionados com base em estudos prévios, em que se observa uma alteração na forma de onda de tensão na saída para diferentes valores de m_a adotados.

Na etapa de testes para diferentes índices de modulação em amplitude, utilizou-se m_f fixa, de modo que pudesse se ter um parâmetro fixo para análise da influência de diferentes amplitudes do sinal modulante, de forma a atender o requisito da equação abordada em (DAL PULPO, 2015), tendo-se a frequência do sinal da portadora equivalente à, pelo menos, cem vezes o valor da frequência do sinal modulante.

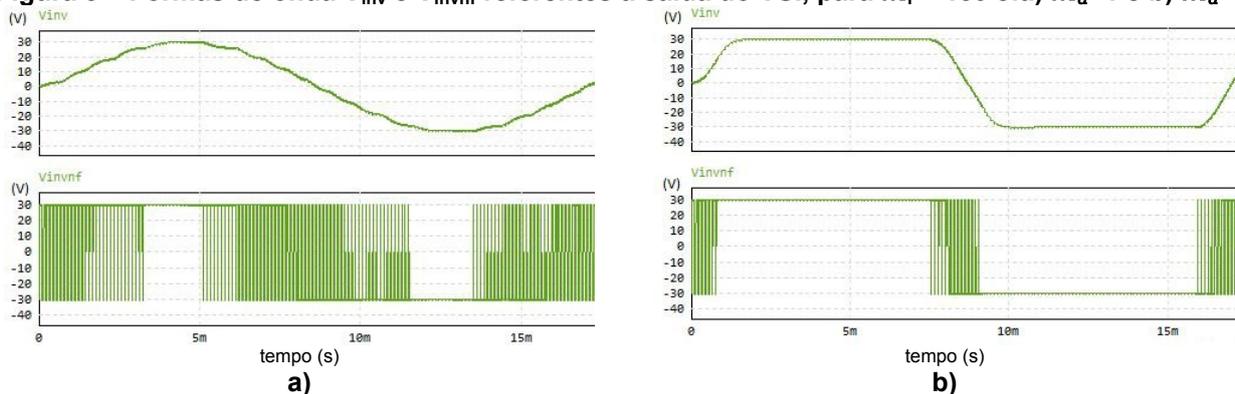


Para sinais de frequência da portadora próximos da frequência fundamental do sinal modulante em questão, corre-se o risco de, no ato da filtragem, alterar-se a fase ou amplitude do sinal modulante, ou as características em alta frequência, promovidos pelo sinal da portadora (RASHID, 2010). Diante disso, faz-se necessária a condição mínima de m_f . Para a realização dos testes do parâmetro do inversor (m_a), utilizou-se o *software* PSIM para simulação do circuito inversor de ponte completa (com carga resistiva), modulado por SPWM e tensão de barramento CC de 30 V.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No intuito de se analisar a maior quantidade de informações possíveis acerca da simulação para diferentes valores de taxas de modulação em amplitude m_a , tendo-se a taxa de modulação em frequência m_f fixa, os parâmetros de interesse foram coletados no simulador, tais como: formas de onda da tensão de saída do inversor, antes e após a filtragem (denominadas V_{inv} e V_{invnf} , respectivamente), lidando-se com $m_a = 1$ e 5, ilustradas na Figura 3.

Figura 3 – Formas de onda V_{inv} e V_{invnf} referentes à saída do VSI, para $m_f = 150$ e: a) $m_a=1$ e b) $m_a=5$



Fonte: Autoria Própria

A principal diferença entre V_{inv} e V_{invnf} (vide Figuras 3a e 3b) recai na atuação ou não do filtro passivo LC: nota-se que enquanto o sinal V_{inv} já é o de interesse, em sua forma senoidal, o sinal V_{invnf} ainda encontra-se presente na forma de pulsos.

Ao analisar-se a tensão de saída do inversor para $m_a=1$ (Figura 3a), nota-se que para valores compreendidos entre $0 < m_a < 1$, a tensão alternada obtida na saída do inversor varia de forma linear, resultando no valor de tensão de saída V_{inv} de pico de 30V. Adicionalmente, ao variar-se a taxa de modulação em amplitude para valores acima de 1, a consequência no sinal resultante na saída do inversor é o fenômeno da sobremodulação (para $1 < m_a < 3,24$).

A grande disparidade em forma de onda acontece ao se analisar a Figura 3b. Neste caso, é visível a distorção do sinal e a sua similaridade com um sinal de onda quadrada,



quando o valor de m_a excede, consideravelmente, o limiar necessário para completa distorção do sinal desejado, resultando em poucas aplicações em quesito prático.

Por fim, no aspecto da taxa de DHT, parâmetro amplamente utilizado para se avaliar a qualidade do sinal, notou-se que, para os valores adotados de m_a o valor de DHT apresenta-se de 6% quando a amplitude do sinal modulante é de 1,0 e resultou em 26,1% quando a taxa de modulação adotada foi de 5,0.

CONCLUSÃO

O estudo sobre a influência da variação de taxa de modulação em amplitude aplicada à entrada do inversor monofásico de ponte completa foi realizado e demonstrou que tais taxas detém impacto significativo no desempenho e na qualidade do sinal de saída. Além disso, os valores obtidos quanto à distorção harmônica total (DHT) confirmaram que taxas de modulação em amplitude mais elevadas estão diretamente relacionadas a maiores valores de distorção harmônica.

Os resultados encontrados reforçam que para projetos de inversores monofásicos de ponte completa, a otimização das taxas de modulação permite melhorar a qualidade do sinal de saída, melhorar a eficiência do inversor e atender aos requisitos de qualidade de carga.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq - Brasil. Com muito orgulho e carinho, agradeço aos meus amigos, familiares e especialmente ao meu professor e orientador de pesquisa, Alberto Vinicius de Oliveira, que sempre esteve ao meu lado durante a minha trajetória na realização desta pesquisa acadêmica, dando-me todo o suporte necessário para que o trabalho final fosse concluído com êxito.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

AHMED, A. **Eletrônica de potência**. [S. l.]: Pearson Education do Brasil, 2008.

ALLEN, P. G.; KANNAN, R. Solar Energy: A review. **Journal of Energy Resources Technology**, American Society of Mechanical Engineers, v. 130, n. 2, p. 041101, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Geração de energia renovável bateu recorde em 2022**, 2022. Disponível em: <https://encurtador.com.br/krA47>. Acesso em: 28 mai. 2023.



CANESIN, C. A. **Inversores**: Modulação senoidal por largura de pulso (PWM) e quadrada (SQW). 2021. Disponível em: <https://encurtador.com.br/ftvL0>. Acesso em: 28 mai. 2023.

DAL PUPO, A. **Estudo de metodologias de projeto para filtros de saída de inversores**. 2015. B.S. thesis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/14894>. Acesso em: 31 ago. 2023.

IPCC. **Climate Change 2021**: Mitigation of Climate Change. [S. l.]: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 30 ago. 2023.

RASHID, M. H. **Power Electronics Handbook**: Devices, circuits, and applications. [S. l.]: Elsevier, 2010.

YUDITYA, B. H. et al. Performance Comparison of Single-Phase Multilevel Inverter with SPWM Unipolar and Bipolar Switching Techniques. In: International Conference on Electrical Engineering . [S. l.: s. n.], 2020. **Anais [...]**. p. 102–107.