

MODULAÇÃO VETORIAL ALGÉBRICA PARA INVERSOR DE QUATRO-NÍVEIS DO TIPO NEUTRO GRAMPEADO

ABINADABE S. ANDRADE*, EDISON R. C. DA SILVA†, LUCIANO M. BARROS‡

**Instituto Federal da Paraíba - IFPB
Unidade da Indústria - UNIND
Cajazeiras, Paraíba, Brasil*

†*Universidade Federal da Paraíba - UFPB
Departamento de Energia Renováveis - DER
João Pessoa, Paraíba, Brasil*

‡*Universidade Federal de Sergipe - UFS
Departamento de Energia Elétrica - DEE
Aracaju, Sergipe, Brasil*

Emails: abinadabesilvaandrade@gmail.com, ercdasilva@gmail.com, oqizmo@gmail.com

Abstract— In this paper, a SVPWM method for four-level inverters is presented. The solution of the proposed technique is a simple algebraic equations relating directly the pulse widths of the gate signals to the phase reference voltages. The technique also allows minimizing the harmonic distortion of the output current. Computer simulation results are used to demonstrate the main features of the proposed SVPWM.

Keywords— SVPWM, four-level inverter, low harmonic distortion.

Resumo— Este trabalho apresenta uma técnica de modulação vetorial (SVPWM) para inversores de quatro-níveis. A técnica proposta permite o cálculo das larguras de pulsos do comando das chaves em função das tensões de referência. A técnica ainda permite que o inversor opere com baixo conteúdo harmônico. Resultados de simulação digital são apresentados para mostrar características da técnica SVPWM proposta.

Palavras-chave— SVPWM, Inversor de quatro-níveis, distorção harmônica baixa.

1 Introdução

Nas últimas décadas, os inversores multiníveis têm sido amplamente explorados devido a possibilidade de sua conexão a sistemas de tensão elevada, sem a necessidade de utilização de transformadores e utilizando semicondutores de média tensão. Esses inversores proporcionam uma redução do conteúdo harmônico das tensões de saída e dos valores de $\frac{dv}{dt}$ aplicados à carga e aos semicondutores (Nabae et al., 1981).

Dentre os inversores multiníveis, destaca-se a topologia com barramento grampeado (*NPC - Neutral Point Clamped*). Eles são bastantes atrativas na implementação em sistemas fotovoltaicos, uma vez que cada conjunto de painéis fotovoltaicos podem ser conectados em série para alimentar o barramento total ou podem ser utilizados individualmente alimentando cada capacitor do barramento.

Existem vários métodos de modulação por largura de pulso (*PWM, Pulse Width Modulation*) que podem ser usados com os inversores multiníveis, dentre os quais o método vetorial tem se mostrado como o mais adequado. Entretanto, os métodos apresentados na literatura técnica para o *PWM* vetorial, utilizam procedimentos indiretos e complexos para a seleção e cálculo dos tempos de aplicação dos vetores de tensão do inversor (Mendes, 2000). Principalmente quando o inver-

sor possui mais de três-níveis.

Alguns trabalhos têm apresentado propostas para modulação vetorial, para controle do inversor de quatro-níveis. (Busquets-Monge et al., 2007) introduziram uma estratégia em que são definidos vetores virtuais para solucionar o problema do desequilíbrio da tensão do barramento CC. Em (Saeedifard et al., 2007) a estratégia vetorial é aplicada em um conversor *back-to-back* de quatro-níveis, enquanto, que em (Satheesh et al., 2012) a estratégia é aplicada a um conversor *open-end* de quatro-níveis composto por dois inversores de dois-níveis com tensões diferentes. Já o trabalho em (Jacob and Baiju, 2014) apresenta uma proposta para definir o plano vetorial utilizando o princípio da modulação sigma-delta.

Neste artigo, será apresentado um novo método de *PWM* vetorial (*SVPWM, Space Vector Pulse Width Modulation*) para os inversores de quatro-níveis, em que os tempos de aplicação são definidos por equações algébricas simples em função das tensões de referência. Para mostrar as características do método *SVPWM* proposto serão apresentados resultados de simulação.

2 Inversor Trifásico do Tipo NPC de Quatro-Níveis

A Fig. 1 apresenta o inversor trifásico do tipo *NPC* de quatro-níveis. Neste inversor o barra-

mento total (V_{DC}) é composto por três capacitores (C_1 , C_2 e C_3), com mesma tensão de $\frac{1}{3}V_{DC}$. Cada braço do inversor é constituído por seis chaves IGBT com seus respectivos diodos em anti-paralelo (S_{1x} , $\bar{S}_{1x}$, S_{2x} , $\bar{S}_{2x}$, S_{3x} e $\bar{S}_{3x}$) e quatro diodos de grampeamento (D_{1x} , D_{2x} , D_{3x} e D_{4x}), onde $x = a, b, c$ representam as fases do inversor.

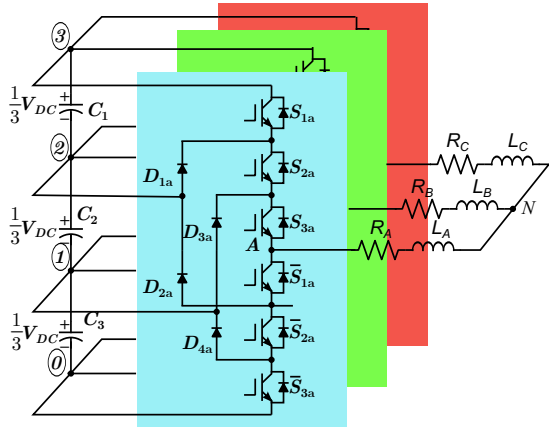


Figura 1: Inversor NPC de quatro níveis

A Tabela 1 apresenta os possíveis estados de chaveamento do inversor de quatro-níveis da Fig. 1. Os estados de chaveamento de cada braço representam a posição do barramento em que o braço está conectado. No estado 3 a fase é conectada no ponto superior do barramento como indicado na Fig. 1. No estado 0 a fase é conectada no ponto inferior do barramento e os estados 2 e 1, são conectados aos pontos intermediários do barramento.

Tabela 1: Estados de chaveamento do inversor de quatro-níveis.

Estado	S_{1x}	S_{2x}	S_{3x}
3	1	1	1
2	0	1	1
1	0	0	1
0	0	0	0

A Fig. 2 apresenta um sinal de comando genérico para um braço do inversor durante um período de modulação. Nesta figura, os tempos de permanência das chaves nos estados de chaveamento 0, 1, 2 e 3 são denominados respectivamente por τ_{0x} , τ_{1x} , τ_{2x} e τ_{3x} .

Cada fase pode assumir quatro possíveis estados de chaveamento. A combinação das fases resulta em 64 configurações de chaveamento possíveis. É possível construir um diagrama vetorial a partir dessas configurações. A Fig. 3 apresenta o diagrama vetorial do inversor de quatro-níveis com um total de 37 vetores diferentes.

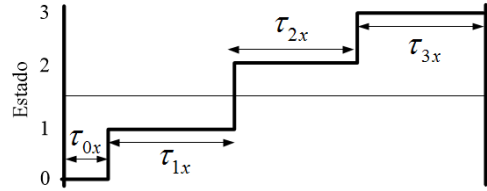


Figura 2: Sinal de comando de um inversor

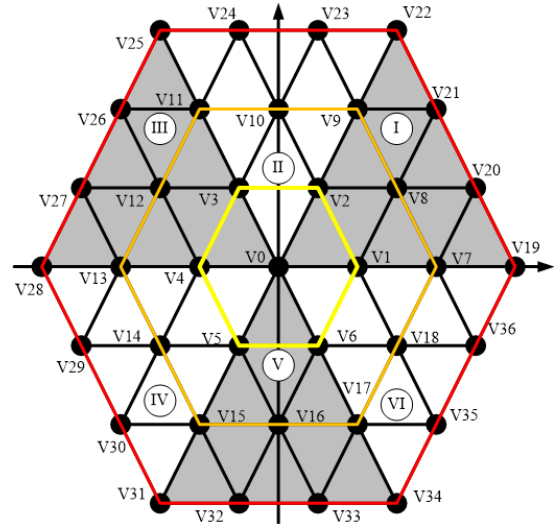


Figura 3: Espaço vetorial para o inversor de quatro-níveis.

Sendo o espaço vetorial composto por três hexágonos, os vetores espaciais da Fig. 3 podem ser classificados em quatro categorias, de acordo com cada um dos hexágonos. A primeira categoria denominada de Vetor Grande (G), formada pelos vetores do V19 ao V36, que estão localizados no hexágono mais externo. A segunda categoria denominada de Vetor Mediano (M), composta pelos vetores do V7 ao V18, pertencente ao hexágono médio. A terceira categoria denominada de Vetor Pequeno (P), que são os vetores do V1 ao V6, pertencentes ao hexágono interno. E por fim, a quarta categoria, denominada Vetor Zero (Z), composta pelo vetor V0. As 96 configurações estão distribuídas nos 37 vetores: quatro configurações definem o Vetor Zero; para os vetores da categoria Vetor Pequeno, são três configurações; para os vetores da categoria Vetor Médio, são duas configurações; e para os vetores da categoria Vetor Grande, uma única configuração.

Na modulação vetorial, o vetor tensão de referência é sintetizado aplicando-se na carga os vetores tensão do inversor mais próximos do vetor desejado. Desta forma, obtém-se uma tensão de saída com o mínimo conteúdo harmônico para uma dada frequência de chaveamento (Koyama et al., 1992; Seixas et al., 2000).

Assim como nos trabalhos em (Lopez et al., 2008) e (Celanovic and Boroyevich, 2001) que apresentam o algoritmo adotado para a implemen-

tação da modulação vetorial, este trabalho detalhará o procedimento para a implementação da técnica proposta nos passos a seguir.

3 Identificação dos Setores e das Regiões

3.1 Identificação do Setor

O espaço vetorial pode ser dividido em seis setores (*I*, *II*, *III*, *IV*, *V* e *VI*), como apresentado na Fig. 3. A ordenação dos setores é definida a cada 60° utilizando a lógica da Tabela 2 e ilustrada pela Fig. 4.

Tabela 2: Identificação dos setores

Setor	Ordenação das Tensões
<i>I</i>	$v_a > v_b > v_c$
<i>II</i>	$v_b > v_a > v_c$
<i>III</i>	$v_b > v_c > v_a$
<i>IV</i>	$v_c > v_b > v_a$
<i>V</i>	$v_c > v_a > v_b$
<i>VI</i>	$v_a > v_c > v_b$

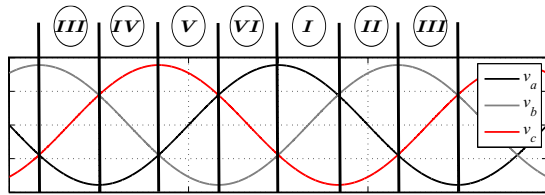


Figura 4: Identificação dos setores em função das tensões de referência

Para facilitar a rotina de cálculos e o entendimento da modulação apresentada, serão generalizados os cálculos, utilizando a relação das tensões de referências com as tensões auxiliares v_1 , v_2 e v_3 . A relação entre as tensões auxiliares é $v_1 > v_2 > v_3$, ou seja, no setor *I* $v_1 = v_a$, $v_2 = v_b$ e $v_3 = v_c$, para o setor *II* $v_1 = v_b$, $v_2 = v_a$ e $v_3 = v_c$ e assim sucessivamente.

3.2 Identificação das Regiões

Cada setor do espaço vetorial (ver Fig. 3) é dividido em 9 regiões. A Fig. 5 apresenta as divisões das regiões para um setor genérico. Os vértices das regiões são limitadas pelos vetores genéricos VZ do grupo *Z*, $VP1$ e $VP2$ do grupo *P*, $VM1$, $VM2$ e $VM3$ do grupo *M* e $VG1$, $VG2$, $VG3$ e $VG4$ do grupo *G*.

Observando a Fig. 5 é possível perceber que as regiões são delimitadas por eixos definidos pelas tensões de linha genéricas (v_{12} , v_{23} e v_{13}), onde $v_{12} = v_1 - v_2$, $v_{23} = v_2 - v_3$, $v_{13} = v_1 - v_3$ e $k = \frac{V_{DC}}{3\sqrt{3}}$. Desta forma, a identificação de cada região

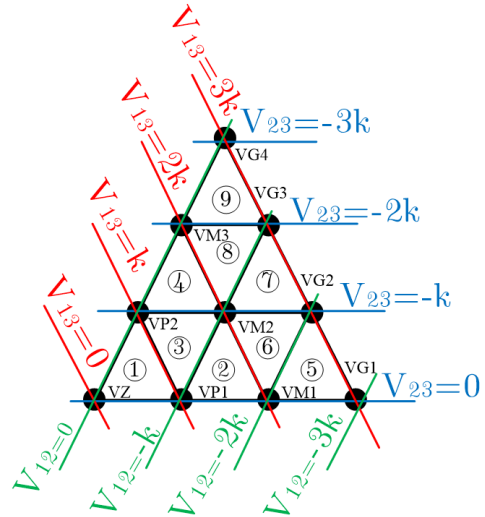


Figura 5: Identificação das regiões para um setor genérico.

se dá por uma sequência de lógica "ifelse". A Tabela 3 apresenta a lógica e condição das tensões de linha que determinam cada região.

Tabela 3: Identificação das Regiões

Seq.	Lógica	Condição	Região
1	<i>if</i>	$v_{13} \leq k$	1
2	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 2k$ e $v_{12} \leq -k$	2
3	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 2k$ e $v_{23} > -k$	3
4	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 2k$ e $v_{12} \leq 0$	4
5	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 3k$ e $v_{12} \leq -2k$	5
6	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 3k$ e $v_{23} > -k$	6
7	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 3k$ e $v_{12} \leq -k$	7
8	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 3k$ e $v_{21} > -2k$	8
9	<i>elseif</i>	$v_{13} \leq 3k$ e $v_{12} \leq 0$	9

4 Cálculo das Larguras de Pulso para o Setor I - Região 1

Na modulação *SV PWM* as tensões de referências são transformadas para o sistema dos eixos *dq*. Sendo assim, as tensões de referências podem ser expressas por:

$$v_{ref} = \frac{2}{3}(v_1 + v_2 e^{j2\pi/3} + v_3 e^{j4\pi/3}) \quad (1)$$

onde,

$$v_1 = m \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \cos(\theta)$$

$$v_2 = m \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \cos(\theta + 2\pi/3) \quad (2)$$

$$v_3 = m \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \cos(\theta + 4\pi/3)$$

em que m   o  ndice de modulação. Os valores dos vetores espaciais também são definidos pela transformação dq . A Tabela 4 apresenta os valores dos vetores espaciais para o setor genérico.

Tabela 4: Vetores espaciais genéricos

Vetor	Valor	Vetor	Valor
VZ	0	$VM3$	$\frac{4V_{DC}}{9}e^{j2\pi/6}$
$VP1$	$\frac{2V_{DC}}{9}e^{j0\pi/3}$	$VG1$	$\frac{2V_{DC}}{3}e^{j0\pi/9}$
$VP2$	$\frac{2V_{DC}}{9}e^{j1\pi/3}$	$VG2$	$\frac{5V_{DC}}{9} + j\frac{\sqrt{3}E}{9}$
$VM1$	$\frac{4V_{DC}}{9}e^{j0\pi/6}$	$VG3$	$\frac{4V_{DC}}{9} + j\frac{2\sqrt{3}E}{9}$
$VM2$	$\frac{4V_{DC}}{9}e^{j1\pi/6}$	$VG4$	$\frac{2V_{DC}}{3}e^{j3\pi/9}$

O vetor de referência (v_{ref}) pode ser sintetizado usando os três vetores mais próximo a cada instante de amostragem. Esses vetores são selecionados dependendo de qual região o vetor de referência se encontra.

A Fig. 6 apresenta a relação das configurações com os vetores espaciais. Se a tensão v_{ref} estiver na Região 1, os vetores que serão utilizados para sintetizar a tensão v_{ref} , são: VZ , $VP1$ e $VP2$. Para que ocorra apenas uma única comutação a transição das configurações, o padrão de chaveamento é formado da seguinte forma: "000, 110, 111, 211, 221, 222, 322, 332, 333".

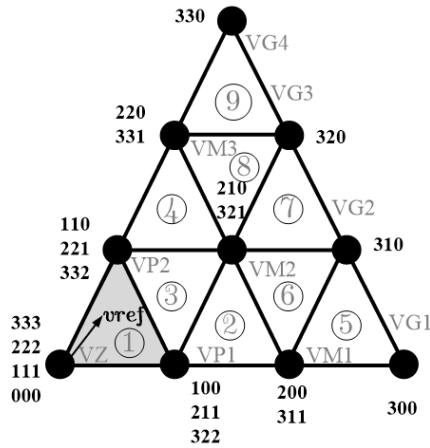


Figura 6: Tensão v_{ref} na Região 1 do Setor genérico

Sendo assim, a tensão v_{ref} em um período de chaveamento é sintetizado como:

$$v_{ref}T = (d_{VZ} \cdot VZ + d_{VP1} \cdot VP1 + d_{VP2} \cdot VP2)T \quad (3)$$

$$d_{VZ} + d_{VP1} + d_{VP2} = 1 \quad (4)$$

d_{VZ} é a relação cíclica do vetor VZ ,

onde d_{VP1} é a relação cíclica do vetor $VP1$,

d_{VP2} é a relação cíclica do vetor $VP2$.

Igualando as partes reais e imaginárias da equação 3 e usando a equação 4, as relações cíclicas são:

$$\begin{aligned} d_{VZ} &= 1 + \frac{3}{V_{DC}}v_{13} \\ d_{VP1} &= \frac{3}{V_{DC}}v_{12} \\ d_{VP2} &= \frac{3}{V_{DC}}v_{23} \end{aligned} \quad (5)$$

Os tempos de aplicação de cada vetor são distribuído na mesma proporção para cada uma das configurações associada ao mesmo. Sendo assim, os tempos definidos para cada configuração são dado por:

$$\begin{aligned} \tau_{333} &= \tau_{222} = \tau_{111} = \tau_{000} = \frac{1}{4} \cdot d_{VZ} \cdot \frac{T}{2} \\ \tau_{100} &= \tau_{211} = \tau_{322} = \frac{1}{3} \cdot d_{VP1} \cdot \frac{T}{2} \\ \tau_{110} &= \tau_{221} = \tau_{332} = \frac{1}{3} \cdot d_{VP2} \cdot \frac{T}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

Uma vez calculadas as razões cíclicas e estabelecidos os tempos de cada configuração são definidas as larguras de pulso em que as fases são conectadas nos pontos 3, 2, 1 e 0 do barramento CC . A Fig. 7 apresenta o padrão de chaveamento para a Região 1 do setor genérico.

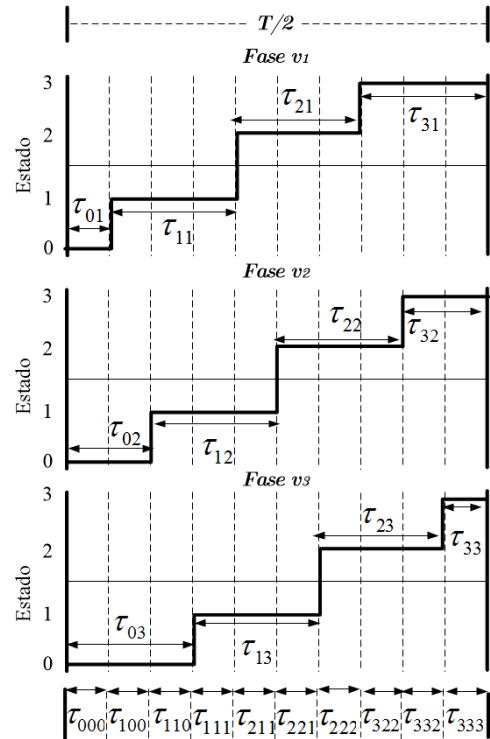


Figura 7: Padrão de Chaveamento do Setor I - Região 1

Com base na Fig. 7   possível associar os tempos da largura de pulso com os tempos de cada

configuração. Sendo assim, substituindo a equação 5 em 6, e utilizando a Fig. 7, os tempos de aplicação de cada fase são dados por:

$$\begin{aligned}\tau_{31} &= \tau_{322} + \tau_{332} + \tau_{333} = \frac{T}{4} - \frac{T}{4V_{DC}}(v_{13}) \\ \tau_{21} &= \tau_{11} = \tau_{31} \\ \tau_{32} &= \tau_{332} + \tau_{333} = \frac{T}{4} + \frac{T}{V_{DC}}(v_{23}) - \frac{3T}{4V_{DC}}(v_{13}) \\ \tau_{22} &= \tau_{12} = \tau_{23} = \tau_{13} = \tau_{31} \\ \tau_{33} &= \tau_{333} = \frac{T}{4} - \frac{3T}{4V_{DC}}(v_{13}) \\ \tau_{0x} &= T - \tau_{3x} - \tau_{2x} - \tau_{1x}\end{aligned}\quad (7)$$

onde, $x = 1, 2, 3$ e τ_{3x} , τ_{2x} , τ_{1x} e τ_{0x} são os tempos de aplicação da fase x nos pontos 3, 2, 1 e 0 do barramento CC . O cálculo para as regiões 2-9 é realizado seguindo o mesmo procedimento. Por fim, para associar o tempo da largura dos pulsos das tensões genéricas v_1 , v_2 e v_3 com as tensões de referência v_a , v_b e v_c basta aplicar e identificar o setor como apresentado pela Tabela 2.

5 Resultados de Simulação

A modulação *SVPWM* proposta foi implementada via simulação utilizando as ferramentas do PSIM 9.0 para emular o inversor e o DEV++ para implementar a técnica de modulação. A Tabela 5 apresenta os dados utilizado na simulação.

Tabela 5: Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão Barramento	V_{DC}	200 V
Carga RL	R_o/L_o	50 Ω / 7 mH
freq. chav.	f_s	1 kHz
Capacitores	C_1, C_2 e C_3	2200 μ F

A técnica de modulação vetorial foi simulada com $m = 0,57$ e $m = 0,9$. A Fig. 8(a) apresenta o caminho da tensão de referência para as duas condições de simulação. Observe que para $m = 0,57$, o vetor de referência gira pelas regiões 2, 3 e 4. Para $m = 0,9$, o vetor de referência gira pelas regiões 5 à 9. Inicialmente, o índice de modulação é ajustado para 0,57, em $t = 0,25$, o índice de modulação assume o valor de 0,9. Para validar o comportamento da tensão de referência, a Fig. 8(b) apresenta o *flag* que identifica a região em que o vetor de referência se encontra.

A Fig. 9 apresenta a tensão de polo v_{ao} , a tensão de linha v_{bc} , a tensão de fase v_{cn} e as correntes de saída i_a , i_b e i_c .

Existem trabalhos que comparam o desempenho da técnica de modulação vetorial com outras

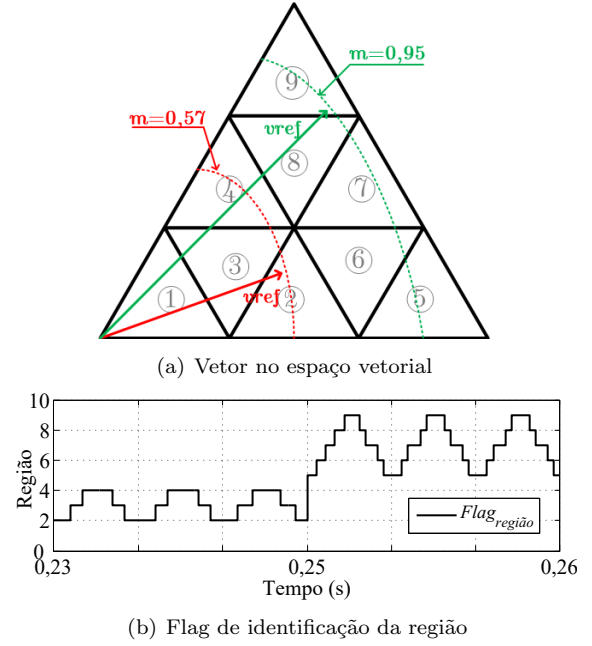


Figura 8: Caminho do vetor de referência para índice de modulação igual a 0,57 e 0,9.

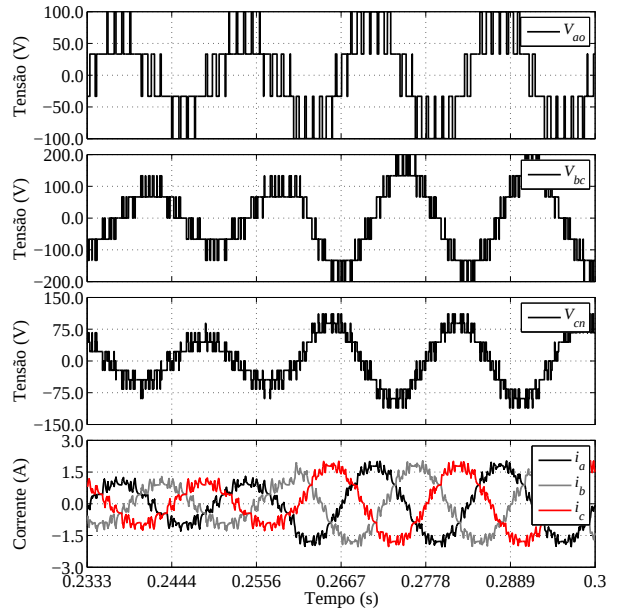


Figura 9: Sinais de saída do inversor NPC

técnicas tradicionais. Em (Deng and Harley, 2015) é realizada a comparação da técnica *SVPWM* com a *NLPWM* (*Nearest-Level Pulse Width Modulation*). Já em (Liu et al., 2015), o estudo comparativo é realizado com a técnica de modulação tradicional *CBPWM* (*Carrier Based Pulse Width Modulation*). Neste trabalho, o inversor foi simulado sob mesmas condições com as técnicas *SVPWM* e *CBPWM*. A Fig. 10 apresenta o THD (*Total Harmonic Distortion*), calculada pela equação 8, em função do índice de modulação.

$$THD\% = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (8)$$

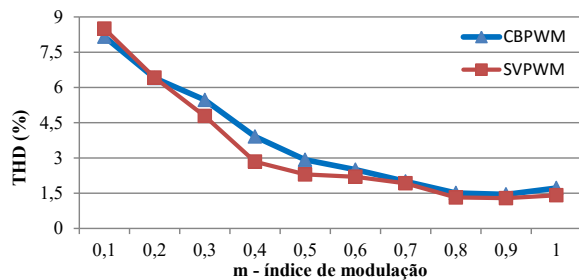


Figura 10: THD de corrente x índice de modulação

Verifica-se que é possível obter uma corrente de saída com o conteúdo harmônico reduzido a partir da técnica de modulação vetorial proposta. Em relação a modulação tradicional *CBPWM*, a modulação proposta apresentou uma redução de 21,23% e 18,03% referentes aos índices de modulação 0,5 e 1,0, respectivamente.

6 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma técnica de modulação vetorial para o inversor de quatro-níveis descrito em detalhes. A técnica de modulação vetorial proposta permitiu o cálculo algébrico dos tempos de aplicação de cada fase a ser conectada nos pontos intermediários do barramento.

A metodologia da técnica de modulação foi validada por meio de resultados de simulação. Além disso, foi comprovado que a técnica apresenta baixos índices de THD de corrente.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao IFPB-Campus Cajazeiras pelo suporte financeiro ao professor Abinadabe S. Andrade.

Referências

- Busquets-Monge, S., Bordonau, J. and Rocabert, J. (2007). Extension of the nearest-three virtual-space-vector pwm to the four-level diode-clamped dc-ac converter, *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1892–1898.
- Celanovic, N. and Boroyevich, D. (2001). A fast space-vector modulation algorithm for multi-level three-phase converters, *IEEE Transactions on Industry Applications* **37**(2): 637–641.
- Deng, Y. and Harley, R. G. (2015). Space-vector versus nearest-level pulse width modulation for multilevel converters, *IEEE Transactions on Power Electronics* **30**(6): 2962–2974.
- Jacob, B. and Baiju, M. R. (2014). A new space vector modulation scheme for any n-level vol-

tage source inverter which directly quantizes the reference space vector, *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference on*, pp. 1–6.

- Koyama, M., Fujii, T., Uchida, R. and Kawabata, T. (1992). Space voltage vector-based new pwm method for large capacity three-level gto inverter, *Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992. Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the 1992 International Conference on*, pp. 271–276 vol.1.
- Liu, Y. C., Ge, X. L., Feng, X. Y. and Ding, R. J. (2015). Relationship between svpwm and carrier-based pwm of eight-switch three-phase inverter, *Electronics Letters* **51**(13): 1018–1019.
- Lopez, J., Alvarez, J., Doval-Gandoy, J. and Freijedo, F. D. (2008). Multilevel multiphase space vector pwm algorithm, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **55**(5): 1933–1942.
- Mendes, M. A. S. (2000). *Técnicas de Modulação em Largura de Pulso Vetoriais para Inversores Multiníveis.*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica, Belo Horizonte - MG.
- Nabae, A., Takahashi, I. and Akagi, H. (1981). A new neutral-point-clamped pwm inverter, *Industry Applications, IEEE Transactions on* **IA-17**(5): 518–523.
- Saeedifard, M., Iravani, R. and Pou, J. (2007). A space vector modulation approach for a back-to-back connected four-level converter, *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2043–2049.
- Satheesh, G., Reddy, T. B. and Babu, C. S. (2012). Space-vector based pwm switching strategy for a four-level dual inverter fed open-end winding induction motor drive, *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on*, pp. 111–115.
- Seixas, P. F., Mendes, M. A. S., Donoso-Garcia, P. and Lima, A. M. N. (2000). A space vector pwm method for three-level voltage source inverters, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE*, Vol. 1, pp. 549–555 vol.1.