

공간벡터 변조법의 아날로그 구현

이지명, 홍명보*, 이동춘

영남대학교 전기전자공학부, *한국전기연구소

Analog Implementation of Space Vector PWM

G-Myoung Lee, Myoung-Bo Hong, Dong-Choon Lee

School of Electrical and Electronic Eng., Yeungnam Univ., *KERI

Abstract

An analog implementation of space vector PWM is proposed in this paper. It is shown that a space vector PWM can be implemented by adding a zero sequence voltage to reference voltage of triangle comparison PWM. The proposed scheme is implemented by six diodes and, an operational amplifier circuit and, a few resistors.

1. 서론

공간벡터법은 기존의 삼각파비교 변조법보다 출력 전압이 15.5% 높고 출력전압의 왜형률이 낮다는 장점이 있다. 그러나, 공간벡터법은 그 계산이 과정이 복잡하기 때문에 기본적으로 마이크로프로세서를 사용하여 구현되고 있다[1].

한편, 영상전압을 변조전압에 첨가함으로써 인버터의 전압이용률을 증가시킬 수 있다는 것이 [2]에 처음 발표되었고, [3]에서 제 3 고조파성분을 변조전압에 첨가하여 출력전압을 15.5% 증가시키는 방법이 제안되었다. 그리고 [4]에서 공간벡터변조법은 정현변조법에서 특정한 영상전압 즉, 3상 기준변조전압 중에서 절대치가 최소인 상전압의 1/2을 기준전압에 더하여 변조한 것과 등가라는 것이 입증되었다. 여기서 공간벡터법의 아날로그 구현 가능성이 언급되었으나 회로에 대한 구체적인 제시 없이 마이크로프로세서를 통하여 구현되었다. 현재 PWM 발생부의 구성이 디지털화 되어 가는 추세이긴 하나 여전히 저가의 아날로그 방식의 삼각파비교 변조법을 이용하는 인버터가 산업현장에 많이 사용되고 있으므로 여기에 인버터 입력전압의 이용률을 증대시킬 필요성이 있다.

본 논문에서는 공간벡터변조기법을 간단한 아날로그

회로로 구현하는 방법을 제안하였다. 정현변조법으로부터 공간벡터법으로의 변형을 위해서는 주입할 영상전압을 합성하는 부분이 필요한데 이는 6개의 다이오드와 한 개의 연산증폭기를 통해 간단히 얻어진다. 제안된 회로를 사용한 실험을 통해 기존의 삼각파비교 방식의 변조법으로부터 공간벡터변조법이 저가로 손쉽게 구현됨을 보인다.

2. 공간벡터변조와 삼각파 비교법

그림 1의 공간벡터도에서 기준전압이 영역 I에 위치할 때, 전압벡터 V_1 , V_2 를 인가하는 시간 T_1 , T_2 와 영벡터를 인가하는 시간 T_0 은 다음과 같다[1].

$$T_1 = T_s \frac{|V^*|}{2/3 V_{dc}} \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin \pi/3} \quad (1)$$

$$T_2 = T_s \frac{|V^*|}{2/3 V_{dc}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \pi/3} \quad (2)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (3)$$

여기서 T_s 는 PWM 주기이다.

다음은 공간벡터법으로 계산된 스위칭시간을 이용하여 인버터 풀전압을 정현함수로 나타내고자 한다. 예를 들어 기준전압벡터가 영역 V에 위치할 경우, 각상의 스위칭패턴으로부터 인버터의 풀전압 즉, 입력 단 커패시터 중성점에 대한 인버터 각상의 전압을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$v_{\omega}^{**} = \left(-\frac{T_0}{2} - T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2} \right) \frac{V_{dc}}{2T_s} \quad (4)$$

$$v_{\omega}^{**} = \left(-\frac{T_0}{2} - T_1 - T_2 + \frac{T_0}{2} \right) \frac{V_{dc}}{2T_s} \quad (5)$$

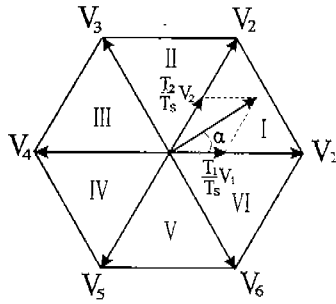


그림 1. 전압공간벡터도

$$v_{\omega}^{**} = \left(-\frac{T_0}{2} + T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2} \right) \frac{V_{dc}}{2T_s} \quad (6)$$

식(4)에 식(1)~(3)을 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$v_{\omega}^{**} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \frac{3}{\pi} M \sin(\alpha - 30^\circ) \quad (7)$$

여기서 변조지수 M은 다음과 같이 정의된다.

$$M = \frac{V^*}{\frac{2}{\pi} V_{dc}} \quad (8)$$

식(7)을 ωt 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{\omega}^{**} &= \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \frac{3}{\pi} M \sin(\omega t) \\ &= \frac{3}{2} V^* \sin \omega t = V^* \sin \omega t + \frac{1}{2} V^* \sin \omega t \\ &= v_{\omega}^* + \frac{1}{2} v_{\omega}^*, \text{ for } 0^\circ \leq \omega t \leq 30^\circ \end{aligned} \quad (9)$$

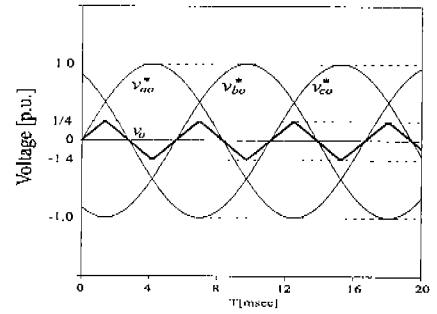
마찬가지로, 영역 VI, I, II에 대해서 v_{ω}^{**} 를 유도하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} v_{\omega}^{**} &= V^* \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t + 30^\circ) \\ &= V^* \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(\omega t + 120^\circ) \right] \\ &= v_{\omega}^* + \frac{1}{2} v_{\omega}^*, \text{ for } 30^\circ \leq \omega t \leq 90^\circ \end{aligned} \quad (10)$$

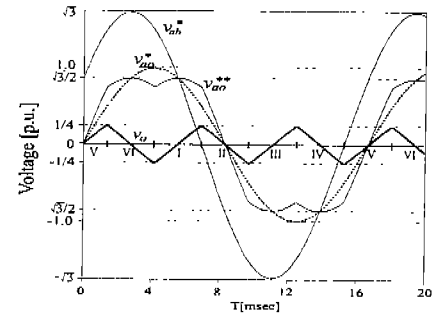
$$\begin{aligned} v_{\omega}^{**} &= V^* \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \\ &= V^* \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \right] \\ &= v_{\omega}^* + \frac{1}{2} v_{\omega}^*, \text{ for } 90^\circ \leq \omega t \leq 150^\circ \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} v_{\omega}^{**} &= \frac{3}{2} V^* \sin(180^\circ - \omega t) \\ &= V^* \sin \omega t + \frac{1}{2} V^* \sin \omega t \\ &= v_{\omega}^* + \frac{1}{2} v_{\omega}^*, \text{ for } 150^\circ \leq \omega t \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

식(10)~(12)로부터 a상의 기준폴전압 v_{ω}^{**} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.



(a) 영상전압



(b) 폴전압과 선간전압

그림 2. 공간벡터 변조법의 시간함수적 해석

$$v_{\omega}^{**} = v_{\omega}^* + v_0 \quad (13)$$

여기서 v_0 는 영상전압을 나타내며, 3상 기준상전압 중에서 절대치의 크기가 최소인 상전압의 1/2로 이루어짐을 알 수 있다. 이는 그림 2(a)에 잘 나타나 있다. (b)는 영상전압 v_0 , 영상전압이 첨가된 기준폴전압 v_{ω}^* , v_{ω}^{**} 의 기본파성분에 해당하는 상전압 v_{an}^* 그리고 선간전압 v_{ab}^* 를 보인다. 3상 인버터에서 폴전압에 3배수 고조파가 존재할지라도 부하의 상전압이나 선간전압에는 그 성분이 나타나지 않는다.

3. 영상전압 발생회로

2절에서 삼각파비교 변조법의 기준전압파형에 영상성분을 더하여 변조할 경우 출력전압은 공간벡터변조법과 동일한 결과가 된다는 것을 설명하였다. 이 원리를 이용하여 공간벡터변조를 아날로그 회로로 구현하기 위한 회로블럭도가 그림 3에 보인다. 3상의 기준전압 중 크기가 최대인 상과 최소인 상을 검출하기 위한 3상 브리지다이오드와 이로부터 영상성분을 얻기 위한 연산증폭기로 구성된다. 여기서 검출된 영상성분이 기준정현전압과 더해져 공간벡터변조에서와 동일한 기준폴전압을 만들고 이것이 삼각파와 비교 변조하게 된다.

아래에 영상전압 발생회로의 동작을 자세히 설명한다. 그림 4(a)는 3상 기준전압 중 최대값과 최소값을

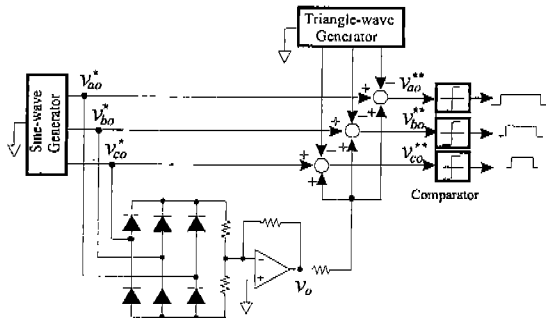
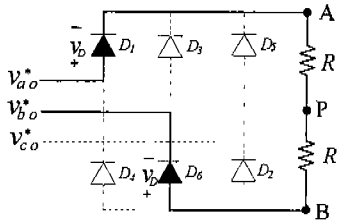
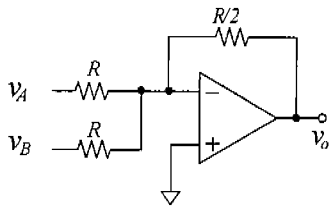


그림 3. 공간벡터변조의 아날로그 구현



(a) 최대, 최소상전압 검출회로



(b) 가산기 회로

그림 4. 영상전압 검출회로

나타내는 v_A 와 v_B 를 검출하기 위한 정류기부분으로, D_6 과 D_1 이 도통한다고 할 경우 v_A 와 v_B 는 다음과 같다.

$$v_A = v_{a0}^* - v_D \quad (14)$$

$$v_B = v_{b0}^* + v_D \quad (15)$$

여기서 v_D 는 다이오드 전압강하를 의미한다. 그림 4(b)는 v_A 와 v_B 로부터 영상전압을 합성하기 위한 가산기이다. 그림(a)에서처럼 D_6 과 D_1 이 도통하는 경우 영상성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_0 &= -\frac{1}{2} [v_A + v_B] = -\frac{1}{2} [v_{a0}^* - v_D + v_{b0}^* + v_D] \\ &= \frac{v_{a0}^*}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

식(15)로부터 영상전압 발생회로에서 다이오드 전압강하는 고려할 필요가 없음을 알 수 있다.

4. 실험결과

제안한 아날로그 변조회로를 PWM 인버터에 적용

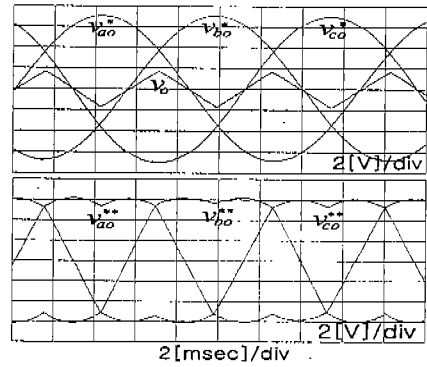


그림 5. 영상전압과 기준폴전압

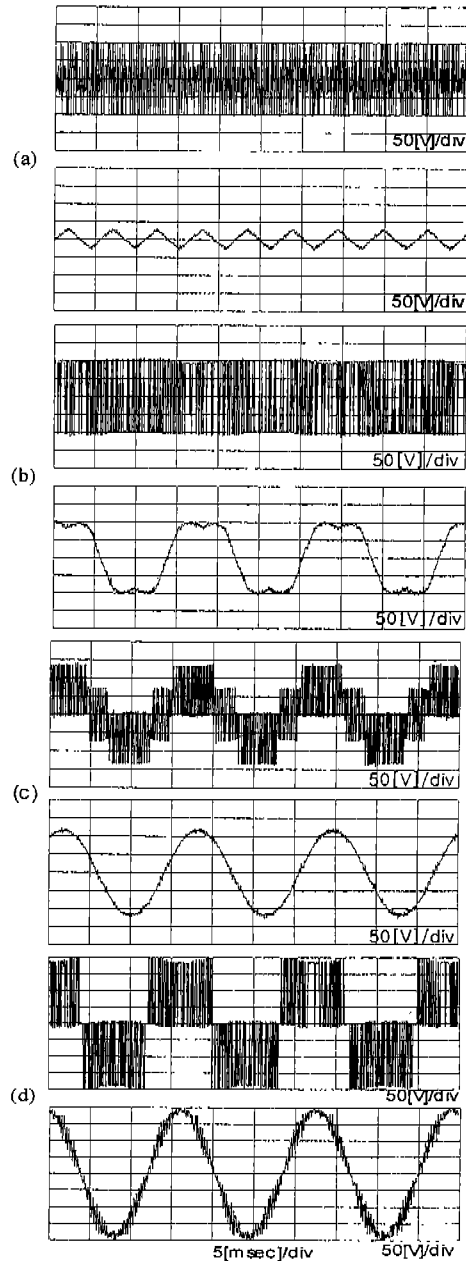


그림 6. 인버터 전압파형

- (a) 영상전압 (b) 폴전압
(c) 상전압 (d) 선간전압

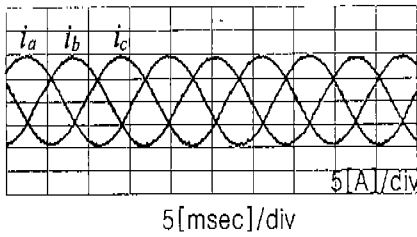


그림 7. 부하상전류

하였다. 부하는 R-L이며 중성점의 전위를 관측할 수 있도록 Y결선으로 연결하였다. 실험조건은 다음과 같다.

- 입력직류전압: 200[V]
- 부하저항: 10[Ω]
- 인덕터: 3.5[mH]
- 삼각파의 크기와 주파수: 6[V], 3.5[kHz]
- 기준상전압: 115[V_{pk}], 60[Hz]

한편 변조지수를 공간벡터법의 선형영역 최대치인 0.906으로 하기 위해 제어보드 상의 기준 풀전압의 크기를 삼각파 진폭과 동일하게 설정하였다.

그림 5는 영상전압 발생회로에서 측정한 영상전압과 기준풀전압의 파형을 보인다. 공간벡터법에서의 풀전압 파형과 같음을 알 수 있다.

그림 6은 인버터의 전압파형을 보인다. (a)-(d)에서 위에 나타낸 펄스형태의 파형은 실측된 파형이고, 아래의 그림은 이해를 돕기 위해 디지털 오실로스코프의 저역필터기능을 이용하여 스위칭 펄스에 기인한 고조파 성분을 제거한 파형이다. (a)는 영상전압 즉, dc 중성점에 대한 부하 중성점의 전압파형이다. 원하는 영상성분이 중성점에 인가되고 있음을 볼 수 있다. (b)는 인버터 풀전압 즉, 입력단 커패시터 중성점에 대한 인버터 각상의 전압을 나타낸다. (c)는 부하상전압 즉, 부하중성점에 대한 인버터 각 단자의 전압을 나타낸다. 부하상전압에는 풀전압의 포함된 영상성분이 나타나지 않음을 볼 수 있다. (d)는 선간전압 파형으로 상전압의 $\sqrt{3}$ 배이며 위상이 30° 앞서 있다.

그림 7은 부하의 상전류로서 변조지수 0.906에서도 왜형되지 않고 정현적으로 흐름을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 공간벡터변조기법을 간단한 아날로그 회로로 구현하는 방법을 제안하였다. 이 기법은 삼각파비교 변조법에 영상전압을 첨가함으로써 얻어지는데, 기존의 회로에 6개의 다이오드, 1개의 연산증폭기, 몇 개의 저항소자만을 추가함으로써 손쉽게 구현된다. 현재에도 삼각파비교 방식을 채택한 제품이 많이 사용되고 있으므로 본 연구에서 제안된 기법을 사용하면 저가로 공간벡터법의 우수한 특성을 얻을 수 있다. 실험을 통해 제시된 회로의 동작특성을 확인하였고, 앞으로 무정전전원장치 및 전동기 구동용 인버터에 유용하게 사용되리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1]K. G. King, "A three-phase transistor class-B inverter with sine-wave output and high efficiency," IEE Conf. Publ., 123, pp. 204-209, 1974.
- [2]J. A. Houldsworth and D. A. Grant, "The use of harmonic distortion to increase the output voltage of a three-phase PWM inverter," IEEE Trans. on IA, vol. 20, no. 5, pp 1224-1228, Sep/Oct., 1984.
- [3]H. W. van der Broek, H. C. Skudelny, and G. V. Stanke, "Analysis and realization of PWM based on voltage space vectors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 24, no. 1, pp. 142-150, Jan./Feb., 1988.
- [4]V. Blasko, "A hybrid PWM strategy combining modified space vector and triangle comparison methods," IEEE IAS Conf. Rec., in San Diego, pp. 1872-1878, Oct., 1996.
- [5]A. M. Hava, R. J. Kerkman, and T. A. Lipo, "Simple analytical and graphical tools for carrier based PWM methods", IEEE. PESC proc., in St. Louis, pp. 1462-1471, 1997.