

Space Vector PWM에서 Six-step까지의 새로운 과변조 방법

홍승민, 남광희
포항공과대학교

A New Overmodulation Method from Space Vector Pulse-width Modulation to Six-step Operation.

Seung-Min Hong, Kwanghee Nam
POSTECH

ABSTRACT

본 논문은 공간벡터 변조 방법에서부터 Six-step 동작까지의 새로운 과변조 방법을 제시하였다. 극전압을 푸리에 시리즈를 이용하여 분석하였고 지령 상전압에서부터 펄스 폭 변조 스위칭 신호까지의 알고리즘을 제안하였다. Matlab 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서 론

인버터는 전압변조 방식에 따라서 지령전압을 선형적으로 만들어 낼 수 있는 범위가 제한된다. 인버터가 Six-step으로 동작할 때에 전압벡터는 육각형을 나타낸다. 지령 전압의 크기가 육각형보다 크면 인버터는 지령전압을 정확하게 만들어 낼 수 없다. 이러한 구간을 과변조구간이라 하는데 과변조 구간에서의 기법으로는 동일 위상 과변조 기법, 최소 거리 과변조 기법, 보상 변조 기법 등이 연구되었다.^[1]

본 논문에서는 지령 전압 벡터의 크기에 따라 육각형 꼭짓점에 머무는 각도를 계산하는 과변조 방법을 제시하였고 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 펄스 폭 변조 방법

2.1 새로운 펄스 폭 변조 방법

그림 1은 본 논문에서 제안하는 과변조 구간에서의 펄스 폭 변조 방법을 나타낸 그림이다. 점선으로 나타낸 육각형은 Six-step으로 동작하고 있을 때 출력 전압을 나타낸 것이고 바깥의 원은 지령전압을 나타내고 있다. 지령 전압이 육각형의 내접원보다 커지게 되면 지령전압의 크기에 따라서 육각형 꼭짓점에 머무는 각을 계산한다. 이를 그림에 δ 각도로 표시하였다. δ 동안에는 육각형의 꼭짓점에 머물게 되고 나머지 구간에서는 공간 벡터 변조방법을 사용한다.

$$MI = \frac{V_{1peak}}{V_{dc}/2} \quad (1)$$

전압변조 지수를 식 (1)과 같이 정의한다. 여기서 V_{1peak} 는 상전압의 기본파 크기이며 V_{dc} 는 DC link 전압이다. 그림 1의 (a)는 지령 전압의 전압변조 지수가 1.19일 때를 나타낸 것이고 (b)는 전압변조 지수가 1.24일 때를 나타낸 그림이다. 지령 전압이 증가하여 δ 가 $\pi/3$ 이 되면 Six-step으로 동작하게 된다.

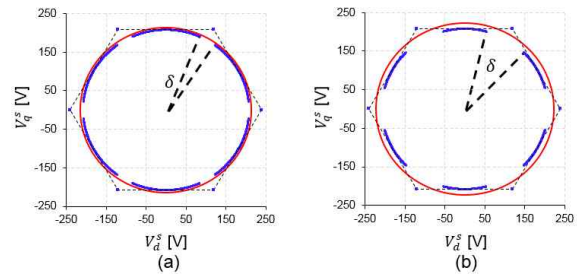


Fig. 1 Voltage trajectory of the proposed PWM for (a) $MI^* = 1.19$, (b) $MI^* = 1.24$.

2.2 푸리에 시리즈 분석

지령 전압의 크기에 따라서 δ 가 결정되기 때문에 극전압을 푸리에 급수로 전개하여 지령 전압과 δ 와의 관계를 유도할 수 있다. 그림 1번에 나타나 있는 d-q 전압을 변환 행렬을 통해 a상 전압을 나타내면 식 (2)번과 같다.

$$v_a = \begin{cases} \frac{2}{3} V_{dc} \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \\ \text{for } \frac{2n\pi}{6} - \frac{\delta}{2} < \omega t < \frac{2n\pi}{6} + \frac{\delta}{2}, \quad n = 0, 2, \dots, 5 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} \cos \omega t - \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \\ \text{for other } \omega t \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)번을 푸리에 급수로 전개하면 $b_n(\delta)$ 는 0이고 $a_n(\delta)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_n(\delta) = \frac{V_{dc}}{n\pi} \left[\sin\left(\frac{n\delta}{2}\right) + 2\sin\left(\frac{n\delta}{2}\right) \left\{ \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2n\pi}{3}\right) - \frac{1}{2} \cos(n\pi) \right\} \right. \\ \left. + \int_{\frac{\delta}{2}}^{\frac{\pi}{3} - \frac{\delta}{2}} \cos\theta \cos(n\theta) d\theta + \int_{\frac{\pi}{3} + \frac{\delta}{2}}^{\frac{2\pi}{3} - \frac{\delta}{2}} \cos\theta \cos(n\theta) d\theta \right. \\ \left. + \int_{\frac{\pi}{3} - \frac{\delta}{2}}^{\pi - \frac{\delta}{2}} \cos\theta \cos(n\theta) d\theta \right. \\ \left. + \frac{V_{dc}}{\pi} \left[\int_{\frac{\delta}{2}}^{\frac{\pi}{3} - \frac{\delta}{2}} \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} \theta - \frac{1}{2\sqrt{3}} \right) \cos(n\theta) d\theta \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{\frac{\pi}{3} + \frac{\delta}{2}}^{\frac{2\pi}{3} - \frac{\delta}{2}} \left(-\frac{\sqrt{3}}{\pi} \theta + \frac{3}{2\sqrt{3}} \right) \cos(n\theta) d\theta \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{\frac{\pi}{3} - \frac{\delta}{2}}^{\pi - \frac{\delta}{2}} \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} \theta - \frac{5}{2\sqrt{3}} \right) \cos(n\theta) d\theta \right] \right] \quad (3)$$

그림 2는 전압변조 지수가 1.24일 때 이를 푸리에 급수를 이용하여 3차 계수까지 더한 파형을 (a)에 나타내었고 7차 계수

까지 더한 파형을 (b)에 나타내었다. 그림 2를 통하여 푸리에 급수의 전개가 정확하게 이루어 졌음을 알 수 있다.

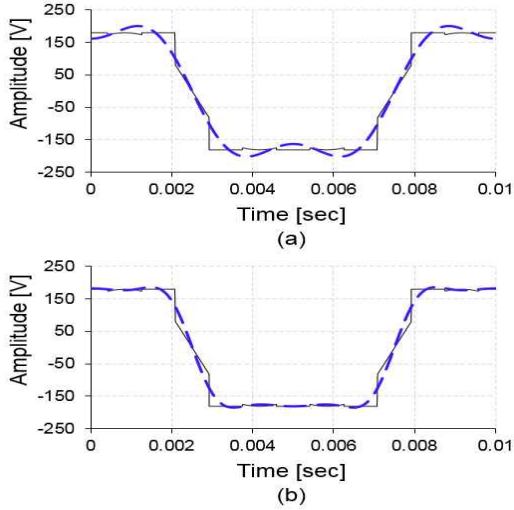


Fig. 2 Fourier series expansion approximation : (a) up to 3rd order, (b) up to 7th order.

푸리에 급수를 통해 얻은 계수 중 기본파 계수를 이용하여 식 (4)와 같이 δ 와의 관계를 얻을 수 있다.

$$a_1(\delta) = \frac{V_{dc}}{2\pi} \left[8\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) + \frac{2\pi}{\sqrt{3}} - 2\sqrt{3}\delta \right] \quad (4)$$

2.3 과변조 전략

그림 3은 지령 상전압에서부터 펄스 폭 변조 스위칭 시간을 계산하기까지의 순서도를 나타내었다. 지령 상전압의 전압변조 지수에 따라 변조 방법을 달리하여 스위칭 시간을 계산한다. 공간 벡터 변조방법으로는 지령 상전압의 변조 지수가 1.15까지 스위칭 시간을 계산하고 1.15부터 1.27까지는 앞서 제한한 과변조 방법을 이용하여 스위칭 시간을 계산한다. 전압변조 지수가 1.27보다 클 경우에는 Six-step 동작을 하게 된다.

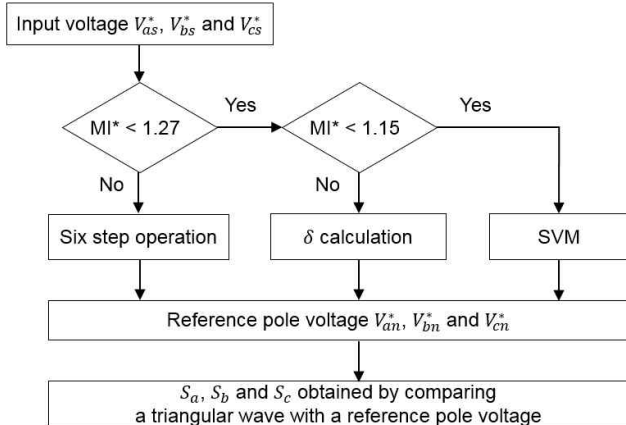


Fig. 3 Flowchart of PWM switching calculation.

3. 시뮬레이션 결과

그림 4는 Matlab Simulink를 이용하여 논문에서 제안하는 펄스 폭 변조 방법을 적용한 인버터의 a-b-c상 극전압 파형을 나타내었다. 그림 5는 지령 상전압을 점선으로 표시하였고 인

버터의 출력 상전압을 실선으로 나타내었다. 지령 전압이 증가하여 최종적으로는 Six-step으로 동작하는 나타내었다.

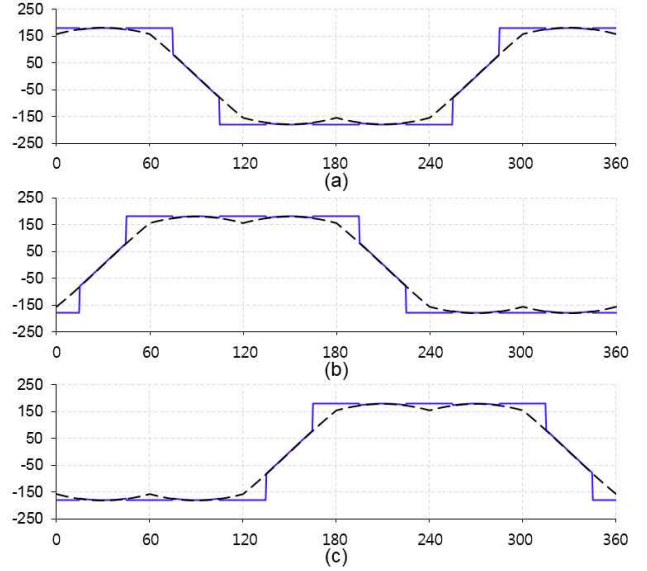


Fig. 4 Simulation results for $MI^* = 1.24$.

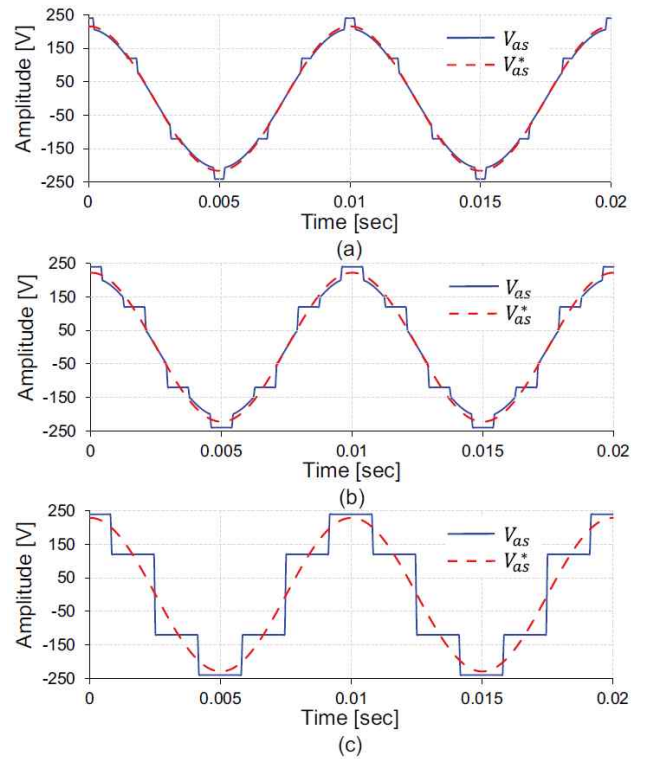


Fig. 5 Phase voltage according to the reference voltage. (a) $MI^* = 1.19$ (b) $MI^* = 1.24$ (c) $MI^* = 1.27$

참고 문헌

[1] Ashwin M. Khambadkone, Joachim Holtz, "Compensated Synchronous PI Current Controller in Overmodulation Range and Six-Step Operation of Space-Vector-Modulation-Based Vector Controlled Drives", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 49, no. 3 Jun. 2002