

# 높은 선형성을 갖는 과변조 기법의 반송파 기반 PWM 구현

이충원<sup>[1]</sup>, 송병주<sup>[2]</sup>, 김현식<sup>[1]</sup>

[1]가천대학교 전기공학과, [2]가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과

## Implementation of Carrier-based PWM for Overmodulation Method with High Linearity

Choong-Won Lee<sup>[1]</sup>, Byung-Ju Song<sup>[2]</sup>, Hyeon-Sik Kim<sup>[1]</sup>

[1] Dept. of Electrical Engineering, Gachon University,

[2] Dept. of Next Generation Smart Energy System Convergence, Gachon University

### ABSTRACT

본 논문에서는 2-레벨 PWM 인버터에서 Bolognani's 과변조 기법을 읍셋 전압을 이용한 반송파 기반 PWM에서 구현하는 방법을 제안한다. Bolognani's 과변조는 기존의 전압 지령 벡터와 크기가 같도록 인버터 출력을 전압 육각형 제한 상에 배치하여 전압 합성의 선형성이 우수하다는 장점이 있다. 제안하는 방법은 3상 극전압 지령의 중간치를 수정하여 과변조 기법을 구현한다. 이는 삼각함수를 이용하여 전압지령의 위상각을 구하는 기존 방법에 비해 구현이 간단하며 계산시간을 단축할 수 있다. 시뮬레이션 및 실험으로 제안된 방법의 타당성을 검증하였다

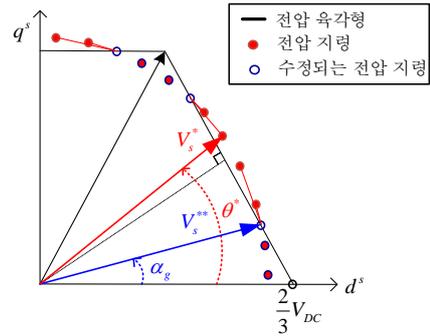


그림1. Bolognani's 과변조 기법에 따른 전압 벡터 궤적

### 1. 서론

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)의 고속 운전에서는 전동기의 역기전력은 증가하지만 인버터 출력 전압은 직류단 전압 제한에 따른 전압 육각형으로 제한된다. 이 때, 전압 지령이 전압 육각형을 벗어나는 경우 출력 전압이 비선형적으로 합성되며 이는 PMSM의 제어 성능 저하로 이어지게 된다. 따라서, 전압 지령이 전압 육각형을 벗어나는 경우 PMSM의 제어 성능 향상을 위해 과변조(Overmodulation) 기법이 수반되어야 한다. Bolognani가 제안한 과변조 기법<sup>[1]</sup>은 다른 과변조 기법에 비해 전압 합성의 선형성이 우수하다는 장점을 가진다<sup>[2]</sup>. 하지만, 기존의 과변조 구현 방식은 삼각함수를 사용하여 DSP의 연산시간이 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 반송파(carrier) 기반 PWM에서 읍셋 전압 계산과 중간치 극전압 지령 수정을 통해 간단하게 Bolognani's 과변조 기법을 구현하는 법을 제안한다. 이는 기존 구현 방법에 비해 구현이 간단하여 연산시간을 크게 단축할 수 있다.

### 2. Bolognani's 과변조 기법

그림 1은 Bolognani's 과변조 기법을 적용하였을 때 d-q축 정지 좌표계 상에서 전압 지령의 궤적을 나타낸다. 전압 지령  $V_s^*$ 이 전압 제한 육각형을 벗어나는 경우, 수정되는 전압 지령  $V_s^{**}$ 은 기존 전압 지령과 크기가 같고 전압 육각형과 가장 가까운 전압 벡터로 수정된다. 이 때,  $\theta^*$ 는 기존의 전압 지령의 위상,  $\alpha_g$ 는 전압 지령과 전압 육각형이 교차하는 지점의 위상을 나타낸다.  $\theta^*$ 는 기존의 전압 지령  $V_{d_s}^*$ 과  $V_{q_s}^*$ 로부터 식

(1)와 같이 계산할 수 있다.  $\alpha_g$ 는 기존 전압 지령 크기  $|V_s^*|$ 를 통해 식 (2)과 같이 계산된다.

$$\theta^* = \text{atan2}(V_{q_s}^*, V_{d_s}^*) \quad (1)$$

$$\alpha_g = \frac{\pi}{6} - \text{acos}(V_{DC} / \sqrt{3} \cdot |V_s^*|) \quad (2)$$

이를 통해 수정되는 전압 지령의 위상  $\theta^{**}$ 을 구할 수 있다.

$$\theta^{**} = \begin{cases} \theta^* & 0 \leq \theta^* \leq \alpha_g \\ \alpha_g & \alpha_g \leq \theta^* \leq \pi/6 \\ \pi/3 - \alpha_g & \pi/6 \leq \theta^* \leq \pi/3 - \alpha_g \\ \theta^* & \pi/3 - \alpha_g \leq \theta^* \leq \pi/3 \end{cases} \quad (3)$$

수정되는 전압 지령에 대한 위상을 섹터(sector) 1에서만 표시하였지만 다른 섹터에서도 동일한 방법이 적용된다. 즉, 기존의 과변조 기법은 수정되는 전압 지령의 위상을 구하기 위해 삼각함수 연산이 요구됨을 알 수 있다.

### 3. 제안하는 반송파 기반 과변조 기법

#### 3.1 과변조 영역에서의 반송파 기반 PWM

읍셋 전압을 이용한 캐리어 기반 PWM에서 읍셋 전압 지령을 식 (4)로 계산하면 공간 벡터 PWM(SVPWM)이 등가적으로 구현된다<sup>[3]</sup>.

$$V_{sn}^* = -\frac{V_{max,s}^* + V_{min,s}^*}{2} \quad (4)$$

여기서,  $V_{max,s}^*$ 과  $V_{min,s}^*$ 는 각각 상 전압 지령의 최대값과 최소값을 나타낸다.

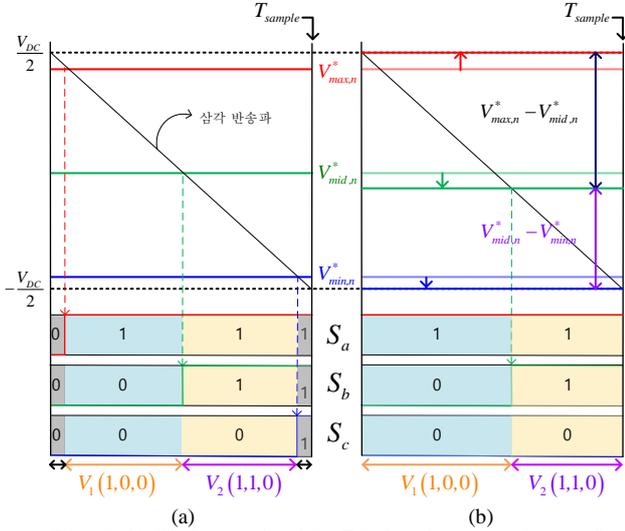


그림 2. 전압 벡터 크기에 따른 극전압 지령과 스위치 상태  
(a) 선형 영역 (b) 과변조 영역

그림 2는 전압 지령이 전압 육각형의 섹터 1에 있는 경우 공간 벡터 PWM에 의한 극전압 지령과 반송파와 비교되어 결정되는 스위치 상태를 나타낸다. 선형 영역에서 인버터 출력 전압은 그림 2(a)과 같이 유효벡터와 영전압 벡터의 조합으로 결정된다. 반면, 과변조 영역에서는 극전압 지령의 최대, 최소값이 각각  $V_{DC}/2$ ,  $-V_{DC}/2$ 로 고정되기 때문에 그림 2(b)와 같이 유효벡터의 조합만으로 결정되게 된다. 과변조 영역에서 합성되는 인버터 전압을 구성하는 유효벡터의 비율은 극전압 지령의 중간값,  $V_{mid,n}^*$ 의 크기에 의해 결정되게 된다. 즉, 인버터 출력 전압을 합성하기 위한 유효벡터  $V_1(1,0,0)$ 와  $V_2(1,1,0)$ 의 크기는 각각  $V_{max,n}^* - V_{mid,n}^*$ ,  $V_{mid,n}^* - V_{min,n}^*$ 가 된다.

### 3.2 제안하는 과변조 기법 구현

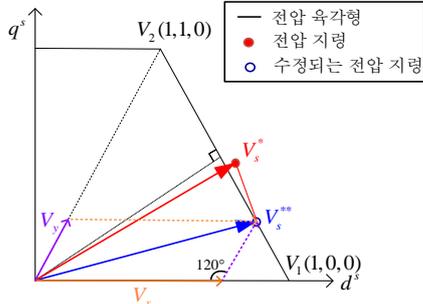


그림 3. 반송파 기반 Bolognani's 과변조 기법 구현

그림 3은 제안하는 과변조 기법 구현을 위한 전압 벡터를 나타낸다. 수정되는 전압 지령  $V_s^{**}$ 은 전압 지령과 가장 가까운 유효벡터 성분인  $V_x$ 와  $V_y$ 로 표현된다. 여기서  $V_x$ 와  $V_y$ 는  $V_{mid,n}^*$ 에 의해 결정되는 유효벡터의 크기를 말하고  $V_s^*$ 은 실제 전압 지령 벡터의 크기로 3상 전압 지령 크기의 제곱 합의 제곱근으로 정의할 수 있다.

$$V_x = \frac{2}{3}(V_{max,n}^* - V_{mid,n}^*) = \frac{2}{3}\left(\frac{V_{DC}}{2} - V_{mid,n}^*\right) \quad (5)$$

$$V_y = \frac{2}{3}(V_{mid,n}^* - V_{min,n}^*) = \frac{2}{3}\left(\frac{V_{DC}}{2} + V_{mid,n}^*\right) \quad (6)$$

$$|V_s^*| = |V_s^{**}| = \sqrt{\frac{2}{3}(V_x^2 + V_y^2 + V_{cs}^2)} \quad (7)$$

수정되는 전압 지령 벡터의 크기  $|V_s^{**}|$ 는 벡터  $V_x$ 와  $V_y$ 의 합으로 표현된다.

$$V_s^{**2} = V_x^2 + V_y^2 - 2V_x V_y \cos(120^\circ) \quad (8)$$

결과적으로 식 (5), (6)과 식 (7)을 식 (8)에 대입하여 수정되는 전압 지령을 합성하기 위한 극전압 지령의 중간값을 얻을 수 있다.

$$V_{mid,n}^{*2} = \frac{3}{2}(V_{as}^2 + V_{bs}^2 + V_{cs}^2) - \frac{3}{4}V_{DC}^2 \quad (9)$$

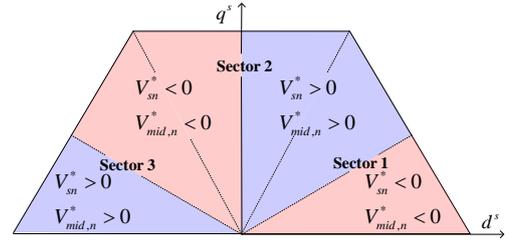


그림 4. 전압 지령 위치에 따른  $V_{sn}^*$ 와  $V_{mid,n}^*$ 의 부호

그림 4는 전압 지령 위상에 따른 음셋 전압의 극성을 나타낸다. 음셋 전압  $V_{sn}^*$ 과  $V_{mid,n}^*$ 의 극성은 동일하게 변동하므로 식 (9)의 극성은 음셋 전압을 이용하여 표현할 수 있다.

$$V_{mid,n}^* = \text{sign}(V_{sn}^*) \sqrt{\frac{3}{2}(V_x^2 + V_y^2 + V_{cs}^2)} - \frac{3}{4}V_{DC} \quad (10)$$

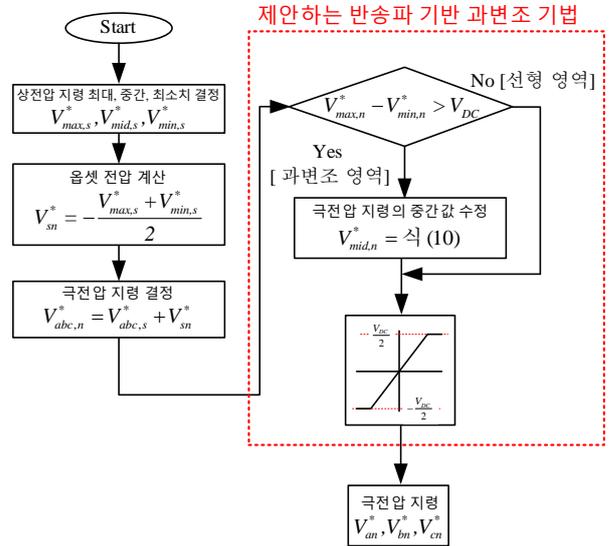


그림 5. 제안하는 반송파 기반 과변조 기법 순서도

그림 5는 제안하는 반송파 기반 과변조 기법의 전체 순서도(flowchart)를 나타낸다. 우선 3상 상전압 지령의 최대, 중간, 최소값을 판별한 후, 식 (4)의 음셋 전압을 더해 극전압 지령을 결정한다. 이후, 전압 지령이 과변조 영역에 위치하는지 극전압 지령의 최대, 최소값의 차를 이용하여 판별한다. 만약 전압 지령이

과변조 영역에 존재한다면, 3 상 극전압 지령 중 중간값을 식 (10)로 수정해준다. 최종적으로 극전압 지령은 직류단 전압에 의해  $\pm V_{DC}/2$  내로 제한된다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안하는 방법을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. 시뮬레이션은 MATLAB/Simulink 를 이용하며, 시스템 제정수는 표 1 과 같다. 또한 실험은 DSP TMS320F28377D 에서 구현하여 기존 과변조 기법과 제안하는 방법의 계산 시간을 비교하였다. 단, 약자속 전압 제한치를 전압 육각형 보다 크게 설정하여 약자속 운전 시 전류 제어기의 출력이 전압 육각형 외부에 위치하도록 하여 식스-스텝(Six-step) 전압을 합성할 수 있도록 하였다.

표 1. 시스템 제정수

Parameter	Value
정격 전류, $I_{rated}$	4Apeak
극수/슬롯	6 / 9
직류단 전압	155 V
고정자 저항, $R_s$	0.58 $\Omega$
d 축 인덕턴스, $L_{ds}$	6.9 mH
q 축 인덕턴스, $L_{qs}$	9.8 mH
영구자석에 의한 쇄교자속, $\lambda_f$	64 mWb-t
스위칭 주파수	10 kHz
샘플링 주파수	20 kHz

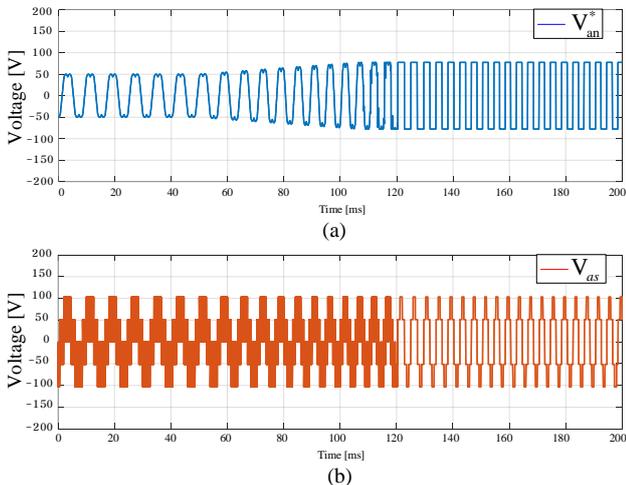


그림 6. 시뮬레이션 결과 (a) 극전압 지령 (b) 상전압 파형

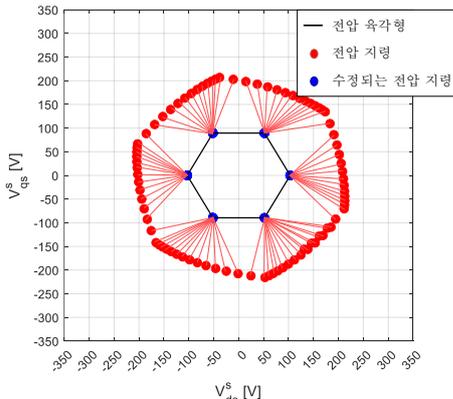


그림 7. 정상상태 d-q 축 전압 지령 궤적

그림 6 은 제안하는 기법 적용 시 시뮬레이션 결과이며 정격 토크 지령을 인가한 후, 부하 속도를 2,500 r/min 부터 5,000 r/min 까지 증가시켰다. 그림 7 은 해당 조건의 정상상태에서 정지 좌표계 d-q 축 전압 지령 궤적을 나타낸다. 제안하는 기법 적용 시 수정되는 전압 지령이 전압 육각형의 꼭짓점 전압만을 합성하는 식스-스텝 운전이 구현됨을 알 수 있다.

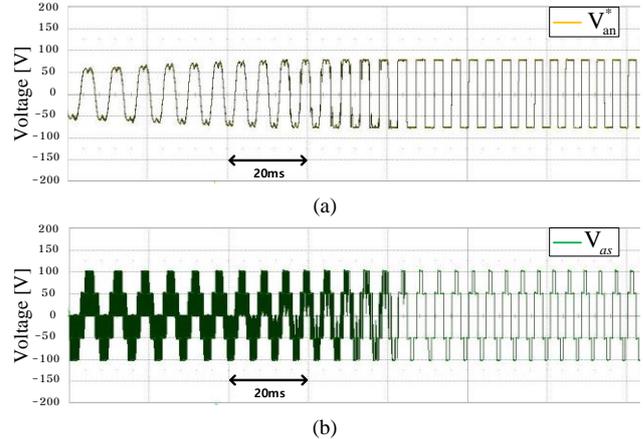


그림 8. 실험 결과 (a) 극전압 지령 (b) 상전압 파형

그림 8 은 동일 조건에서의 실험 결과를 나타낸다. 기존의 과변조 기법의 연산시간은 약 5.2 $\mu$ s, 제안하는 방법은 0.715 $\mu$ s 의 시간이 소요되어 계산 시간이 크게 단축됨을 확인할 수 있었다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 반송파 기반 PWM에서 Bolognani's 과변조 기법 구현하는 방안을 제안하였다. 이는 과변조 영역에서 3상 극전압 지령 중 중간값을 수정함으로써 간단히 구현된다. 과변조 기법 구현 과정에서 기존과 다르게 삼각함수를 사용하지 않으므로 연산시간을 단축할 수 있다는 장점을 갖는다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021400000060, Techno-Economics 기반 차세대에너지시스템융합대학원(학과) - STEP)

#### 참고 문헌

- [1] S. Bolognani and M. Zigliotto, "Novel digital continuous control of SVM inverters in the overmodulation range," *IEEE Tran. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 2, pp. 525-530, Mar./Apr. 1997.
- [2] Y.-C. Kwon, S. Kim and S.-K. Sul, "Six-Step Operation of PMSM With Instantaneous Current Control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 4, pp. 2614-2625, Jul./Aug. 2014.
- [3] 정대웅, "육상 전압에 의한 3 상 전압형 인버터 PWM 방법의 일반적 해석," 박사학위논문, 서울대학교, 2002.