

공간벡터 펄스폭변조법의 새로운 과변조 연산 알고리즘

이진우, 강병희, 백상기, 민종진
삼성종합기술원 System & Control Sector

New Calculation Algorithm for the Overmodulation in Space Vector

J. W. Lee, B. H. Kang, S. K. Baek, J. J. Min
System & Control Sector, Samsung Advanced Institute of Technology

Abstract - 공간벡터 펄스폭변조법과 관련하여 과변조시의 전류제어성능을 향상시킬 수 있는 벡터 과변조의 새로운 연산 알고리즘으로 유효전압벡터를 반지름으로 하는 원을 이용하여 수정된 기준전압벡터가 위치할 섹터를 구하고, 전압제한 6각형을 나타내는 전압벡터식을 이용하여 동일한 수식으로 벡터과변조하는 간결한 새로운 알고리즘을 제시하고, 이를 전류제어 시뮬레이션에 적용하였다.

기존의 과변조 연산방법을 검토하고, 이 방법의 실용화에 기여할 수 있는 보다 효과적인 연산방법을 제안하며, 전압형 컨버터에 벡터과변조 방식 공간벡터 변조법을 적용한 전류제어 시뮬레이션 결과를 보이고자 한다.

1. 서 론

2. 벡터과변조 방식 공간벡터 전압변조법

최근 전력용 반도체 소자로서 IGBT를 채택한 전압형 인버터가 보편화되고 있으며, 또한 PWM 방법으로는 현재 정현과 전압변조법이 널리 사용되고 있으나, DSP와 같은 프로세서의 발달로 정현과 전압변조법보다 선형적인 전압변조영역이 약 15.5% 향상되며 고조파 특성이 우수한 공간벡터 전압변조법을 채택한 인버터가 최근 출시되고 있다. 그리고 이러한 공간벡터 전압변조법의 실시간 구현을 용이하게 하기 위한 연구 및 효과적인 과변조방법에 대한 연구로 이 방법의 실용화가 더욱 촉진될 것으로 전망된다.

공간벡터 전압변조법의 기본원리는 한 주기내에서 기준전압벡터와 평균적으로 동일한 전압벡터를 컨버터 또는 인버터의 전압벡터를 이용하여 합성하는 것으로 기준전압벡터가 벡터공간상에 위치한 섹터의 유효전압벡터와 영전압벡터를 이용하며, 그림 1의 섹터 0에 위치한 기준전압벡터(V^*)에 대하여 수식으로 표현하면 다음과 같다.

한편 공간벡터 전압변조법의 과변조방법으로는 과변조영역 전압벡터의 크기만을 축소하는 방법(이하 Scalar Overmodulation Scheme 이라 함.)이 있으며, 이 방법은 구현이 간단한 특징이 있다. 그리고 기준전압벡터에 가장 가까운 전압벡터로 과변조함으로써 전압변조면에서 최대전압벡터를 인가하는 과변조방법이 있다. 또한 전류오차에 따른 제한 제어전압벡터와 역기전력 등을 보상하는 보상전압벡터로 구성된 기준전압벡터로부터 제어전압벡터의 크기만을 축소하는 과변조방법(이하 Vector Overmodulation Scheme 이라 함.)이 있다. 이 방법은 과변조시 보상전압벡터는 변화시키지 않고 제어전압벡터의 방향은 유지하면서 크기만을 축소하기 때문에 전류제어응답이 늦어질 뿐 전류제어는 이루어진다.

$$V^* T_s = V(1) T_1 + V(2) T_2 \quad (1)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (2)$$

단, T_s 는 샘플링시간, T_1 , T_2 , T_0 는 각각 $V(1)$ 과 $V(2)$ 의 유효전압벡터, $V(0)$ 또는 $V(7)$ 의 영전압벡터를 인가하는 시간이다.

식 (1)로 부터 유효전압벡터의 크기($\sqrt{2/3} V_{dc}$)를 이용하여 인가하는 시간을 구하면 아래와 같다.

$$T_1 = \sqrt{2} T_s \frac{|V^*|}{V_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \quad (3)$$

$$T_2 = \sqrt{2} T_s \frac{|V^*|}{V_{dc}} \sin(\alpha) \quad (4)$$

한편, 공간벡터 전압변조법에서 그림 1에 나타낸 것과 같이 기준전압벡터(V^*)가 과변조영역에 있는 경우에는 과변조방법이 필요하며, 스칼라과변조 방법은 식 (5)와 같이 기준전압벡터의 크기만을 축소하여 수정된 기준전압벡터(V^*_{1a})를 얻는 방법이며, 벡터과변조 방법은 식 (6)과 같이 기준전압벡터 중에서 제어전압벡터(U^*)의 크기만을 축소하여 수정된 기준전압벡터(V^*_{1b})를 구하는 방법이다.

$$V^*_{1a} = k V^* \quad (5)$$

$$V^*_{1b} = E^* + k U^* \quad (6)$$

본 논문에서는 이와 같은 벡터과변조법을 위한

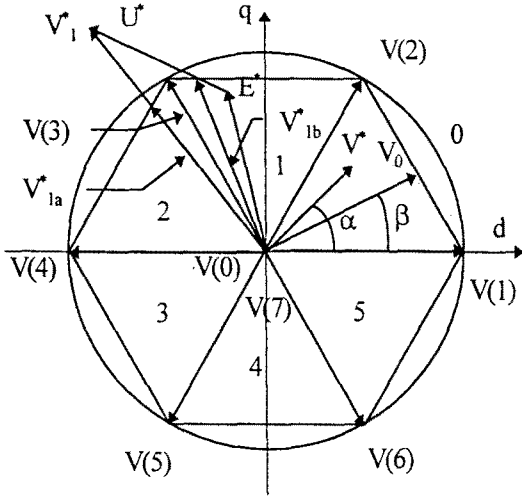


그림 1. 공간 전압 벡터도

2.1 기존 벡터과변조 연산 알고리즘

(1) 전류오차벡터를 이용하는 방법[1] 정지좌표계에서 6개의 유효전압벡터를 인가하는 각각의 경우에 대한 가상전류오차벡터를 구하고, 전류오차벡터 공간상에서 실제의 전류오차벡터와 가장 가까운 위치에 있는 2개의 가상전류오차벡터를 선택한다. 그리고 이에 대응하는 2개의 전압벡터를 찾고, 이 전압벡터를 이용하여 스칼라방식 공간벡터 전압변조법과 같은 방식으로 유효전압벡터의 인가시간을 계산하는 방법이다.

(2) 좌표변환을 이용하는 방법[2] 주어진 정지좌표계의 기준전압벡터를 좌표변환행렬을 이용하여 직교좌표계로 변환하고, 직교좌표계상에서 비례관계를 이용하여 제어전압벡터의 크기를 축소하고, 보상전압벡터와 축소된 제어전압벡터를 정지좌표계로 변환하여 공간벡터 전압변조법을 위한 수정된 기준전압벡터를 구하는 방법이다.

(3) 섹터의 직선방정식을 이용하는 방법[3] 주어진 기준전압벡터의 수정된 기준전압벡터가 위치할 섹터는 중심이 원점이고 유효전압벡터를 반지름으로 하는 원과 식(6)의 전압벡터의 교점이 위치하는 섹터와 항상 일치하므로 이를 이용하여 섹터의 위치를 구한다. 한편, 전압제한 6각형 각변의 직선방정식중에서 해당섹터의 직선방정식을 선정 후 벡터과변조 방식의 수식과 연립하여 수정된 기준전압벡터를 구하는 방법이다.

2.2 새로운 벡터과변조 연산 알고리즘

먼저 정지좌표계에서 과변조영역 기준전압벡터를 중심이 원점이고 유효전압벡터의 크기를 반지름으로 하는 원주상으로 1차 벡터과변조하여 수정된 기준전압벡터가 위치하게 될 벡터공간상의 섹터위치를 구한다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 기준전압벡

터가 벡터공간상의 임의의 위치에 있더라도 수정된 기준전압벡터가 위치하게 될 섹터의 위치는 항상 정확하게 구할 수 있다.

즉 원주상의 임의의 점을 나타내는 전압벡터와 식 (6)의 벡터를 식 (7), 식 (8)과 같이 연립하여 계산하면 1차 벡터과변조된 전압벡터를 구할 수 있다.

$$V_d^* = E_d^* + k_1 U_d^* = \sqrt{2/3} V_{dc} \cos(\theta) \quad (7)$$

$$V_q^* = E_q^* + k_1 U_q^* = \sqrt{2/3} V_{dc} \sin(\theta) \quad (8)$$

한편 식 (7), 식(8)로부터 미지수 k_1 에 대한 2차 방정식을 구하고 그 해를 구하면 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \quad (9)$$

$$\text{단, } a = (U_d^*)^2 + (U_q^*)^2, b = 2(U_d^* E_d^* + U_q^* E_q^*)$$

$$c = (E_d^*)^2 + (E_q^*)^2 - \frac{2}{3} (V_{dc})^2$$

여기서 실제 컨버터 또는 인버터의 직류링크전압은 항상 보상전압($|E^*|$)보다 크게 설계되므로 제 공급의 값은 항상 양수이고, 과변조영역에서 $k_1 \geq 0$ 이므로 k_1 의 값은 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$k_1 = \frac{-b + \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \quad (10)$$

이를 이용하여 1차 과변조된 전압벡터의 위치를 계산하면 식 (11)과 같으며, 이로부터 수정된 기준전압벡터가 위치하는 섹터의 위치정보($n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$)를 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_q^*}{V_d^*} \right) \quad (11)$$

한편 섹터위치정보(n)와 섹터내에서 벡터의 위치각도(β) 를 이용하면 전압제한 6각형을 나타내는 전압벡터는 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$V_0 = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2} \cos(\beta - \pi/6)} e^{j(\beta + n\pi/3)} \quad (12)$$

식 (12)와 식 (7), 식 (8)의 좌변식을 이용하여 섹터내에서의 위치각도(β)와 과변조계수(k)를 구하면 식 (13), 식 (14), 식 (15)와 같다.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-\sqrt{3} \cdot d/2 + (e-f) \sin(n\pi/3)}{e \cdot \sin(n\pi/3) + f \cdot \cos(n\pi/3) + d/2} \right) \quad (13)$$

$$\text{단, } d = U_d^* E_d^* - U_q^* E_q^*, e = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} U_d^*$$

$$f = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} U_q^*$$

$$k = \left[\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \frac{\cos(\beta + n\pi/3)}{\cos(\beta - \pi/6)} - E_d^* \right] \frac{1}{U_d^*}, U_d^* \neq 0 \quad (14)$$

$$k = \left[\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \frac{\sin(\beta + n\pi/3)}{\cos(\beta - \pi/6)} - E_q^* \right] \frac{1}{U_q^*}, U_q^* \neq 0 \quad (15)$$

식 (14) 또는 식 (15)로 부터 구한 과변조계수를 이용하여 수정된 기준전압벡터를 계산한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘을 적용한 벡터과변조방식 공간 벡터 전압변조법을 이용한 PWM 컨버터의 전류제어 시스템을 Simulink/Matlab 으로 모델링한 전체 시스템 구성도는 그림 2와 같고, 이는 전류제어부 (Idq_Cont), 공간벡터 전압변조부(SVPWM), 동기좌표계상에서 모델링한 교류측회로부(Current_Idq)의 세부분으로 크게 구성되어 있으며, 직류링크부분은 이상적인 것으로 가정한다 [4].

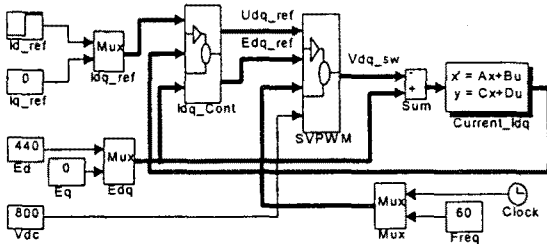


그림 2. 전류제어시스템의 Simulink 블록도

시뮬레이션에 사용한 전류제어기는 전원전압과 상호간섭을 보상하는 동기좌표계 전류제어기로서 궤환제어부는 조건부적분기를 이용한 그림 3과 같으며, 시스템 상수는 표 1과 같다.

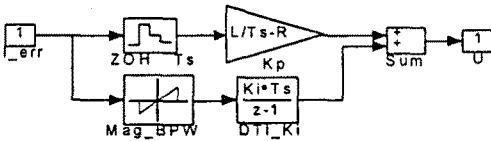
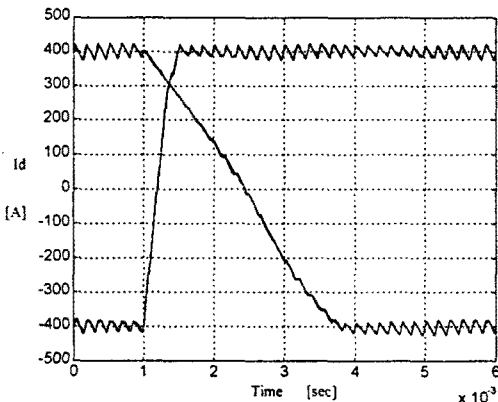


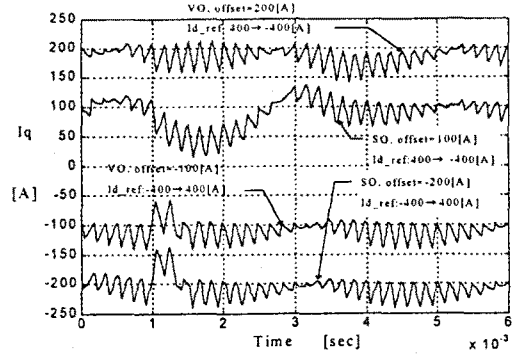
그림 3. 궤환전류제어기 블록도

표 1. 시스템 상수

L = 0.5[mH]	Vdc = 800[V]	fsw = 3[kHz]
R = 2[mΩ]	Vll = 440[V]	Kp = 2.998
C = 27.2[mF]	Pout = 185[kW]	Ki = 2250



(a) d축 전류파형



(b) q축 전류파형

그림 4. 전류제어 시뮬레이션 과정 (VO: 벡터과변조, SO: 스칼라과변조, Iq*: +400 ↔ -400[A], Iq* = 0[A], 조건부적분기 llimit = 50[A])

그림 4는 벡터·스칼라과변조 방법에 따른 전류제어 시뮬레이션 과정으로서 d축 전류파형은 거의 차이가 없으나, q축 전류파형은 과변조가 발생하는 과도상태에서 응답특성 차이가 발생하며, 특히 제어전압이 상대적으로 작은 과도상태에서 크게 나타난다. 이로 부터 과도상태에서 벡터과변조 방법이 우수한 제어특성을 나타냄을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 공간벡터 전압변조법과 관련한 기존의 벡터과변조 연산 알고리즘을 검토하고, 전압제한 6각형을 나타내는 전압벡터식을 이용하여 새로운 간결한 연산 알고리즘을 제안하고, PWM 컨버터의 전류제어 시뮬레이션에 적용하였으며, 과변조가 발생하는 과도상태에서 벡터과변조 방법의 전류제어특성이 우수함을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Thomas G. Habetler, "A Space Vector-Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 8, no.1, pp. 30-36, 1993
- [2] J. K. Seok, J. S. Kim, J. W. Choi and S. K. Sul, "Overmodulation Strategy for High Performance Torque Control", IEEE PESC Conf. Rec., pp. 1549-1554, 1996
- [3] 최중우, "D-Q 상호간섭성을 이용한 속응 교류 전류제어기", 서울대학교 공학박사학위논문, pp. 36-40, 1996
- [4] Jin-Woo Lee, "A Novel Decoupled Current Controller without Overshoot for PWM Converters", IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec., pp. 1080-1084, 1996