

펄스 누락 영역에서 3레벨 GTO 인버터의 향상된 공간 벡터 변조 방식

강구배 · 성정현 · 남광희
포항공과대학교 전자전기공학과

An Improved Space Vector Modulation Scheme for Three Level GTO Inverters in Pulse Dropping Region

Gubae Kang · Jeonghyun Sung · Kwanghee Nam
Department of Electrical Engineering, POSTECH University

Abstract - GTO 소자의 최소 턴온 시간 (minimum turn-on time, T_{min}) 때문에 발생된 지령전압 오차를 보상하는 기법을 제안한다. 공간 벡터전압(V_i)의 턴온시간이 T_{min} 보다 작을 경우에는 전압오차를 PI 제어기로 보상한다. 또한, 지령전압벡터의 크기가 특정한 값(V_{min})보다 작은 경우, 영벡터(zero vector)가 PWM 주기에서 중간에 배치되도록 스위칭 순서를 바꿔준다. 시뮬레이션을 통해 이러한 지령전압 오차의 보상으로 펄스 누락(pulse dropping) 영역에서 출력전압의 대칭성이 향상되고 고조파 함유량이 감소한다는 사실을 보인다.

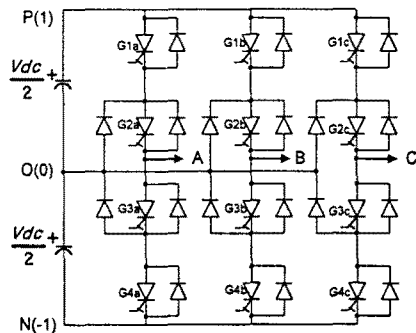


그림 1 3레벨 GTO 인버터의 회로도

1. 서 론

Gate turn-off thyristor(GTO) 스위칭 소자는 소자 특성상, 100 μ sec 정도의 최소 턴온 시간이 요구된다. 이러한 최소 턴온 시간때문에 지령전압, 출력전압, 출력전류에 왜곡 및 비대칭을 초래시킨다. 3레벨 인버터에서 GTO 소자의 최소 턴온 시간에 의한 출력파형 왜곡을 보상하기 위한 공간벡터변조(SVM) 기법이 여러 가지 제시되었다[1]-[3]. 그러나 이 방식은 GTO소자의 최소 턴온 시간 확보에 따른 지령전압의 오차는 고려하지 않았다. 이를 고려한 pulse number modulation(PNM)를 갖는 sinusoidal pulse width modulation(SPWM) 방식[4]이 제시되었다. 그러나 이러한 PNM을 갖는 SPWM 방식은 가변 pulse width modulation(PWM) 스위칭으로 보상을 하는 단점을 갖고 있고, SVM 방식에 대해서 언급을 하지 않았다.

본 논문에서는 일정한 PWM 주파수를 갖는 SVM 방식에서 PI 제어기로 지령전압 오차를 보상하는 기법과 지령전압이 V_{min} 보다 작은 경우에 영벡터를 기준으로 스위칭 순서를 재설정하여 오차를 갖지 않도록 하는 스위칭 기법을 제시하고, 이를 3레벨 GTO 인버터에 적용한다.

표 1 3레벨 인버터의 스위칭 상태와 출력전압

G1x	G2x	G3x	G4x	출력 전압	스위칭 상태
ON	ON	OFF	OFF	V_{dc}	1
OFF	ON	ON	OFF	$V_{dc}/2$	0
OFF	OFF	ON	ON	0	-1

(x = a, b, c)

제안된 보상기법으로 지령전압 오차를 보상한 SVM 방식은 출력전압의 대칭성을 향상시키고, 왜곡과 고조파 성분을 감소시킨다는 사실을 시뮬레이션을 통해 살펴보고자 한다.

2. 3레벨 GTO 인버터의 SVM

삼상 대칭 SVM은 SPWM보다 출력전압 및 전류의 리플을 감소시킨다. 3레벨 인버터는 출력전압을 0, $V_{dc}/2$ 와 V_{dc} 를 합성하여 만들기 때문에, 2레벨 인버터에 비해 출력전압 및 전류에 고조파 성분이 적은 장점이 있다. 그러나 3레벨 인버터에서의 SVM 방식은 중성점 전압의 불균형, PWM의 스위칭 대칭과 최소 스위칭을 고려해야 하고 dead-time과 최소 턴온 시간에 큰 영향을 받는다

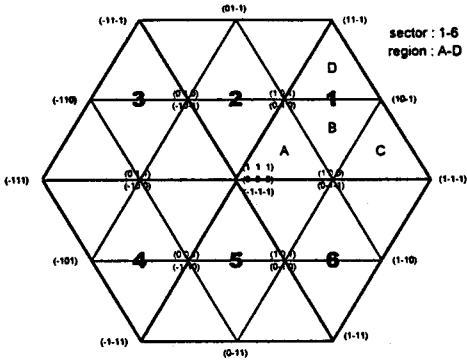


그림 2 스위칭상태에 따른 공간벡터전압의 분류

(5)(6).

2.1 3레벨 GTO 인버터의 구조

그림 1은 일반적인 3레벨 GTO 인버터의 회로도를 나타낸다. 인버터의 각 상은 4개의 GTO 스위칭소자, 4개의 freewheeling 다이오드와 2개의 클램핑 다이오드로 구성되어 있다. 표 1은 3레벨 인버터의 스위칭 상태에 따른 출력전압을 나타낸다.

2.2 3레벨 SVM의 구현

그림 2는 3레벨에서의 스위칭 상태에 따른 공간벡터를 나타내었다. 이러한 공간벡터의 각 sector(1-6)는 4개의 region(A-D)로 나누어진다. 정지 좌표계에서 지령벡터전압(V^*)이 주어지면 3레벨 PWM 스위칭 상태를 찾기 위해서 V^* 에 인접한 세 개의 공간벡터전압을 설정한다. 이 공간벡터전압들을 한 주기 T_s (PWM switching period)동안 합성하여 평균적으로 지령전압을 만들어낸다.

그림 3은 이러한 공간전압벡터(V_1-V_5)들과 sector 1에서 V^* 가 region A에 들어갔을 경우에 스위칭 순서를 나타낸다. 여기서 DC link 중성점 불균형 문제를 고려한 PWM 스위칭 순서가 사용되었다. 즉 공간전압벡터 V_1 과 V_4 를 V_{1p} , V_{1n} 와 V_{4p} , V_{4n} 으로 나누어 V^* 로 합성시킨다[3]. 단, V_{1p} 와 V_{4p} 는 상단 DC link 캐패시터의 $V_{dc}/2$ 해당하는 공간벡터전압이고, V_{1n} 와 V_{4n} 는 하단 DC link 캐패시터의 $V_{dc}/2$ 에 해당하는 공간벡터전압이다. Region A와 C에서는 V_1 , region B와 D에서는 V_4 를 PWM 주기에서 중간에 배치가 되도록 스위칭 순서를 설정한다.

이때 각 공간벡터에 대한 PWM 스위칭 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$V_0 T_0 + V_1 T_1 + V_4 T_4 = V^* T_s \quad (1)$$

$$T_0 + T_1 + T_4 = T_s \quad (2)$$

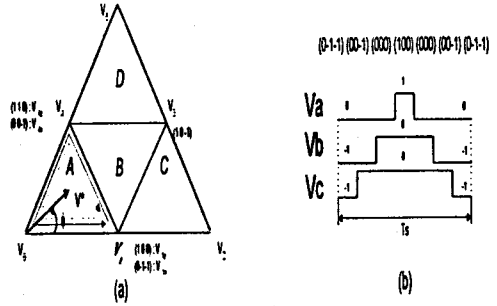


그림 3 공간전압벡터 V_0-V_5 (a)와 region A에서 스위칭 순서(b)

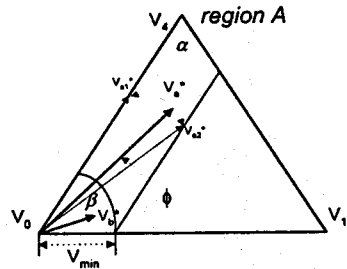


그림 4 Region A에서의 보상을 위한 pulse dropping 영역의 분류

여기서

$$V_0 = 0, \quad V_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc}, \quad V_4 = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} e^{jn/3}$$

이다. 식 (1)과 (2)를 풀면 스위칭 시간 T_0 , T_1 와 T_4 는 다음과 같이 주어지며,

$$\begin{aligned} T_0 &= T_s \left[1 - 2m \sin \left(\frac{\pi}{3} + \phi \right) \right] \\ T_1 &= T_s \left[2m \sin \left(\frac{\pi}{3} - \phi \right) \right] \\ T_4 &= T_s \left[2m \sin \phi \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$$m = \frac{|V^*|}{V_{dc}/\sqrt{3}} \quad (0 \leq m \leq 1)$$

은 변조 지수이다.

같은 방식으로 region B, C와 D에 대해서 스위칭 시간을 계산할 수 있다.

3. 최소 펄스 시간 보상을 갖는 향상된 SVM

Region A에서 공간벡터전압 V_1 의 턴온시간이 T_{min} 보다 작은 경우 GTO 소자의 최소 턴온 시간을 확보하기 위해서 T_1 의 수정이 불가피하다. 이때 발생하는 지령전압 오차를 보상하기 위해서 각 sector의 region A에 속하는 펄스 누락 영역을 다음의 형태로 분류하였다. 첫째, 지령전압 오차를 PI 제어로 제한 보상하는 영역(α)과 둘째, V^* 가 V_{min} 보다 작은 경우에 영벡터가 PWM 주기에

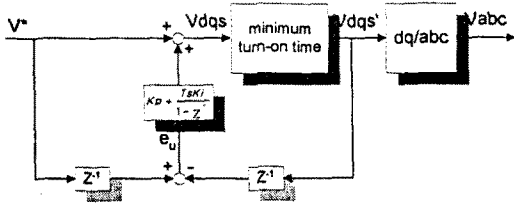


그림 5 영역 α 에서 PI 제어기를 갖는 제한 보상 구성도

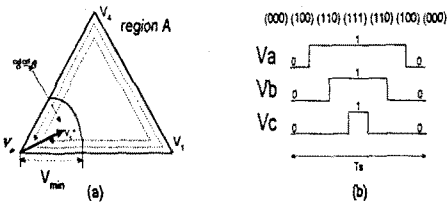


그림 6 영역 β 에서의 공간벡터전압(a)와 영벡터 전압을 이용한 스위칭 순서(b)

서 중간에 배치가 되도록 스위칭 순서를 바꾸어 지령전압 오차를 갖지 않도록 하는 영역(β)으로 분류된다. 그림 4는 펄스 누락 영역을 이러한 α , β 영역으로 분류한 것을 나타내었다.

3.1 PI 제어기를 이용한 제한 보상

지령전압의 T_1 이 T_{min} 보다 작은 경우에 그림 4에서처럼 최소 턴온 시간을 확보하기 위해 지령전압 V_a^* 를 근접한 공간벡터전압(V_{a1}^* , V_{a2}^*)으로 변환시킨다. 이때 발생하는 지령전압의 오차를 PI 제어기를 이용해 제한 보상을 한다. 그림 5에서 이러한 PI 제어기를 갖는 제한 보상 구성도를 나타내었다. 보상된 지령전압치 ($V_{dq*}(k)$)는 지령전압 $V^*(k-1)$ 과 출력전압 ($V_{dq*}'(k-1)$)와의 오차를 PI 제어기를 이용하여 다음과 같이 보상한다.

$$V_{dq*}(k) = V^*(k) + \left(K_p + \frac{T_s K_i}{1-z^{-1}} \right) e_u(k) \quad (4)$$

여기서 $e_u(k) = V^*(k-1) - V_{dq*}'(k-1)$ 이다.

실제 인버터에는 최소 턴온 시간을 고려한 $V_{dq*}'(k)$ 이 인가된다.

3.2 영벡터전압을 이용한 스위칭 보상

Region A에서 정직좌표계의 V_b^* 가 그림 3의 (b)의 스위칭 순서로 합성될 때, T_{min} 에 해당하는 전압은 다음과 같다.

$$V_{min} = \frac{1}{3} \frac{T_{min} V_{dc}}{T_s} \quad (5)$$

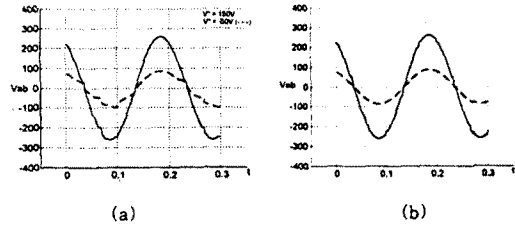


그림 7 5Hz에서 보상 전(a)과 보상 후(b)의 평균 지령전압

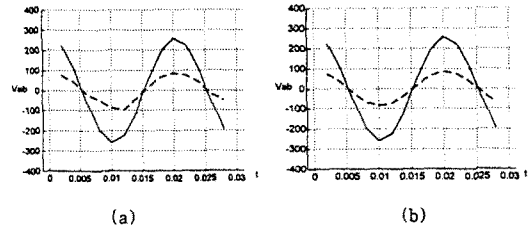


그림 8 50Hz에서 보상 전(a)과 보상 후(b)의 평균 지령전압

이때 지령전압이 V_{min} 보다 작은 경우에 T_1 과 T_4 는 최소 턴온 시간에 걸리게 되어 지령전압 오차를 초래한다. 따라서 V_1 과 V_4 를 기준전압으로 하여 스위칭 순서가 정해지는 PWM 방식 대신에 영벡터가 PWM 주기에서 중간에 배치가 되도록 스위칭 순서를 바꾸어서 보상해준다.

그림 6은 영역 β 에서의 공간전압벡터(a)와 영벡터를 이용한 스위칭 순서(b)를 나타내었다. 여기서 영벡터 전압을 이용한 스위칭 순서를 살펴보면, sector 1, 3, 5의 β 영역에서는 $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_4 \rightarrow V_0 \rightarrow V_4 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$ 의 순서로, sector 2, 4, 6의 β 영역에서는 $V_0 \rightarrow V_4 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_4 \rightarrow V_0$ 의 순서로 스위칭 순서가 구성된다. 따라서 DC link 상·하단 캐패시터의 $V_{dc}/2$ 전압을 교대로 사용함으로써 중성점 불균형 문제를 약화시킨다. 또한 최소 턴온 시간은 영벡터 전압에 해당하는 T_0 에 나타나므로 전압오차를 갖지 않는다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 파라미터는 다음과 같다.

DC link voltage	$V_{dc} = 1000V$;
최소 턴온 시간 전압	$V_{min} = 67V$;
minimum turn-on time	$T_{min} = 100 \mu sec$;
PWM 주파수	$fc = 500Hz$;
PI 제어기 gain	$K_p = 0.015$;
	$K_i = 10$.

그림 7과 8은 전기각속도(ω_e)가 각각 5Hz와 50Hz일때, 일반적인 SVM에 의한 평균적인 선간 지령전압(a)과 α, β 영역에서 보상을 고려한 평균

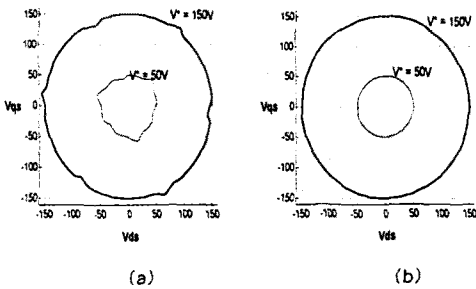


그림 9 정지좌표계에서의 5Hz에서 보상 전(a)과 보상 후(b)의 평균 지령전압(V_{dqs}')

적인 순간 지령전압(b)을 나타내었다. 5Hz의 저속에서 보상된 평균 지령전압은 대칭성이 향상되고 왜곡이 감소되었음을 볼 수 있다. 또한 50Hz의 고속에서는 V^* 가 V_{min} 보다 작은 경우에 적용되는 영역 β 에서 보상이 잘 되는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 5Hz의 전기각속도에서 지령전압이 50V와 150V일 때, α, β 영역에서 보상 전(a)과 보상 후의 정지좌표계에서의 평균 지령전압을 나타내었다. 그림 10는 25Hz에서 V^* 가 50V(a), 150V(b)와 500V(c)인 경우에 보상된 PWM 순간전압과 평균 지령전압을 나타내었다.

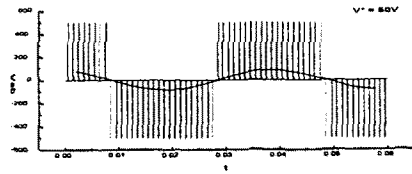
5. 결 론

본 논문에서는 3레벨 GTO 인버터에서 스위칭 소자의 최소 턴온 시간 때문에 발생하는 지령전압 오차를 보상하는 기법을 제시하였다. 제안된 기법은 펄스 누락 영역에서 PI 제어기를 이용한 제한 보상과 영벡터 전압을 이용하여 스위칭 순서를 바꾸는 보상 방법을 결합한 것이다.

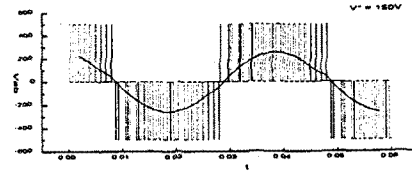
이러한 보상으로 보상할 경우, PWM 출력전압의 대칭성을 향상시키고, 왜곡을 개선시켜 고조파 성분을 감소시켰다. 이를 시뮬레이션을 통해 확인하였고, 제안된 SVM 방식을 3레벨 GTO 인버터 시스템에 향후 적용할 예정이다.

[참 고 문 헌]

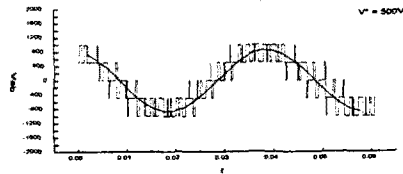
[1] H. L. Liu, G. H. Cho, "Three-level space vector PWMs in low index modulation region avoiding narrow pulse problem", *IEEE PESC Rec.*, pp. 257-262, 1993.
 [2] F. B. Aminar, L. P. Contesse, M. P. David, B. D. Fornel, "Power-range extension of an induction motor speed-drive by using a three level GTO inverter with space vector modulation", *EPE*, vol. 5, pp. 219-223, 1993.



(a)



(b)



(c)

그림 10 25Hz에서 V^* 가 50V(a), 150V(b)와 500V(c)일 때 PWM 순간전압과 평균 지령전압

[3] M. Koyama, T. Fujii, R. Uchida, T. Kawabata, "Space voltage vector-based new PWM method for large capacity three-level GTO inverter", *IEEE ICON Rec.*, pp. 271-276, 1992.
 [4] S. Tadakuma, S. Tanaka, K. Miura, W. O. Amaah, "improved PWM control for GTO inverters with pulse number modulation", *IEEE, Trans. Indus. Appl.*, Vol. 32, No. 3, pp. 526-532, 1996.
 [5] H. L. Liu, N. S. Choi, G. H. Cho, "DSP based space vector PWM for three-level inverter with DC-link voltage balancing", *IEEE, ICON Rec.*, pp. 197-203, 1991.
 [6] B. S. Suh, D. S. Hyun, "A new N-level high voltage inversion system", *IEEE, Trans. Indus. Elect.*, Vol. 44, No. 1, pp. 107-115, 1997.