

# DC-링크 전압균형과 최소 온-오프 시간을 고려한 새로운 3-레벨 GTO 인버터 제어기법

이요한\*, 현동석  
한양대학교 전기공학과

## A New Switching Method for 3-level GTO Inverter Considering DC-link Voltage Balancing and Minimum on/off time

Yo-Han Lee\* and Dong-Seok Hyun  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract**—In realizing a three-level GTO inverter, we should keep the voltage balancing of DC-link capacitors and consider minimum on/off time of GTO thyristors in order to make the same blocking voltage across each device and to minimize the harmonic components of the output voltage and current. In this paper, a new PWM scheme based on space voltage vectors, by which it is possible to keep neutral-point voltage and avoid narrow pulse, is presented. Experimental results verify that the proposed PWM control scheme is suitable for high power and high voltage three-level GTO inverters applied to induction motor drives.

### 1. 서론

3-레벨 GTO PWM 인버터[1-3]를 구현하는데 있어서 반드시 고려해야 할 몇 가지 사항이 있다. GTO는 최소 온-오프 시간제한이 있는데, 만약 이 제한을 충분히 고려하지 않으면 턴-온/턴-오프 실패가 발생하거나 출력성분에 우리가 원하지 않는 고조파 성분이 나타난다. 또 DC-링크 커패시터간의 전압균형 문제를 고려해야 하는데, 원하는 5-레벨의 전압을 구현하고 각 스위칭 소자간 같은 차단전압을 유지하기 위해서는 반드시 전압균형 문제를 해결해야만 한다.

지금까지 이 두 문제를 해결하고자 하는 많은 PWM알고리즘이 제안되어 왔으나 만족할 만한 결과를 보여주지 못했다[4-6]. 즉, 모든 지령전압벡터에 대한 최소-온 오프 시간이 고려되지 못하고 있으며 DC-링크 전압균형문제도 PWM알고리즘만으로는 해결되지 못하고 있다.

따라서 본 논문에서는 공간전압벡터에 기초한 새로운 PWM 방법을 제안하고자 하며, 이 방법의 타당성을 실험을 통해 입증한다.

### 2. 기존의 PWM방법

#### 2.1 3-레벨 인버터 구성과 스위칭

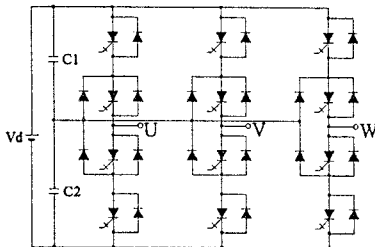


그림 1. 3-레벨 인버터 구성도

그림 1은 3-레벨 GTO인버터의 구성도이다. 각 상에는 세 개의 스위칭 상태가 존재하므로 3-레벨 인버터는 모두 27개의 스위칭 상태를 갖는다. 그림 2는 출력전압에 대한 공간전압벡터 표현을 보여준다. 여기서 기호 P, O, N은 U, V, W상의 단자전압이며 각각  $V_d/2, 0, -V_d/2$ 를 나타낸다.

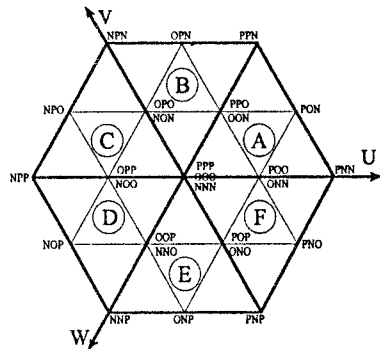


그림 2. 공간전압벡터표현

#### 2.2 전압벡터의 출력시간과 DC-링크 전압균형

그림 3은 Section A에 대한 확대그림이다. 일반적으로 공간전압벡터 PWM에 있어서 지령전압벡터가 주어지면 출력전압은 고조파성분을 최소화하기 위해 지령전압벡터에 인접한 세 전압벡터를 합성해서 얻어진다. 예를 들어서 지령전압벡터가 영역 3에 존재한다면 선택되는 전압벡터는  $V_1, V_3, V_4$ 이고 이때 각 전압벡터의 출력시간은 다음과 같다.

$$t_1 = T_s(1 - 2k \sin \theta)$$

$$t_3 = T_s[2k \sin(\theta + \pi/3) - 1]$$

$$t_4 = T_s[2k \sin(\theta - \pi/3) + 1]$$

여기서,  $k = 2V/\sqrt{3}$ : 변조비  $[0 \leq k \leq 1]$

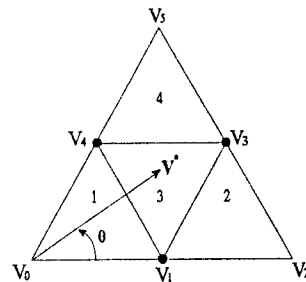


그림 3. Section A에서의 전압벡터

각 전압벡터가 DC-링크 전압균형에 어떠한 영향을 주는지는 잘 알려져 있다. 그림 4는 DC-링크 전압불균형이 야기될 수 있는 상황을 보여주고 있다.

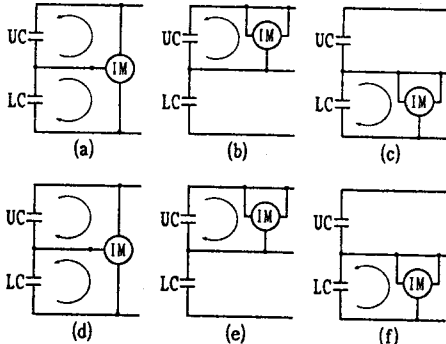


그림 4. 부하 상태에 따른 UCV와 LCV사이의 전압불균형 (a),(b),(c);  $UCV > LCV$  (d),(e),(f);  $UCV < LCV$

### 3. 최소 온-오프 시간을 고려한 스위칭 패턴

#### 3.1 좁은 펄스의 발생원인

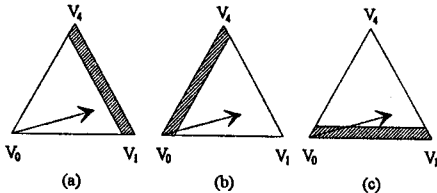


그림 5. 전압벡터와 시간과의 관계

계산되어진 출력시간을 토대로 하여서 지령전압벡터와 출력 시간과의 관계를 도식적으로 나타낼 수 있다.  $T_s$ (샘플링 시간)가 2ms라 할 때, 그림 5(a)의 빗금친 영역은  $t_0 < 200\mu s$ 인 영역을 나타내며 그림 5(b)는  $t_1 < 200\mu s$ , 5(c)는  $t_4 < 200\mu s$ 인 영역을 나타낸다. 이러한 관계들은 다른 영역 2,3,4에도 똑같이 적용될 수 있다. 따라서 지령전압벡터가 머무는 위치를 통해서 좁은 펄스의 발생여부를 알 수 있게 된다. 그러나 실제로는 출력시간이 200 $\mu s$ 이하인 전압벡터를 출력할 때 소자의 스위칭 상태가 바뀌어야만 좁은 펄스가 발생하게 된다.

#### 3.2 최소 온-오프 시간제한에 대한 해결책

좁은 펄스에 대한 해결책은 출력시간이 200 $\mu s$ 이상인 전압벡터와 전압벡터의 출력순서를 이용하는 것이다. 즉, 만약 200 $\mu s$ 보다 짧은 펄스가 발생하면 200 $\mu s$ 보다 긴 전압벡터를 이용해서 스위칭 상태가 변하지 않게 전압벡터의 출력순서를 조정하는 것이다. 예를 들어 영역 1에서 ZVV의 출력시간이 400 $\mu s$ 이상일 때 다음과 같은 출력순서를 생각할 수 있다.

U:	P	P	O	O	N	N	N	O	O	P	P
V:	P	O	O	O	N	N	N	N	O	O	P
W:	P	O	O	N	N	N	N	N	O	O	P

$Ta/4$   $Ta$   $Ta/2$   $Tc$   $Ta/4$   $Ta/4$   $Tc$   $Ta/2$   $Tb$   $Ta/4$

주어진 스위칭 순서에서  $Tb$ ,  $Tc$ 는 200 $\mu s$ 보다 짧을 수 있다. 그러나 (POO)나 (OON)에서 스위칭 상태가 변하지 않으므로 200 $\mu s$ 보다 짧은 펄스는 발생하지 않는다.

따라서 이와 같은 방법으로 각 영역에서 출력시간이 긴 전압벡터와 출력 순서를 생각하여 그림 6처럼 12개의 영역을 나누고 이에 따라 표 1과 같은 스위칭 순서를 생각할 수 있다.

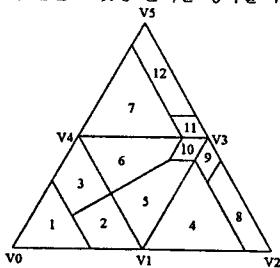


그림 6. 최소 온-오프 시간을 고려한 영역

표 1. 각 영역에서의 스위칭 패턴

R/S	A	B	C	D	E	F
1	NOOPP NOOPP NNOPP	NOOPP NOOPP NOOPP	NOOPP NOOPP NOOPP	NOOPP NOOPP NOOPP	NOOPP NOOPP NOOPP	NOOPP NOOPP NOOPP
2	POOO OOON OONN	OOOP OOFP NOOO	OONN POOO OOON	NOOO OOOP OOFP	OONN POOO POOO	OOFP NOOO OOOP
3	PPOO POOO OOON	NOOO OOOP NOOO	OONN PPOO POOO	NOOO NOOO OOOP	OONN POOO PPOO	OOFP NOOO NOOO
4	PPPO OONN ONNN	OOFP OOPP NNNO	OONN PPPO OONN	NNNO OOPP OOPP	OONN ONNN PPOO	OOPP NNNO OOPP
5	PPOO OOON ONNN	OOOP OOPP OONN	OONN PPOO OONN	NNNO OOOP OOPP	OONN ONNN PPOO	OOPP NNNO OOOP
6	PPPO POOO OONN	NOOO OOFP NNNO	OONN PPPO PPOO	NNNO NOOO OOFP	POOO OONN PPOO	OOPP NNNO NOOO
7	PPPO POOO ONNN	NOOO OOPP NNNO	OONN PPPO PPOO	NNNO NNOO OOPP	PPOO OONN PPOO	OOPP NNNO NOOO
8	PPP NOO NNN	POO PPO NNN	PPP PPO NOO	NNN POO PPO	NOO NNO PPP	PPO NNN POO
9	OFP NNO NNN	PPO PPP ONN	NNN OPP NNO	OONN PPO PPP	NNO NNN OPP	PPP ONN PPO
10	PPO OOO ONN	OOO OFP NNO	PPO PPO OOO	OOO OFP OFP	OOO ONN PPO	OFP NNO OOO
11	PPP OFP NNO	OONN PPO NNN	NNN PPP OFP	NNN ONN PPO	PPP NNO OFP	PPO NNN ONN
12	OFP OOP NNN	OONN OFP ONN	NNN OFP OOP	OONN OON PPP	OOP NNN OFP	PPP ONN OON

#### 3.3 문제 영역과 영전압벡터 선택방법

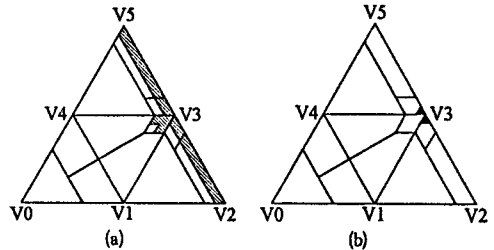


그림 7. 표면상의 문제영역과 실제적인 문제영역

주어진 스위칭 패턴에서 좁은 펄스의 문제가 해결될 수 없는 영역이 있다(그림 7(a)). 만일 지령전압벡터가 이 영역 안에 머문다면 좁은 펄스가 발생할 수도 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 영전압벡터(OOO) 선택방법을 이용한 새로운 스위칭 패턴을 생각할 수 있다. 예를 들어 영역 8에서 (OOO)를 사용하여 출력시간을 200 $\mu s$ 로 하고  $T_s$ 를 1800 $\mu s$ 로 하여 전압벡터의 출력순서를 결정하면 좁은 펄스의 문제는 발생하지 않는다. 이에 대한 새로운 스위칭 순서는 표 2에 주어진다.

표 2. 문제영역에서의 스위칭 패턴

R/S	A	B	C	D	E	F
8	PPPO NNOO NNOO	POOO PPOO NNNO	NNNO PPOO NOOO	NNNO POOO PPOO	NOOO NNOO PPPO	PPOO NNNO POOO
9	OOFP ONNO ONNN	OFP OFP OONN	OONN OOPP OONN	OONN OOPP OOPP	OONN ONNN OOPP	OFP OONN OOPP
10	OFP OOOO OONN	OFP OOOO OONN	OFP OOOO OONN	OFP OOOO OONN	OFP OOOO OONN	OFP OOOO OONN
11	PPPO OFP NNOO	PPOO PPOO NNNO	PPPO PPOO OFP	NNNO OFP PPOO	NNNO NNOO PPOO	PPOO NNNO NNNO
12	OFP OOP ONNN	OFP OFP OONN	OFP OFP OOP	OFP OON OFP	OFP ONN OFP	OFP ONN OON

그러나 이 방법으로도 좁은 펄스의 문제가 해결될 수 없는 실제적인 문제영역이 남아 있다(그림 7(b)). 물론 이 영역에서 인접하지 않는 제 4의 벡터를 선택하면 문제는 해결된다. 그러나 짧은 벡터를 무시하거나 아니면 200 $\mu s$ 를 확보해 주는 것이 더 고조와 성분이 적게 된다.

#### 4. DC-링크 전압균형을 고려한 스위칭 패턴

각 영역에서 주어진 스위칭 패턴과 DC-링크 전압균형문제를 생각하면 영역 2,3,5,6에서 문제가 발생하게 됨을 알 수 있다. 그 이유는  $\theta = 30^\circ$  근처에서 상단캐패시터와 하단캐패시터사이의 전압차이가 커지며  $\theta = 30^\circ$ 에서는 차이가 보상될 수 없기 때문이다. 따라서 DC-링크 전압균형과 최소 온-오프 시간을 고려하여 새로운 영역 13,14(그림 8)와 그에 따른 전압벡터의 출력순서(표 3)를 생각할 수 있다.

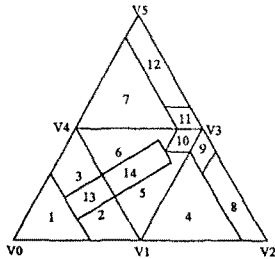


그림 8. DC-링크 전압균형을 고려한 14영역

표 3. DC-링크 전압균형을 고려한 스위칭패턴

R/S	A	B	C	D	E	F
13	POO OOO OON	OOO OOP NCO	OCN POO OOO	NOO OOO OOP	OOO OON POO	OOP NOO OOO
14	PPO OOO ONN	OOO OPP NNO	ONN PPO OOO	NNO OOO OPP	OOO ONN PPO	OPP NNO OOO

또한 영역 2,3,5,6에서는 다음과 같은 방법으로  $T_s$  동안 중성점전압을 유지할 수 있다. 예를 들어 영역 2에서 UCV의 출력시간은  $T_a/2$ 이고 LCV의 출력시간은  $T_a/2 + T_c$ 이기 때문에 문제가 발생하게 된다. 따라서 이 차이를 보상하기 위하여 다음의 방법을 적용할 수 있다.

$$(T_a/2 + \alpha) = (T_a/2 - \alpha) + T_c$$

여기서  $\alpha = T_c/2$ 이며 이 보상방법은  $T_a/2 - T_c/2 > 200\mu s$  때에만 적용할 수 있다.

#### 5. 실험결과

제한된 PWM방법은 3-레벨 GTO 인버터에서 실험되었고 인버터의 제어는 DSP(TMS320C31)를 이용하였다. 여기서 최소 온-오프 시간은  $200\mu s$ 로 하였는데 이는 4500V-3000A GTO의 경우 제작자에 의해 제한되는 스너버 R-C값이  $5\Omega, 6\mu F$ 이고 따라서 스너버 커패시터의 방전시간은  $150\mu s (5\tau)$ 가 필요하기 때문이다. 그림 9(a)와 9(b)는 게이트 펄스 파형이며 10(a)와 10(b)는 출력 전압과 전류파형이다.

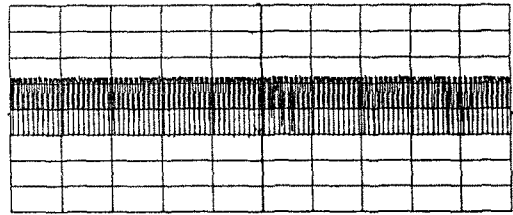
#### 6. 결론

본 논문에서는 3-레벨 GTO 인버터의 문제를 살펴보고, GTO의 최소 온-오프시간제한 문제를 해결할 수 있으며 DC-링크 캐패시터간의 전압균형을 유지할 수 있는 PWM방법을 제안하였다. 제한된 PWM방법은 부가적인 회로의 첨가나  $T_s$ 의 증가 없이 소프트웨어만으로 구현하였다.

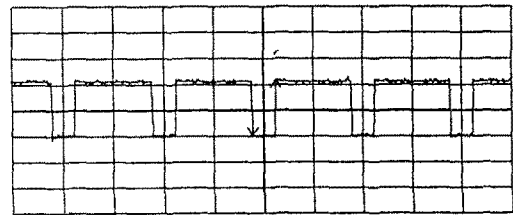
#### 7. 참고논문

- [1] A.Nabae et al., "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," *IEEE Trans. on Ind. Appl.* Vol.1A-17, No.5, pp.518-523, 1981.
- [2] Dong-Seok Hyun et al., "A Novel Structure of Multi-level High Voltage Source Inverter," *5th European Conf. on Power Electronics and Applications*, Brighoun, pp.132-137, 1993.
- [3] T.A.Neynand, H.Foch, "Multilevel conversion : High Voltage Chopper and Voltage Source Inverters," *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp.397-403, 1992.
- [4] Masato Koyama et al., "SPACE VOLTAGE VECTOR-BASED NEW PWM METHOD FOR LARGE CAPACITY THREE-LEVEL GTO INVERTER," *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp.271-276, 1992.

- [5] Roberto Rojas et al., "Neutral-Point-Clamped Inverter with Improved Voltage Waveform and Control Range," *IEEE IECON Conf. Rec.*, pp.1240-1245, 1993.
- [6] Hyo L.Liu et al., "THREE LEVEL SPACE VECTOR PWM IN LOW INDEX MODULATION REGION AVOIDING NARROW PULSE PROBLEM," *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp.257-262, 1993.



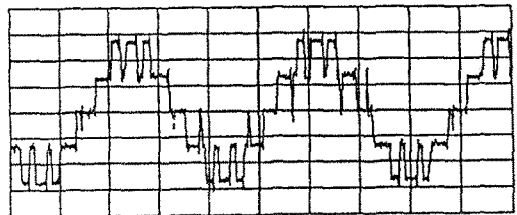
(a)



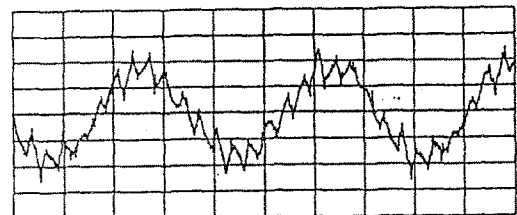
$\Delta t$  475  $\mu s$

(b)

그림 9. 실험파형 (a) 게이트 펄스 파형; 2.5V/div; time 20ms/div; f=0.5Hz;  $T_s=1ms$  (b) (a)의 확대파형; 2.5V/div; time 1ms/div



(a)



(b)

그림 10. 실험파형 (a) 선간전압; 200V/div; time 5ms/div; f=54Hz; q=12 (b) 출력전류; 20A/div; 5ms/div; f=54Hz; q=12