

## 고전력 3상 멀티레벨 AC/DC컨버터의 특성 분석

김운호, 김수홍, 곽형찬  
 중앙대학교 전자전기공학부

### An Analysis of High Power 3 Phase Multi-level AC/DC Converters

Y.H Kim, S.H. Kim, and H.C. Kwak  
 School of Electrical & Electronics Eng., Chung-Ang University

#### ABSTRACT

본 논문은 고전력 응용에 적합한 3상 멀티레벨 AC/DC컨버터의 THD를 분석하였다. 회로는 일반적인 NPC (Neutral Point Clamped)컨버터 타입을 채택하였고, 3레벨과 5레벨의 레벨수 증가에 따른 고조파를 분석하여 THD를 해석하였다. 공간벡터 PWM은 레벨이 증가할수록 벡터 공간도 증가하므로 영역판별이 어렵다는 단점이 있어 멀티 캐리어 PWM 방법을 사용하여 시스템을 분석하였다.

성점과 같은 중간탭이 사용되며, 3레벨 NPC의 경우 각 상에 4개의 스위칭 소자와 두개의 클램핑 다이오드로 구성되었다. 그리고, multi Carrier-based PWM제어기법을 사용하여 멀티레벨 컨버터의 입력 인덕턴스와 출력 전력에 따른 THD를 분석하였다. 또한 레벨수 변화에 따른 고조파를 분석하였다.

#### 1. 서 론

최근 산업기기의 고전력, 대용량화를 위한 멀티레벨에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 멀티레벨은 일반적으로 dc커패시터 전압원으로부터 제공된 전압의 레벨을 정현파전압(Sinusoidal Voltage)으로 동기화 하기위한 것이다. 실제 전력은 ac전압의 위상각을 제어함으로써 조절되고, ac전압의 크기는 dc커패시터 전압변화에 의해 조절되어진다.  $m$ 레벨 다이오드 클램프 컨버터는 일반적으로 dc단  $m-1$ 커패시터와  $m$ 레벨의 상전압으로 구성된다<sup>[1]</sup>. 레벨수의 증가는 동기화된 출력파형의 스텝을 증가시키고, 최소 고조파 함유율을 갖는 정현파 형태에 가까워진다. 컨버터의 단위역률 동작시 각 커패시터의 정류기 동작을 위한 충전시간은 다르므로, 반주기 동안 차등레벨 사이의 커패시터 전압은 불균형을 이룬다. 이러한 전압불균형 문제는 PWM 전압제어기나 배터리와 같은 일정한 dc전압원에 의해 해결할 수 있다. 또한 고전력응용에 있어서는 스위칭손실, EMI문제로 인해 스위칭주파수는 최소화 하여야한다.

본 논문에서는, 일반적인 다이오드 클램프된 컨버터를 사용하였다. NPC타입은 커패시터가 직렬로 연결되고, 중

#### 2. NPC 멀티레벨 컨버터

그림 1은 3상 3레벨 NPC 컨버터 구조를 보여주고 있고, 12개의 스위칭 소자와 6개의 클램핑 다이오드로 구성되었다. 5레벨은 24개의 스위칭 소자와 18개의 클램핑 다이오드로 구성되었다. 한상에 대한 멀티캐리 PWM 방법은 그림 3에서 설명하였으며, 스위칭 패턴은 표 1과 2에 나타나 있다.

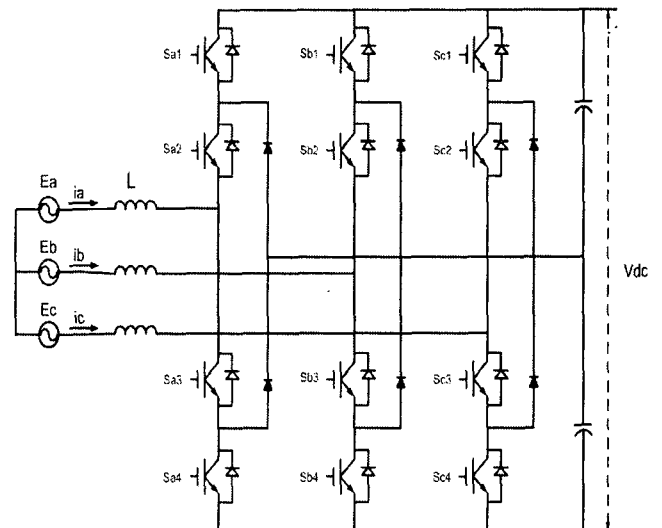


그림 1. 3상 NPC 3레벨 컨버터 회로  
 Fig 1. Circuit of 3phase NPC 3 level converter

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 단위 역률제어

입력 전압  $V_s$ 와 입력 전류  $I_s$ , 그리고 컨버터 입력단 전압  $V_C$ 의 벡터 관계식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{V}_s &= \vec{V}_L + \vec{V}_C \\ \vec{V}_L &= j\omega L_s \vec{I}_s \\ \alpha &= \tan^{-1} \left( \frac{V_L}{V_s} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

입력 전압과 입력 전류의 위상차를  $\theta$ , 입력 전압과 컨버터 입력단 전압의 위상차를  $\alpha$ 라고 하였을 때, 관계식을 풀면 식 (1)과 같다. 출력 전압은 입력 전류의 유효분에 비례하고 역률은 입력 전압과 입력 전류의 위상차인  $\theta$ 에 의해서 결정된다. 그림 2는 입력전압과 전류의 위상 벡터도를 보여준다. 결과적으로 컨버터 입력단 전압  $V_C$ 를 조절하여 줌으로써  $V_s$ 와  $I_s$ 의 위상차를 조절하여 역률을 조절할 수 있다.

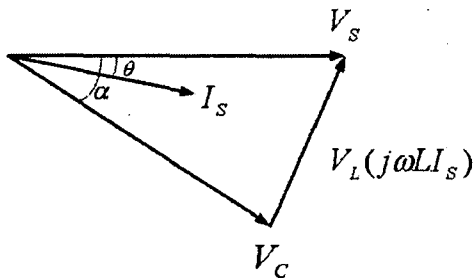


그림 2. 입력 전압과 전류 위상 벡터도  
Fig 2. Phase vector diagram of input voltage and current

#### 3.2 멀티캐리어 PWM 스위칭 기법

멀티레벨에서의 PWM기법은 주로 멀티 캐리어 PWM과 공간벡터 PWM 사용된다. 공간벡터 PWM은 일정한 DC 링크 전압을 최대한 많이 사용할수 있고, 정상상태에서 전류 고조파 성분을 크게 억제할 수 있다는 점에서 가장 많이 사용되고 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 레벨이 증가함에 따라 벡터 공간이 증가하여 영역을 판별하기에 많은 어려움이있다. 이러한 점을 해결하기 위해 3레벨 이상의 멀티레벨은 주로 멀티 캐리어 PWM이 사용된다.  $m$ 레벨의 컨버터에서는  $m-1$ 개의 삼각파 캐리어 신호가 필요하고, 기준전압은 각각 이들 캐리어 신호와 연속적으로 비교되어 신호를 발생한다. 만약 기준전압이 캐리어 신호보다 크면 스위치가 턴-온하고, 캐리어 신호보다 작을 경우 스위치는 턴-오프된다. 멀티레벨 컨버터에서, 진폭 변조

지수(AMI: Amplitude Modulation Index),  $m_a$ , 주파수 비율,  $m_f$  는 아래와 같이 정의된다<sup>[3]</sup>.

$$\begin{aligned} m_a &= \frac{A_m}{(m-1) \cdot A_C} \\ m_f &= \frac{f_C}{f_m} \end{aligned} \quad (2)$$

본 논문에서는 AMI변조 (0.8-1.2)와 주파수 비(1-24)를 조절하여 THD분석을 수행하였다.

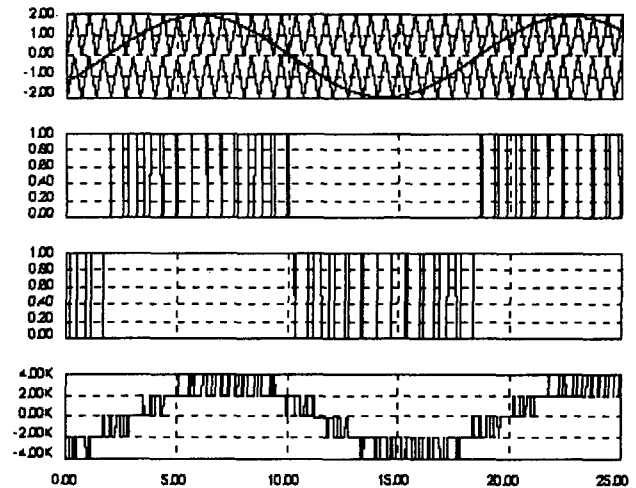


그림 3. 멀티캐리어 PWM비교, 스위칭, 출력 선간 전압 파형

Fig 3. Waveforms of multi-carrier PWM, switching and output line voltage

또한, 각 레벨에 따른 스위칭 패턴은 중성점을 기준으로 각 스위칭 소자( $S_{a1}, S_{a3}$ )( $S_{a2}, S_{a4}$ )는 상보형으로 동작하도록 제어하였다. 표 1은 3레벨 NPC컨버터 스위칭 패턴을 보여주고 있고, 표 2는 5레벨 NPC컨버터의 스위칭 패턴을 보여주고 있다.

표 1. 3레벨 NPC컨버터 스위칭패턴

TABLE 1. Switching patten of 3 level NPC converter

Output	Switch State			
	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$
$V_3 = V_{dc}$	1	1	0	0
$V_2 = \frac{1}{2} V_{dc}$	0	1	1	0
$V_1 = 0$	0	0	1	1

각 스위칭 소자의 스위칭 상태에 따라 컨버터 입력단 ac전압과 선간전압의 레벨을 조절할 수 있고,  $m$ 레벨 컨버터는  $m$ 레벨의 상전압과  $(2m-1)$ 레벨의 선간전압을 출력한다<sup>[4]</sup>.

표 2. 5레벨 NPC컨버터 스위칭 패턴

TABLE 2. Switching patten of 5 level NPC converter

Output	Switch State							
	Sa1	Sa2	Sa3	Sa4	Sa5	Sa6	Sa7	Sa8
$V_5=V_{dc}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_4=\frac{3}{4} V_{dc}$	0	1	1	1	1	0	0	0
$V_3=\frac{2}{4} V_{dc}$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_2=\frac{1}{4} V_{dc}$	0	0	0	1	1	1	1	0
$V_1=0$	0	0	0	0	1	1	1	1

3.3 파라메타 설정

단위역률 제어와 출력 커패시터 전압균등을 위해 식 (1)을 사용하여 정의된 인덕턴스 값의 변화에 따른  $V_c$  전압과 위상각의 파라메타와 시뮬레이션을 통해 분석된 THD를 표 3에서 보여주고 있다.

표 3. 인덕턴스 변화에 따른 파라메타와 THD분석  
TABLE 3. The parameters and THD analysis with inductance variation

L[mH]	$V_L$ [V]	$V_c$ [V]	$\alpha$ [°]	THD [%]	
				1.5kHz	60Hz
1	83.64	1502.33	3.19	26.07	28.1
5	418.248	1557.21	15.58	22.01	24.86
10	836.496	1717.47	29.14	17.35	17.72
15	1254.74	1955.60	39.91	14.76	15.02
20	1672.99	2246.97	48.12	11.41	13.95

표 4. 출력 전력에 따른 THD분석

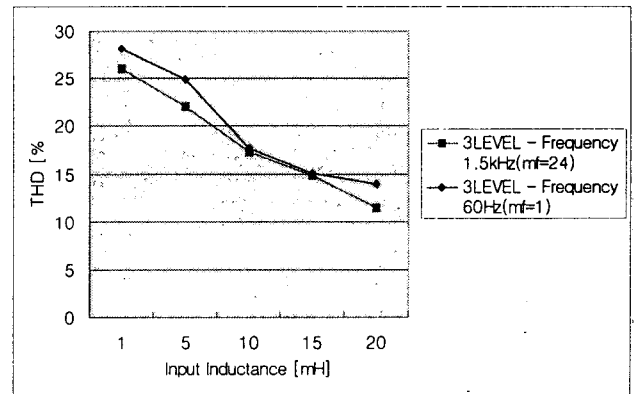
TABLE 4. THD analysis with output power variation

Output power [MW]						
	1	0.8	0.6	0.4	0.2	
T H D [%]	1.5 kHz	14.76	16.2	19.7	22.9	27.25
	60 Hz	15.02	17.46	21.96	24.98	30.03

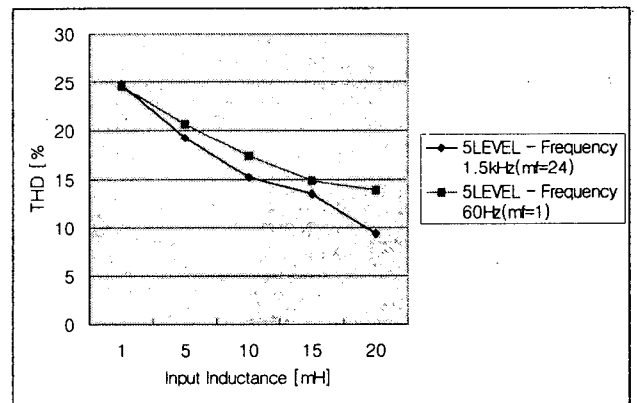
표 4는 출력 전력에 따른 THD변화를 보여주고 있다. 인덕턴스와 출력이 감소함에 따라 THD는 증가하는 것을 표 4에서 나타내고 있다.

3.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 4는 인덕턴스 변화에 따른 THD변화율을 보여주고 있다.  $mf=1$ 일때, THD는 3레벨에서 5레벨로 레벨이 증가할수록 감소되는 것을 알 수 있고,  $mf$ 가 증가함에 따라 THD는 감소한다는 것을 보여주고 있다. 그러나 이러한  $mf$ 가 증가할수록 고전력 응용에서는 스위칭 손실이 증가한다. 그림 5는 컨버터 출력에 따른 THD분석을 보여주고 있다. 같은 레벨에서 출력이 감소하면, THD는 증가하고,  $mf$ 가 증가할수록 THD는 감소한다. 3레벨에서 5레벨로 레벨을 증가시키면, 동일한 출력 전력에서 THD는 감소한다는 것을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 4. 인덕턴스 값에 따른 THD분석

- (a) 3레벨에서 인덕턴스에 따른 THD분석
- (b) 5레벨에서 인덕턴스에 따른 THD분석

Fig 4. THD analysis by inductance value

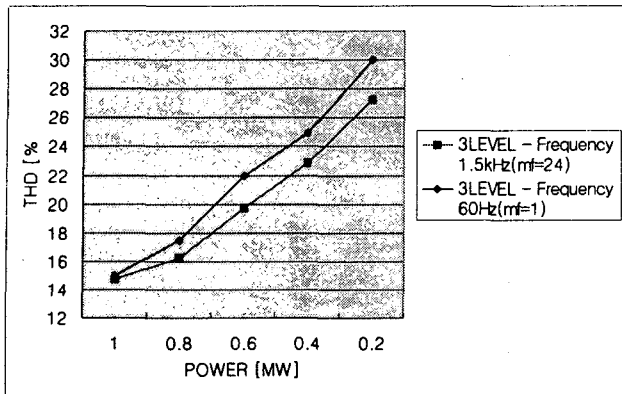
- (a) THD analysis with inductance variation at 3 LEVEL
- (b) THD analysis with inductance variation at 5 LEVEL

그림 5는 L이 15mH일 경우에 측정된 값을 보여주고 있다. 그림 6은 입력 전압, 전류, 컨버터 입력단 ac선간 전압 파형을 나타내고 있다. 그림 2에서 나타낸 것과 같이  $V_c$ 를 조절함으로써 입력단 단위역률을 조절할 수 있었다. 또한 컨버터 ac 입력단 전압은 5개의 레벨을 가지고

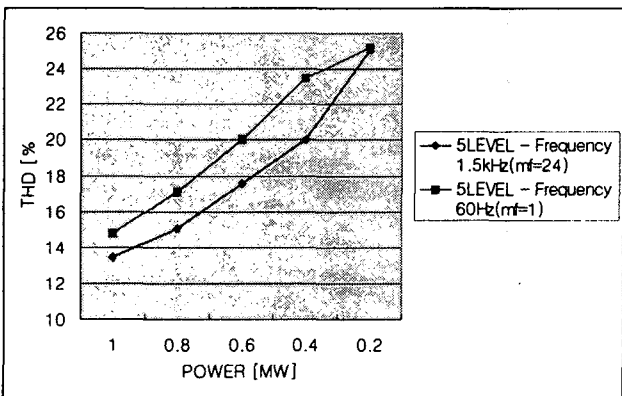
있고 정현파와 거의 유사한 출력 파형을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 멀티레벨 NPC컨버터의 레벨수 증가에 따른 THD를 분석하였다. 레벨이 증가함에 따라 THD는 감소하고, 출력 전력이 감소하면 THD는 증가한다는 것을 알 수 있었다. 주파수 비가 증가하면 THD는 감소하지만 고전력응용에서는 주파수가 커질수록 스위칭 손실과 EMI가 증가하는 단점을 가지고 있다. 공간벡터 PWM은 레벨이 증가할수록 벡터 공간도 증가하므로 영역판별이 어렵다는 단점을 가지고 있어서, 멀티 캐리어 PWM방법을 사용하여 이러한 단점을 해결할 수 있었다.



(a)



#### 참 고 문 헌

- [1] Jih-Sheng Lai; Fang Zheng Peng; "Multilevel converters - a new breed of power converters", Industry Applications Conference, 1995. Page(s): 2348-2356 vol. 3.
- [2] Mwinyiwiwa, B.; Wolanski, Z.; Yiqiang Chen; Boon-Teck Ooi; "Multimodular multilevel converters with input/output linearity", Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 33Issue: 5, Sept.-Oct. 1997, Page(s): 1214-1219.
- [3] Tolbert, L.M.; Habetler, T.G.; "Novel multilevel inverter carrier-based PWM methods", Industry Applications Conference, 1998. Volume: 2, 12-15 Oct. 1998, Page(s): 1424-1431 vol. 2.
- [4] Sang-Gil Lee; Dae-Wook Kang; Yo-Han Lee; Dong-Seok Hyun; "The carrier-based PWM method for voltage balance of flying capacitor multilevel inverter", Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. Volume: 1, 17-21 June 2001, Page(s): 126-131 vol. 1.

그림 5. 출력 전력에 따른 THD분석

(a) 3레벨에서 출력에 따른 THD분석 (b) 5레벨에서 출력에 따른 THD 분석

Fig 5. THD analysis with output power variation

(a) THD analysis with output power variation at 3 level (b) THD analysis with output power variation at 5 level

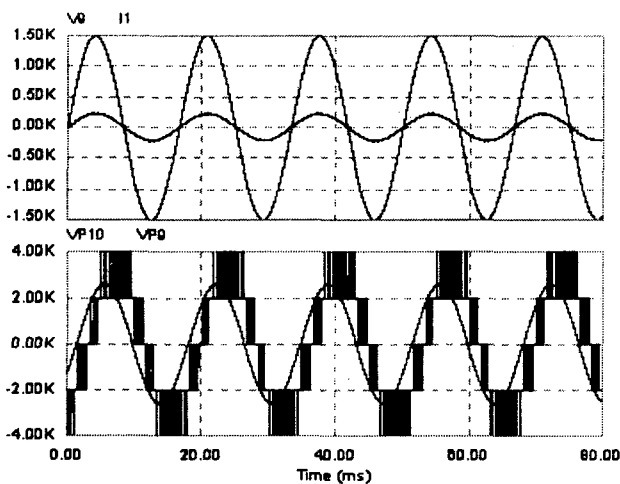


그림 6. 입력 전압, 전류, 컨버터 입력단 선간전압 파형

Fig 6. Waveforms of input voltage, current and line-to-line voltage of the converter