

# 대용량 31 레벨 단상 AC/DC 컨버터

\*박성우, 전중합<sup>1</sup>, 김상돈, 김은수, 이현우  
경남대학교, 대구보건대학

## High power 31 level Single Phase AC/DC Converter

<sup>o</sup>S.W.Park, J.H.Chun\*, S.D.Kim, E.S.Kim, H.W.Lee  
KyungNam University, <sup>1</sup>Taegu Health Coll.

### ABSTRACT

Single-phase multi-level AC-DC converter is proposed that is composed of diode bridge and switch. The number of the supply current level is depending on the individual current level of the converter. A converter circuit, the number of the level is equal to  $2^{M+1}-1$

The proposed circuit has converter with 31 current levels. When the number of current level is increased, smoother sinusoidal waveform can be obtained directly and it is possible to control the supply current almost continuously from zero to maximum without step changes of generating high voltage as pulse width modulation technology. Also, filter circuit is unnecessary, switching loss is decreased, it has an advantage in large capacity. It is illustrated technique are confirmed the validity and effectiveness through the simulation & experiments

### 1. 서 론

AC/DC 전력변환 장치에서 종래에는 2차 출력 특성 향상이나, 스위칭 손실 저감에 목적을 두는 경우가 많았으나, 최근에는 선진국의 각종 규제등에 의해 입력전류의 정현화 저노이즈화에 목적을 두는 경우가 많아지게 되었다.

본 논문은 4조의 컨버터를 직렬 연결하여 입력 펄터 없이 31레벨의 계단과 입력전류를 얻을 수 있는 대용량 단상 멀티레벨 AC/DC 컨버터에 대해 검토하고 있다.

2.1절에서는 다중 컨버터의 원리와 제어각 결정법에 대해서 다루고, 2.2절에서는 2중 컨버터의 동작원리에 대해 분석하고, 2.3절에서는 4중 컨버터의 입력

전압·전류의 특징과 고조파를 분석하고, 2.4절에서는 실험 과정을 통하여 연구 목적 결과를 도출하고 타당성 여부를 확인하고자 한다.

### 2. 대용량 31 레벨 단상 AC/DC 컨버터

#### 2.1 단상 다중 AC/DC 컨버터

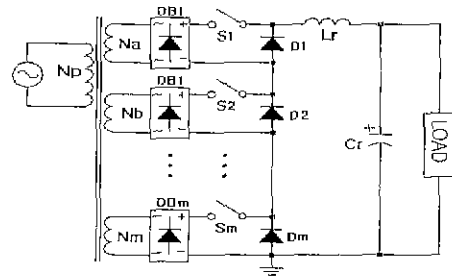


그림 1 단상 다중 AC/DC 컨버터

Fig. 1 Single phase multiple AC/DC converter

그림 1은 m개의 단상 컨버터를 직렬연결하여 계단과 입력전류를 얻는 단상 다중 컨버터 회로이다

#### 2.1.1 단상 다중 AC/DC 컨버터의 입력전류

m개의 단상 컨버터 모듈을 사용하여 중첩·다중화 하면 입력전류  $i_b$  는 식 (1)과 같다.

$$i_b = (i_a + i_b + i_c + i_d + \dots + i_m) \\ = (a + n^1b + n^2c + n^3d + \dots + n^{M-1}m)NI_l \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{단, } (N = \frac{N_a}{N_b}, n = \frac{N_m}{N_{m-1}} = 2,$$

M : 조합한 컨버터 갯수,

a, b, ..., m : (1, 0 -1)의 스위칭 함수 값)

n=2 경우의 입력전류 계단과 레벨 수는 다음 식과 같다.

$$N_l = 2^{(M+1)} - 1 \dots \dots \dots (2)$$

2.1.2 제어각 결정법

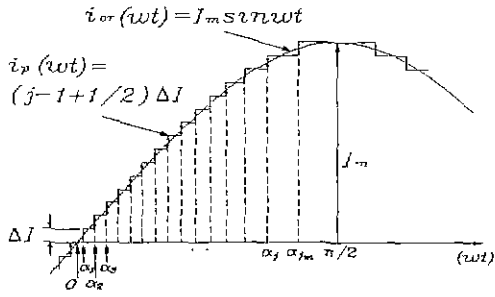


그림 2 스위칭 제어각  
Fig 2 Switching control angle

그림 2에서 기준 정현파와 계단 파형의 최대편차가 일정하게 최소 전류 폭의 1/2이 유지 되도록 각 스위칭 시간을 결정한다.

기준 정현파를  $i_{or}$  이라고 하면, 식 (3)과 같다.

$$i_{or}(\omega t) = I_m \sin \omega t \dots\dots\dots(3)$$

다중 조합 컨버터의 계단과 입력전류  $i_p$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$i_p(\omega t) = (j-1+1/2)\Delta I \quad (\alpha_j < \omega t < \alpha_{j+1}) \dots\dots\dots(4)$$

컨버터의 입력전류  $i_p$ 의 최소 스텝 폭을  $\Delta I (=NI)$  이라고 하면, 기준 정현파  $i_{or}$ 의 진폭  $I_m$ 은 다음과 같다.

$$I_m = (2^M - 1)\Delta I \dots\dots\dots(5)$$

제어각  $\alpha_j$ 는  $i_p$ 와  $i_{or}$ 에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_m \sin \omega t = (j-1+1/2)\Delta I$$

$$\therefore \alpha_j = \sin^{-1} \left[ \frac{(j-1/2)\Delta I}{I_m} \right] \dots\dots\dots(6)$$

여기서,  $j$ 는  $\sin \alpha_j < 1$ , 0부터 1까지 다음 식을 만족하는 범위의 정수로 다음과 같다.

$$j < I_m / \Delta I + 1/2 \dots\dots\dots(7)$$

또, 전류 제어율  $\Delta I$ 는 다음과 같다.

$$\Delta I = I_m / M_s = I_m / ((N_s - 1) / 2) \dots\dots\dots(8)$$

2.2 단상 2중컨버터의 동작원리

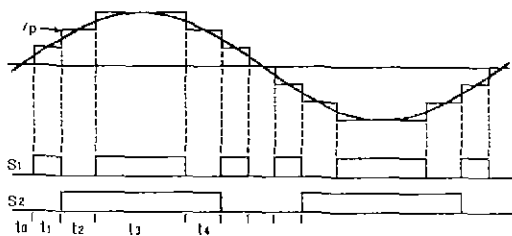


그림 3 2중 컨버터의 입력전류와 스위칭 신호  
Fig. 3 Input current and switching signal of dual converters

(a)  $T_0$  구간 (  $(0 - \sin^{-1}(1/6)) \sim \sin^{-1}(1/6)$  )

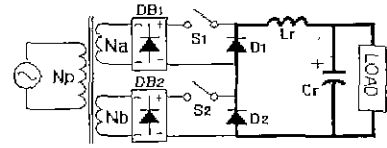


그림 4 동작 모드 1  
Fig. 4 Operation mode 1

그림 4는 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 가 모두 Off 상태인 모드이다. 따라서 입력전류는 0 이고, 부하 전류는  $L_r$ 에 의해 계속 유지된다.

(b)  $T_1$  구간 (  $\sin^{-1}(1/6) \sim \sin^{-1}(1/2)$  )

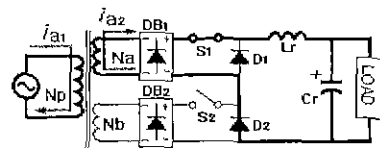


그림 5 동작 모드 2  
Fig. 5 Operation mode 2

그림 5는 스위치  $S_1$ 이 On되는 모드이다. 변압기의 권선비가  $N_a : N_b$ 를 1 : 2인  $n = N_a / N_b = 2$ 인 제어 방법에서의 입력전류는 다음 식과 같다.

$$i_p = i_{a1} = \frac{N_a}{N_p} I_l \dots\dots\dots(9)$$

(c) 구간  $T_2$  (  $\sin^{-1}(1/2) \sim \sin^{-1}(5/6)$  )

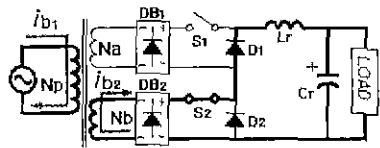


그림 6 동작 모드 3  
Fig 6 Operation mode 3

그림 6은 스위치  $S_1$ 이 Off 되고,  $S_2$ 가 On되는 모드이다. 이때, 입력 전류는 다음 식과 같다.

$$i_p = i_{b1} = \frac{N_b}{N_p} I_l = \frac{nN_a}{N_p} I_l \dots\dots\dots(10)$$

(d)  $T_3$  구간 (  $\sin^{-1}(5/6) \sim (\pi - \sin^{-1}(5/6))$  )

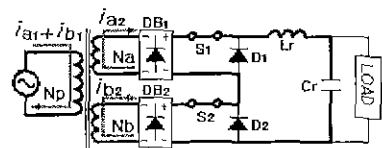


그림 7 동작 모드 4  
Fig. 7 Operation mode 4

그림 7은 스위치  $S_1, S_2$ 가 모두 On되는 동작 모드이다.

이때, 변압기의 2차  $N_a$ 와  $N_b$ 는 다음 식과 같다.

$$N_2 = N_a + N_b \quad (N_b = nN_a, n = \frac{N_b}{N_a})$$

$$N_2 = (1+n)N_a \quad \dots\dots\dots(11)$$

따라서, 입력 전류  $i_p$ 는 다음과 같다.

$$i_p = i_{a_1} + i_{b_1} = \frac{N_a + N_b}{N_p} I_l = \frac{(1+n)N_a}{N_p} I_l$$

$$\dots\dots\dots(12)$$

이때, 2중 컨버터의 입력전류 레벨 수  $N_s$ 는 식 (2)에서 그림 3에서처럼 7레벨을 얻을 수 있다.

### 2.3 31 레벨 단상 4중 컨버터

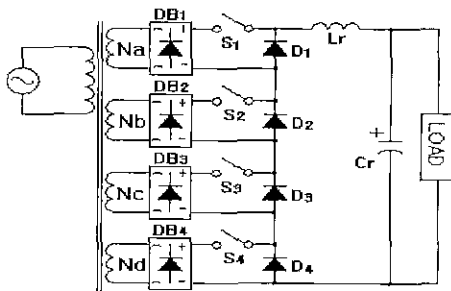


그림 8 단상 4중 AC/DC 컨버터  
Fig. 8 Single phase quadruple AC/DC converter

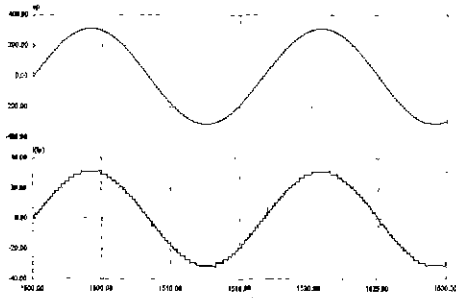


그림 9 입력 전압·전류 시뮬레이션 파형  
Fig. 9 Simulation waveform of input voltage and current

그림 8은 단상 4중 컨버터 회로이다. 그림 9은 표 1의 회로 정수로 가지고 PSIM으로 시뮬레이션 한 입력전압 입력전류 파형이다. 식 2에서 4중 컨버터의 경우에는 31레벨의 계단과 입력전류를 얻을 수 있다

표 1 시뮬레이션에 대한 파라미터  
Table 1 Parameter for Simulation

1차 교류전압	$e_p=220$ Vrms
권수비	$N_p = 100$
	$N_a = 2$
	$N_b = 4$
	$N_c = 8$
	$N_d = 16$
C	5,000 $\mu$ F
L	75mH
Load	R = 0.48 $\Omega$

### 2.3.1 단상 4중 AC/DC 컨버터의 입력전압·전류특성

4중 AC/DC 컨버터의 입력전류  $i_p$ 는 다음과 같다.

$$i_p = \sqrt{2} I_p \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(13)$$

또한, 입력전압 근사 식  $e_p$ 는 다음과 같다.

$$e_p = \sqrt{2} E_p \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(14)$$

따라서, 입력교류전력  $p_p$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$p_p = i_p e_p = 2 I_p E_p \sin^2 \omega t$$

$$= I_p E_p (1 - \cos 2\omega t) \quad \dots\dots\dots(15)$$

그리고 컨버터의 직류 전압  $E_l$ 는 다음과 같다.

$$E_l = I_p E_p (1 - \cos 2\omega t) / I_l \quad \dots\dots\dots(16)$$

### 2.3.2 단상 4중 AC/DC 컨버터의 입력전류 고조파 해석

4중의 컨버터를 사용한 단상 멀티레벨 컨버터에서 입력전류  $i_p$ 는  $i(-\omega t) = -i(\omega t)$  이기 때문에  $i_p$ 의 푸리에 급수는 다음과 같이 정의한다.

$$f_{i_p}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) \quad \dots\dots\dots(17)$$

따라서, 각 조파성분  $a_n$ 는 다음과 같다.

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_p \sin(n\omega t) d\omega t \quad \dots\dots\dots(18)$$

식 (4)을 식 (18)에 대입하여 전개하면 다음과 같다.

$$a_n = \frac{4}{(2n-1)\pi} \Delta I \sum_{j=1}^{15} \cos(2n-1)aj \quad \dots\dots\dots(19)$$

따라서, 다중 컨버터의 계단과 입력전류 푸리에 급수는 다음과 같이 된다.

$$f_{i_p}(\omega t) = \frac{4}{\pi} \Delta I \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{15} \frac{\cos(n \cdot aj)}{n} \sin(n)\omega t$$

$$n = (1, 3, 5, 7, \dots) \quad \dots\dots\dots(20)$$

계단과 입력전류의 기본과 성분  $a_1$ 는 다음과 같다.

$$a_1 = (4 \Delta I / \pi) \sum_{j=1}^{15} \cos aj \quad \dots\dots\dots(21)$$

입력전류 실효치  $I_b$ 는 다음과 같이 정리 할 수 있다

$$I_b = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad \dots\dots\dots(22)$$

따라서, 입력전류 기본과 실효치  $I_{p1}$ 는 다음과 같다.

$$I_{p1} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_p^2 dt} = \frac{a_1}{\sqrt{2}} \quad \dots\dots\dots(23)$$

입력전류 실효치  $I_b$ 를 다시 정리하면 다음과 같고,

$$I_b = \sqrt{I_{p1}^2 + I_{ph}^2} \quad \dots\dots\dots(24)$$

입력전류의 전고조파 실효치는 다음과 같이 된다.

$$I_{ph} = \sqrt{I_b^2 - I_{p1}^2} \quad \dots\dots\dots(25)$$

따라서, 왜형률은 다음과 같다.

$$\mu = \frac{I_{ph}}{I_{p1}} = \frac{\sqrt{I_b^2 - I_{p1}^2}}{I_{p1}} = \sqrt{\left(\frac{I_b}{I_{p1}}\right)^2 - 1} \quad \dots\dots(26)$$

## 2.4 실험 및 결과 고찰

### 2.4.1 변압기 용량결정

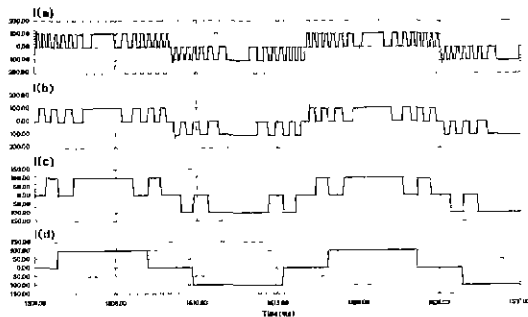


그림 10 각 변압기 2차 전류 시뮬레이션 파형  
Fig. 10 Simulation waveform of each transformer secondary current

그림 10은 각 변압기 2차전류 시뮬레이션 파형이다. 각 컨버터 입력전류의 최대 통전폭은 주기의 거의  $2\pi/3$ 가 된다. 따라서, 각 변압기 2차권선에 이러한 최대 스텝 전류 ( $\approx I_M/2$ )를 발생하는 컨버터 권선전류를 1차로 환산한 실효치는 다음과 같이 된다.

$$I_i = \sqrt{2/3} I_M/2 = I_M/\sqrt{6} = I_p/\sqrt{3} \dots\dots\dots(27)$$

변압기 2차 권선의 소요용량은 다음과 같다.

$$kVA = I_i E_p \times 10^{-3} = I_p E_p / \sqrt{3} \times 10^{-3} \dots\dots\dots(28)$$

그러고, 입력용량에 차지하는 가장 큰 변압기 2차 권선용량의 비율은 60% 정도이다. 다른 변압기 2차 권선용량은, 이 용량의 1/2씩 반감한다.

### 2.4.2 실험장치 구성 및 결과

표 2를 실험 회로 설계 목표치로 두고-4중 컨버터를 설계했다. 출력 전압은 최근 수요가 증가하고 있는 통신용 전원장치의 출력 48V로 하였고, 스위칭 소자는 용량을 기준으로 설계 목표를 삼았다.

표 2 회로 설계 목표  
Table 2 Design of Circuit

Output Power	5 kW
Output Voltage	DC 48 V
Input Voltage	AC 220 V

표 3 컨버터 구성요소  
Table 3 The Parts of Converter

$S_1, S_2, S_3, S_4$	Silicon N Chennel Power MOSFET SKM 180A020 200V 180A
$DB_1, DB_2, DB_3, DB_4$	Power Bridge Rectifiers SKD160/02 200V 160A
$D_1, D_2, D_3, D_4$	Power Bridge Rectifiers SKD160/02 200V 160A
$L_r$	iron core reactor 75 mH
$C_r$	electrolytic capacitor ( 1000 $\mu$ F $\times$ 5 )

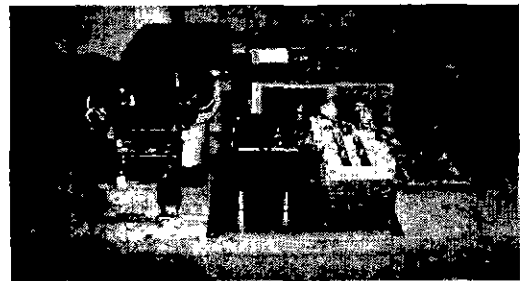


그림 11 4중 AC/DC 컨버터의 실험장치  
Fig. 11 Experimental device of quadruple converter

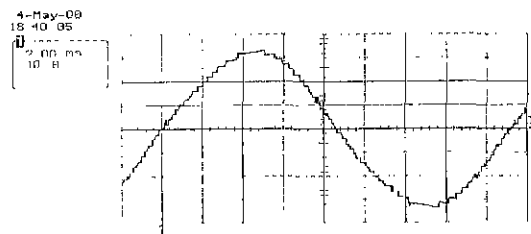


그림 12 입력전류 실험파형  
Fig. 12 Experimental waveform of input current

표 3은 컨버터 구성요소를 나타 내었고, 그림 11은 실험 장치를 나타 내었다. 그림 12는 입력전류 실험파형이다.

## 3. 결 론

이상의 시뮬레이션과 실험의 결과로서 제안한 단상 4중 멀티 레벨 AC/DC 컨버터가 입력필터 없이 직렬연결된 4조의 컨버터의 PWM 방식의 스위칭 동작으로 3레벨의 단위 역률의 정현적인 입력전류  $i_p$  를 얻을수 있고, 대용량화가 용이함을 검증하였다. 소폭의 전류변동폭을 가질 수 있고, 용량이 적은 스위칭소자를 사용하여 스위칭의 손실을 줄일 수 있으며, 맥동률을 작게 할 수 있다. 앞으로 대전력용에 적용될 것이 기대된다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-302-014-3)지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 한국전기연구소 : " ZVZCS 방식을 이용한 고효율,고 성능 통신용 정류기 개발에 관한연구," 1998.11.29
2. 大西徳生 : "多機能高品質單相PWM制御電源", IEE Japan, Vol. 115-D, No.1, 1995
3. Kimura, Matsumoto, Morizame, Taniguchi : "Control strategy for multilevel converter applied for electric power system", 7th European Conference on Power
4. 박성우, 이현우 외 : "대용량을 위한 멀티레벨 컨버터의 최적설계", 대한전기학회 부산 경남 울산 합동발표회 논문집, pp.120-124, 1999.12.4.