

## 단상 다중 조합제어 Multi-Level 컨버터의 해석과 시뮬레이션

<sup>✉</sup>안일매, 전중함\*, 이영호\*\*, 서기영, 이현우  
경남대학교, 대구보건대학\*, 동서기전\*\*

### Analysis and Simulation of Multi-Level Converter by means of Multiple Single Phase Combination Control

<sup>✉</sup>I.M.Ahn, J.H.Chun\*, Y.H.Lee\*\*, K.Y.Suh, H.W.Lee  
Kyungnam University, Taegu Health Coll.\*, Dongseo Mechtronics Co., Ltd.\*\*

**Abstract** - Single-Phase multi-level AC-DC converter that is composed of diode bridge and switch is proposed. 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  $2^{M+1}-1$ , where M is the number of Switching Converter.

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 generating high voltage step changes as pulse with modulation technology. The technique illustrates its validity and effectiveness through the PSIM.

## 1. 서 론

교류를 직류로 변환하는 전력 변환기는 작게는 정류기에서 시작하여 고속스위칭 기술을 이용한 고성능 SMPS에 이르기까지 다양기술형태로 발전해왔다. AC/DC Converter의 주요형태는 2차 직류출력특성을 향상시키는데 주안점을 두는 경우와 1차 입력 전원특성을 고려한 System으로 크게 2가지로 분류 할 수 있다. 전자는 2차 직류전압의 안정화, 다출력화, 출력의 다양화, 절연화에 그 목적을 둔다. 그러나 근래에는 전원전압의 형태가 다양화되고 있고 대전력을 요구하는 경우가 많으며 EMI 규제 등이 강화되어 입력전류의 정현화, 입력전압의 자유화, 내노이즈화, 저노이즈화에 목적을 두게되는 후자의 경우를 많이 연구하기에 이른다. 이런 한 관점에서 입력전류는 전원 전압에 추종하도록 하는 것이 이상적이고 그 목적을 달성하는 방법으로서 PWM 제어방식을 주로 사용하는데 고속으로 전력을 제어할 수 있기 때문에 고속 스위칭소자의 발달과 더불어 널리 사용되어져 왔다. 그러나 PWM방식의 제어에 따르는 손실이나 소음등의 본질적인 문제점을 가지고 있으며 단독의 브리지형 Converter 회로에서는 대용량화하는 것이 어렵고 필요에 따라서는 저역필터 또는 능동필터 등을 설계해야 할 경우가 생긴다. 이것에 대하여, 같은 용량의 Converter 출력을 다중화 하면 고속 스위칭에 따르는 문제를 저감시킬 수 있고, 필터가 불필요하게 되어 대용량화에 적용시킬 수 있다.

본 논문에서는 입력 과정 개선방법으로 Pulse수가 다른 PWM Converter를 다중으로 제어함으로서 Converter의 입력전류를 제어하는 다중 조합제어방식인 Multi-level PWM 제어방식 Converter에 대해서 검토하고 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 다중 컨버터

여러 개의 Converter 출력을 조합제어하는 방식의 개념은 오래 전부터 제시되어 왔지만, 구체적으로 주회로 구성이나 상세한 제어특성 등이 설명되어져 있지 않다. 본 논문에서는 M개의 Converter 출력을 중첩, 다중화 하여 최대  $2^M$  승개의 Level을 가지는 계단파상의 입력전류파형을 얻는 방식의 단상 Multi-level PWM Converter 구성과 제어방법 및 제어특성에 관해서 보고하고 시뮬레이션하여 상세한 것을 설명하고 그 동작을 입증하고자 한다.

그림 1은 4조의 Converter를 변압기 2차 권선으로 직렬 접속하여 입력전류 파형이 31Level의 경우로 나타나는 회로도이다.

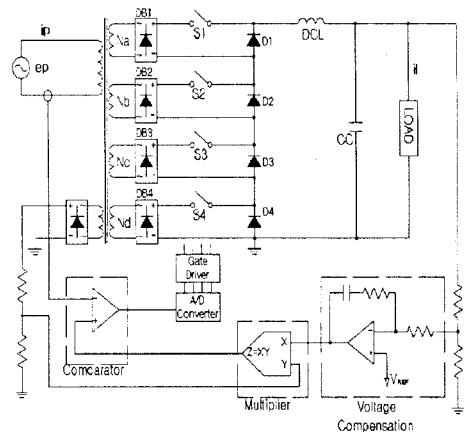


그림 1 M=4 Multi-Converter에 대한 Block Diagram

Fig 1 Block Diagram for M=4 Multi-Converter

일반적으로, M개의 단상 Converter 모듈을 사용하여 중첩·다중화 할 때, 입력전류  $i_p$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$i_p = (i_a + i_b + i_c + i_d + \dots + i_M) \\ = (n^{M-1} a + n^{M-2} b + n^{M-3} c + \dots + n^{M-4} d + \dots + M) NI \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 변압기 출력의 가장 낮은 권선에 대한 변압기 1차권선에 대한 2차권선의 승압비이다. 또,  $I$ 은 직류출력측 부하전류이고  $n$ 은 그 때의 가장 낮은 권선을 기준으로 하여 그 다음으로 높은 권선파의 비이며 이

경우는  $n = N_a/N_d$  이다.  $a, b$  는  $(1, 0 -1)$ 의 스위칭 함수값이다. 표 1은 (a)  $n=1$ , (b)  $n=2$ , (c)  $n=3$ 일 때의 Converter출력을 중첩한 것이다.

$$(i_a + i_b + i_c)/NI_l = A, \quad i_d / NI_l = B \text{ 라 두면,}$$

표 1 4종 컨버터의 조합  
Table 1 Combination of four converters

		A	-3	-2	-1	0	1	2	3
		B	-1	-4	-3	-2	-1	0	1
		-1	-4	-3	-2	-1	0	1	2
		0	-3	-2	-1	0	1	2	3
		1	-2	-1	0	1	2	3	4

(a)  $n=1$  인 경우

		A	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	
		B	-1	-15	-13	-11	-9	-7	-5	-3	-1	1	3	5	7	9	11	13
		-1	-15	-13	-11	-9	-7	-5	-3	-1	1	3	5	7	9	11	13	
		0	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	
		1	-13	-11	-9	-7	-5	-3	-1	1	3	5	7	9	11	13	15	

(b)  $n=2$  인 경우

		A	-39	-36	-30	-27	-12	-9	-3	0	3	9	12	27	30	36	39	
		B	-1	-40	-37	-31	-28	-13	-10	-4	-1	2	8	11	25	29	35	38
		-1	-40	-37	-31	-28	-13	-10	-4	-1	2	8	11	25	29	35	38	
		0	-39	-36	-30	-27	-12	-9	-3	0	3	9	12	27	30	36	39	
		1	-38	-35	-26	-23	-11	-8	-2	1	4	10	13	28	31	37	40	

(c)  $n=3$  인 경우

(a)  $n=1$  의 한정된 Converter조수로는 많은 Level수를 얻을 수 없을 뿐만 아니라, (a)  $n=1$  일 경우와 (c)  $n=3$  이상일 경우에는 연속적인 Step파의 입력전류를 얻기 힘들고 또한 (c)  $n=3$ 의 경우에는 주회로를 간단하게도 할 수 없다. 이들에 대하여 (b)  $n=2$ 의 경우는 특별한 동작모드를 피할 수 있고 얻어지는 Level수도 비교적 많은 것이므로 가장 적합하다. 따라서 (b)  $n=2$  일 때를 선택하여 스위칭 타임을 설정하면 그림 2와 같이된다.

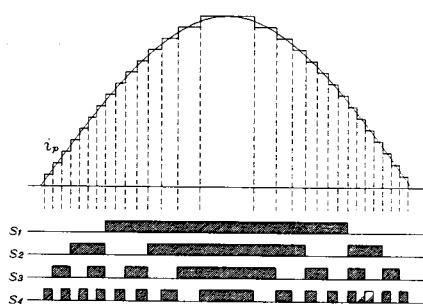


그림 2 입력전류 파형과 스위칭 신호  
Fig 2 Supply current & Switching signal waveform

$n$  값으로 Converter조수  $M$  과 입력전류 Level수  $N_s$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$- n = 1 \text{ 경우} \quad N_s = 2M+1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$- n = 2 \text{ 경우} \quad N_s = 2^{(M+1)} - 1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$- n = 3 \text{ 경우} \quad N_s = 3^M \quad \dots \dots \dots (4)$$

이와 같이 영전류를 포함한 정·부 대칭인 Level파형 입력전류가 얻어지지만, 영전류를 제외한 독립된 Level 수  $M_s = (N_s-1)/2 \quad \dots \dots \dots (5)$

표 2 Converter와 Level수의 관계  
Table 2 Converter and Level number

변압기 2차측 권선수	1	2	3	4	5
입력전류의 Level수	3	7	15	31	64

## 2.2 입력전류의 제어법과 제어특성 해석

### 1) switching time

그림 2에서 이미 기술한 바와 같이 기준 정현파와 Converter 입력전류와 여러 Level의 전류파형과의 관계를 나타내고 있다. 여기서, 기준 정현파와 step 파형의 최대편차가 일정하게 최소 전류폭의  $1/2$ 이 유지 되도록 각 switching time을 결정한다.

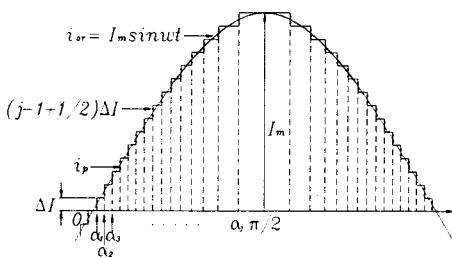


그림 3 스위칭 각도의 결정방법  
Fig 3 Control switching angel

그림 3에서  $\Delta I$ 는 전류의 변화 분을 나타내고  $j$ 는 스위칭되는 수열을 나타낸다. 기준 정현파  $i_{or}$ 의 진폭을  $I_m$ , Converter의 입력전류  $i_p$ 의 최소 step 폭을  $\Delta I (=NI_l)$  라 두면, 0에서부터  $j$ 번째의 제어각  $\alpha_j$ 는 다음식으로 결정된다.

$$i_{or} = I_m \sin \omega t = I_m \sin \theta \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$i_p = (j-1+1/2)\Delta I \quad (\alpha_j < \theta < \alpha_{j+1}) \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$\therefore \alpha_j = \sin^{-1}(j-1/2)\Delta I/I_m \quad \dots \dots \dots (8)$$

여기서,  $\theta = \omega t$  이고,  $j$  값은  $\sin \alpha_j < 1.0$  부터 1까지 다음식을 만족하는 범위의 정수치이다.

$$j < I_M / \{(\Delta I + 1/2)\} \quad \dots \dots \dots (9)$$

### 2) 전압전류특성

제안하는 Converter의 입력전류의 파형 제어특성은 위식으로 평가할 수 있지만, Level 수를 많이 잡아 미세한 입력파형 제어를 할 수 있으며, 그 전류전압은 다음식으로 근사 표현할 수가 있다.

$$i_p = \sqrt{2} I_p \sin(\omega t) \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$e_p = \sqrt{2} E_p \sin(\omega t - \phi) \quad \dots \dots \dots (11)$$

이 때, 입력교류전력은 다음 식으로 산출된다.

$$p_p = I_p E_p \{ \cos \phi - \cos(2\omega t - \phi) \} \quad \dots \dots \dots (12)$$

따라서, Converter의 직류측 전압  $e_1$ 는

$$e_1 = I_p E_p \{ \cos \phi - \cos(2\omega t - \phi) \} / I_l \quad \dots \dots \dots (13)$$

로 가리켜진다.

### 2.3 시뮬레이션 결과 파형

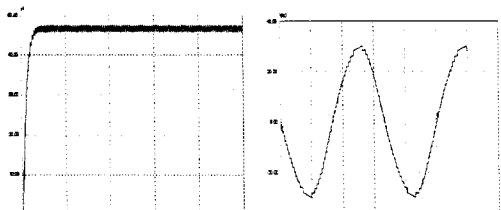
표 3은 Simulation에 사용한 회로정수이다. 이정수를 사용하여 PSIM으로 Simulation한 결과 그림 4와 같이 출력전압  $e_o$  과 입력전류  $i_p$ 에 대한 파형을 얻었다. 또한 변압기 1차권선에 대한 2차 권선비는 전원전류  $i_p$ 에 각각  $N_a : N_b : N_c : N_d = 8 : 4 : 2 : 1$ 로 선정하였다.

표 3 시뮬레이션에 대한 파라메터  
Table 3 Parameter for Simulation

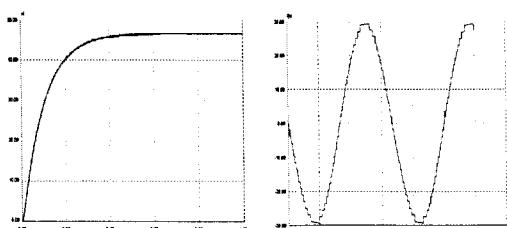
1차 교류전압	$e_p = 220 \text{ Vrms}$
권수비	$N_a = 12.5$
	$N_b = 25$
	$N_c = 50$
	$N_d = 100$
C	$10,000 \mu\text{F}$
Load	$R = 0.48\Omega$
사용소자	$S_1 \sim S_4$ $DB_1 \sim DB_4$ $D_1 \sim D_4$
	Ideal Device

인덕터의 값이 클수록 출력전압의 응답성이 늦어지는 반면 입력전류  $i_p$ 의 파형은 정현적이다. 반면 인덕터의 값이 적어지면 출력전압의 응답성은 빠르나 리플이 심하며 입력전류  $i_p$  파형도 정현적이지 못함을 알 수 있다. 인덕터의 값이 0.075[H]일 때 입력전류와 출력전압 양자를 고려했을 때 최적의 값임을 알 수 있다.

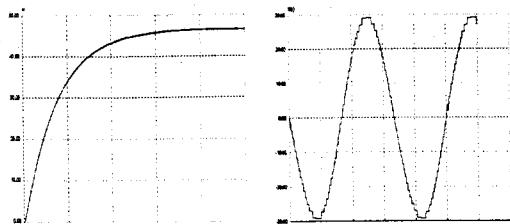
이렇게 함으로써 교류 전원선에 필터 회로를 넣지 않아도 아날로그 파형 제어가 가능한 단위 역률의 정현적인 파형이 얻어짐을 알 수가 있다.



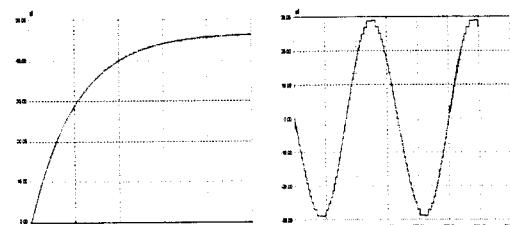
1)  $L = 0.01\text{H}$  인 경우



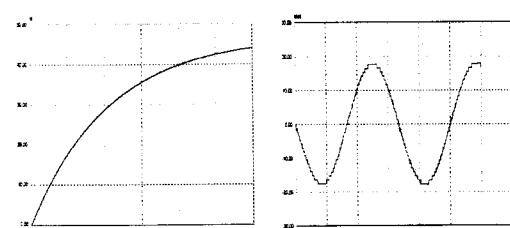
2)  $L = 0.05\text{H}$  인 경우



3)  $L = 0.075\text{H}$  인 경우



4)  $L = 0.1\text{H}$  인 경우



5)  $L = 0.5\text{H}$  인 경우

그림 4 시뮬레이션파형  
Fig 4 Simulation waveforms

### 3. 결 론

이상의 시뮬레이션 결과로서 제안한 단상 Multi-Level AC-DC Converter가 PWM방식의 스위칭 동작으로 31Level의 입력전류  $i_p$  가 단위 역률로서 정현적인 파형을 얻을수 있고 대용량화 할수 있음을 검증하였다. M개의 컨버터로 얻어지는 Level수는  $N_s = 2^{(M+1)} - 1$ 로 나타내어진다. 소폭의 전류변동폭을 가질 수 있고 작은 스위칭소자로도 스위칭의 손실을 줄일수 있으며 맥동율을 작게 할 수 있다. 앞으로 대전력 용에 적용될 것이 기대된다.

이 논문은 한국과학재단의 '98 핵심전문연구 사업으로 연구되었음.

### [참 고 문 헌]

- 奥井 芳明, 水野 勉, 山田 一 : “單相降壓チョッパを多重化した三相高力率コンバータの過変調特性”, 電氣學會研究會資料, SPC-97-37, 1997
- Bakari Mwinyiwiwa : "Multimodular Multilevel Converters with Input/Output", IEEE Tran Vol.33, No.5, Sep 1997.
- 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