

고주파 비대칭 PWM 3상 교류차opper

김한성 최규하 김용주 이근하<sup>o</sup> 백형래

건국대학교 조선대학교

HIGH-FREQUENCY APWM THREE-PHASE AC CHOPPER

Han-Sung Kim Gyu-Ha Choe Yong-Ju Kim Keun-Ha Lee Hyung-Lae Baek

KON-KUK UNIVERSITY

CHO-SUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A high-frequency asymmetrical PWM control technique is proposed which can improve the input power factor of ac chopper and also suppress its harmonic contents of currents at both its input and load sides and the acoustic noises by its switching semiconductor devices. The ideal switching function for the proposed technique is derived and hence converted into asymmetrical PWM pattern for practical implementation of ac voltage regulator. Also the various power circuits of three phase AC choppers are suggested. The theoretical characteristics of the proposed PWM technique are investigated by digital simulation.

I. 서론

종래의 교류전력 제어는 Thyristor 나 Triac 등을 이용한 위상제어방식이 주로 사용되었다. 위상방식은 용이한 제어 및 간단한 회로구성등의 장점이 있는 반면 출력전압을 제어하는 과정에 있어서 역률의 저하, 출력파형의 왜형, 부하역률에 따라 제어복상이 변화하는 등의 문제가 있다. 특히 파형에 따른 고조파가 함유되어 전동기 운전시 고조파 전류로 인한 손실과 맥동 모오르가 발생되기 때문에 부하측에 적당한 filtering이 필요하다.

그리고 점오각 지연으로 인해 순저항성 부하인 경우에도 부하전류는 불연속적이고 교류차opper의 역률과 효율이 저하되는 결점이 있다. 이러한 결점은 기존의 위상제어회로에 강제전류 방식과 부하전류에 대한 관류로를 주입시켜 입력측 역률을 개선하고 있으나 부하전류의 불연속성 및 제어연속성, 낮은 역률, 고조파 문제등의 단점을 크게 개선하지는 못했다. [1-5]

그러나 근래 반도체 기술의 발달로 인해 Power Transistor 나 Power MOSFET 등 반도체 스위칭 소자의 대응량화 및 고성능화가 이루어져 전력변환장치에 많이 활용되고 있다. 이러한 스위칭 소자를 사용한 전력변환장치에 있어서는 파형의 개선, 저차 고조파의 저감등의 이점이 있고 PWM 제어가 널리 이용되고 있다. 일반적인 PWM 제어 기법을 사용하여 Power Transistor 나 Power MOSFET 을 구동했을 경우에는 스위칭 소자에서 소음이 발생하는 단점이 있고 또한 유도성 부하시 입력 역률이 저하하는 등의 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 고조파의 저감, 스위칭소자의 소음 제거를 위하여 스위칭 주파수를 고주파로 하였고 또한 유도성 부하로 인한 입력역률의 저하를 개선하기 위하여 새로운 PWM 제어를 제안하였다. 또 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 방식의 이론적 특성을 조사하였다.

II. 고주파 비대칭 PWM 교류차opper

1. 기본 원리

PWM 교류차opper는 그림1 과 같이 기본적으로 부하에 공급 전력을 제어하는 소자 P 와 P의 off시 부하측 에너지의 관류로를 제공해 주는 소자 F로 구성된다. 이처럼 PWM 차opper에서는 강제전류회로를 사용해야 하므로 다음의 두 사항을 고려함으로써 차opper의 특성을 개선할 수 있다.

A. 동작주파수의 결정 : 그림2 에서 보듯이 스위칭 주파수가 8KHz이하가 되면 소음의 크기는 현저히 커지고 그 이상이 되면 약 55 dB 로 접근하며 주파수의 증가에 대해 크게 개선되지 않고 있다. 그러므로 스위칭 주파수를 8KHz이상의 고주파로 하면 스위칭 소자의 소음 문제를 해결할 수 있다. [7]

B. 입력역률의 조정 : 그림3 에서 보는 바와 같이 (a)의 SPWM은 역률개선이 불가능하나 (b)의 새로운 APWM은 역률개선이 가능하다. 따라서 입력역률을 개선시킬 수 있도록 하기위한 스위칭 함수의 유도가 필요하다. [6]

2. 스위칭 함수

일반적인 전력변환회로에서 m상 입력  $v_o$  와 n상 출력  $v_o$  의 관계는 이상적인 스위칭 함수 S를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_o = S v_a \tag{1}$$

이 때 출력전압과 입력전류는 독립변수가 되므로

$$i_a = S^T i_o \tag{2}$$

여기서 S는  $S = [m \times n]$  행렬  $S^T = S$ 의 전치행렬 임  
그러나 본 연구는 3상 차opper를 다루므로  $m=n=3$  이 되고 3 상의 경우 식 (1)은 다음과 같은 과정에 따라 스위칭 함수 S를 구할 수 있다.

지금 3상 교류입력 전압을

$$\begin{bmatrix} v_{aa} \\ v_{ab} \\ v_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}V_a \sin \omega t \\ \sqrt{2}V_a \sin (\omega t - 2/3\pi) \\ \sqrt{2}V_a \sin (\omega t + 2/3\pi) \end{bmatrix} \tag{3}$$

라고 하면 이상적 출력전압  $v_o$  는 다음과 같고

$$\begin{bmatrix} v_{oa} \\ v_{ob} \\ v_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}V_o \sin \omega t \\ \sqrt{2}V_o \sin (\omega t - 2/3\pi) \\ \sqrt{2}V_o \sin (\omega t + 2/3\pi) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$v_o$ 의 크기는  $[0, V_s]$ 사이에서 변화한다. 그리고 그림 4와 같이 Power Factor의 조절없이 교류차저가 그 크기를 조절하려면 이상적 스위칭 함수  $S_o$ 는

$$S_o = X_o \quad (5)$$

이 되고 [1] 여기서  $X_o = V_o/V_s$ 이다. 그리고 한 상의 출력전류는 부하에 따라 변화하고 또한 입력전류는 아래의 출력전류에 따르므로

$$i_{oa} = \sqrt{2} I_o \sin(\omega t - \phi_o) \quad (6)$$

$$i_{sa} = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t - \phi_s) \quad (7)$$

로 쓸 수 있고, 부하각  $\phi_o$ 는 부하의 형태에 따라 결정되고 입력 위상각  $\phi_s$ 는 부하각  $\phi_o$ 와 사용하는 Power Converter의 유형에 좌우된다. 지금 식 (3)의 3상 교류전압의 위상을 다음과 같이 변화시킬 수 있다면

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}V_s \sin(\omega t + \phi_s) \\ \sqrt{2}V_s \sin(\omega t - 2/3\pi + \phi_s) \\ \sqrt{2}V_s \sin(\omega t + 2/3\pi + \phi_s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (4)에서와 같이 APWM 초퍼에 의해 변환된 출력  $v_o$ 는 이상적으로 다음과 같이 되고 이러한 가상적 출력은 그림 4와 같이 위상만 변화되는데 그 관계는 스위칭 함수  $S_p$ 로 나타낼 수 있고  $S_p$ 는

$$\begin{bmatrix} S_{pa} \\ S_{pb} \\ S_{pc} \end{bmatrix} = S_o \begin{bmatrix} \cos\phi_s + \sin\phi_s \cot\omega t \\ \cos\phi_s + \sin\phi_s \cot(\omega t - 2/3\pi) \\ \cos\phi_s + \sin\phi_s \cot(\omega t + 2/3\pi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

로 된다. 또 식 (8)의 중간 출력  $v_r$ 는 전압의 크기가 제어되어야 하므로 식 (5)의 스위칭 함수  $S_o$ 에 따라 다음과 같이 최종적으로  $v_o$ 로 출력된다.

$$\begin{bmatrix} v_{oa} \\ v_{ob} \\ v_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}V_o \sin(\omega t + \phi_o) \\ \sqrt{2}V_o \sin(\omega t - 2/3\pi + \phi_o) \\ \sqrt{2}V_o \sin(\omega t + 2/3\pi + \phi_o) \end{bmatrix} \quad (10)$$

가 되고, 따라서 그때 입력전류의 위상은  $(\phi_s - \phi_o)$ 로 감소하므로 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}I_s \sin(\omega t + \phi_s) \\ \sqrt{2}I_s \sin(\omega t - 2/3\pi + \phi_s) \\ \sqrt{2}I_s \sin(\omega t + 2/3\pi + \phi_s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

따라서  $\phi_o$ 를 조정하여  $\phi_{sa} (= \phi_s - \phi_o)$ 이 0으로 되도록 하면 고조파억제뿐 아니라 power factor를 1로 할 수 있다. 결국 식 (3)의 교류입력 전압을 식 (10)의 출력으로 변환시키는데는 식 (9)의 위상제어 함수  $S_p$ 와 식 (5)의 크기제어함수  $S_o$ 의 곱으로 표현된다. 이상의 두 가지 변환은 하나의 초퍼로 가정하므로 전체 스위칭 함수  $S$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$S = S_p \cdot S_o \quad (12)$$

교류 전압 조절기에 있어서 이상적 스위칭 함수  $S$ 는 출력에 고조파가 함유되지 않고 입력측의 power factor가 1로 되므로 그림 5에  $X_o$ 를 고정했을 때의  $\phi_o$ 에 대한  $S$ 의 변화 및  $\phi_o$ 를 고정했을 때의  $X_o$ 에 대한 변화를 보았다.  $\phi_o = 0$ 일 때의  $S_o$ 는 시불변형태인 반면 함수  $S$ 는 양, 음의 파형으로 나타난다. 그리고 그림 1과 같은 실제 초퍼제어에서는  $S$ 를 고주파 삼각파 캐리어로 변조하여 PWM스위칭 함수로 바꾼다.

### 3. 변조방법 및 회로의 선정

#### A. 변조방법

PWM 초퍼를 제어하는 방식에는 그림 6와 같이 M-변조, W-변조, 최적 PWM 및 APWM방식이 있다. M방식과 W방식은 일반적으로 불리는 PWM방식이고 초퍼에서는 W방식이 M방식에 비해 출력의 반주기당 스위칭 횟수가 적고 Dead Time이 길어서 우수하다. 이는 특히 고주파로 운전시 고려해야 할 사항이다. 그러나 출력의 고조파 측면에서는 두 방식이 동일하다. 최적방식은 고조파 및 고주파 운전에서 M이나 W방식에 비해 유리하지만 입력측 역률개선을 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 입력역률을 개선시킬 수 있는 APWM방식을 채택하기로 한다.

#### B. 회로 구성

그림 7은 PWM 3상 교류초퍼에서 사용되는 전력회로들이며 각 회로의 주요 특성은 표 1에서 비교되었다. 따라서 이상과 같은 특성을 비교해 볼 때 역률개선에 적합한 회로 E를 전력변환회로로 이용하고 그림 12의 제어선도에서와 같이 Phase Controller와 Voltage Controller에 의해 입력역률과 전압의 크기를 조절할 수 있도록 회로를 구성하였다.

### 4. 출력전압 및 입력전류 특성

APWM초퍼에서 위상각은 전상값이 되므로 기본파 역률은 전상이 된다. 그러나 그림 8에 보는 바와 같이 위상각  $\phi_o$ 가 감소함에 따라 상대적인 제어범위가 축소됨을 알 수 있다. 그림 8은  $\phi_o$ 의 값에 대한 출력전압의 외형을 나타내는 것으로 위상각  $\phi_o$ 의 조정에 따라 약간의 고조파 성분은 존재하나 그 차이는 미세하다.  $\phi_o$ 에 대한  $\phi_{s1}$ 과  $\phi_o$ 의 관계가 그림 10에 보여 지는데  $X_o$ 가 커짐에 따라  $\phi_{s1}$ 은 0에 가까워짐을 볼 수 있고  $\phi_{s1}$ 은 작은  $X_o$  값에서 작음을 알 수 있다. 그림 11은 출력전류  $i_o$ 와 입력전류  $i_s$ 의 외형을 나타내는데 모든 제어범위에 걸쳐 부하전류에 고조파는 크게 존재하지 않으나 전원전류에 포함된 고조파는 낮은  $X_o$  값에서 많은 고조파를 갖는다. 그러나 입력 필터에 의해 전원의 리액턴스에 의해 발생되는 고조파와 스파이크는 동시에 제거될 수 있다.

### III. 결론

기존의 PWM 방식에 의한 교류초퍼에서의 가장 큰 단점은 스위칭 소자의 소음 및 역률개선이 불가능한 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 3상 교류초퍼의 스위칭 주파수를 고주파로 운전하여 고조파 및 소음을 저감시킬 수 있는 고주파 APWM방식을 제안하였다. 그리고 APWM 초퍼에서는 전압의 크기와 역률을 조정할 수 있도록 Voltage Controller와 Phase Controller의 구성이 필요하다. 본 방식이 실제로 응용될 수 있는 분야는 컴퓨터용 전원으로서 AVR, 계측기 및 검사장비용 전원, 그리고 가용용 전자 강압기 전원에 사용될 수 있다.

### IV. 참고 문헌

1. G. Choe, et al., "A New Pulse-Width Modulated Method for AC Chopper," PESC-87 Conference Record, 1987.
2. B. W. Williams, "Asymmetrically Modulated AC Chopper," IEEE Trans. on IE, vol. 29(3), Aug. 1982.

- 3.A.Mozder, et al., "Three-Phase AC Power Control using Power Transistors," IEEE Trans. on IA, vol.12, No.5, 1976.
- 4.B.Cotta, "AC Chopper Regulation Using Power Transistors," Proceedings of Powercon 8, 1981.
- 5.G.N.Revanker, "Symmetrically Pulse-Width Modulated AC Chopper," IEEE Trans. on IECEI, vol.24, no.1, 1977.
- 6.G. Choe, et al., "Asymmetrically Pulse-Width Modulated AC Choppers," Proceedings of ISPE, May 1989.
- 7.A. Nabae, "Trends and Applications of Power Electronics," Proceedings of ISPE, May 1989.
- 8.P. Wood, Switching Power Converters, Van Nostrand Reinhold Co. 1981.

표 1. 3상 교류차퍼들의 비교

회로	스위칭소자수			역률개선	고조파 억제
	P	F	P + F		
A	2	0	2	X	O
B	2	1	3	X	O
C	2	2	4	X	O
D	3	1	4	O	O
E	3	3	6	O	O

( O : 가능, X : 불가능 )

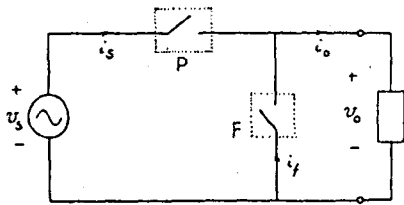


그림 1. PWM 교류차퍼

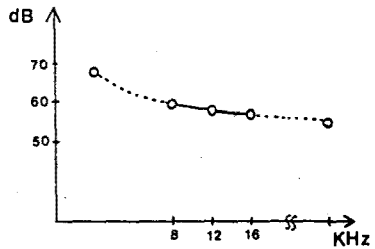
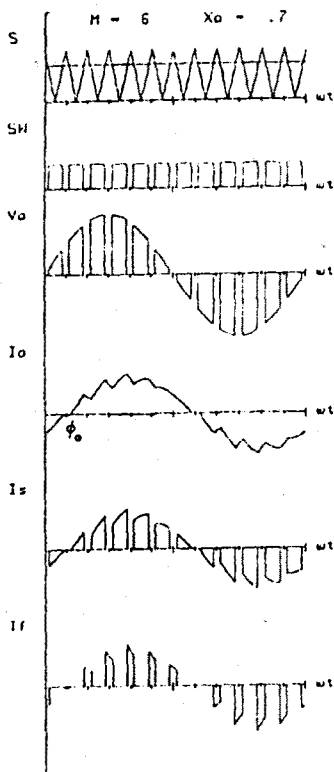
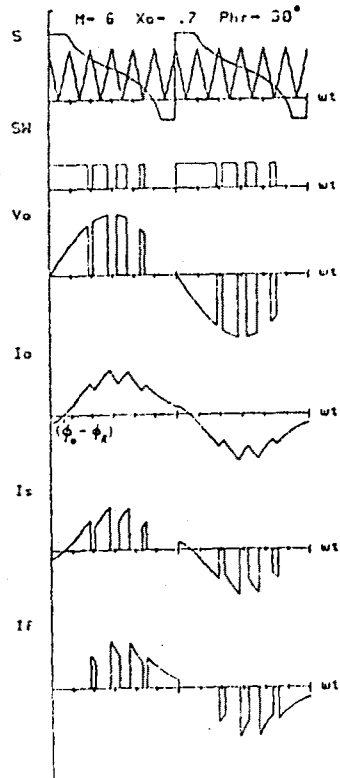


그림 2. 스위칭 주파수와 소음크기의 관계



(a) 대칭 PWM



(b) 비대칭 PWM

그림 3. PWM 교류차퍼의 전압, 전류 파형

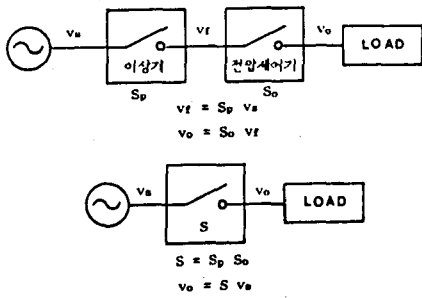


그림 4. 스위칭 함수의 블록선도

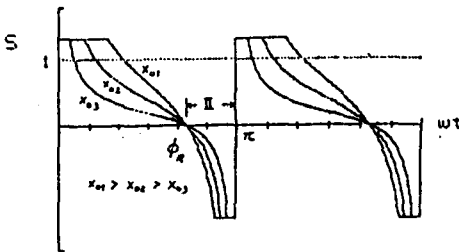
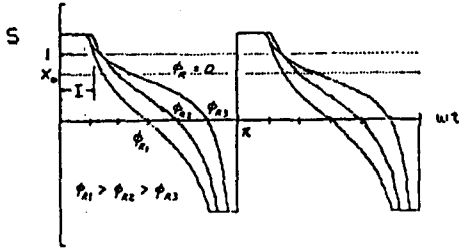
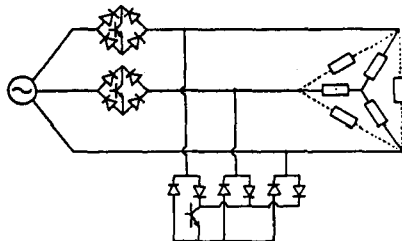
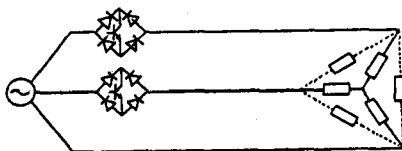


그림 5.  $\phi_R$ 과  $X_o$ 에 대한 이상적 스위칭함수의 관계



(b) 회로 B - Tr. 3 개

M 방식

W 방식

최적 방식

APWM 방식

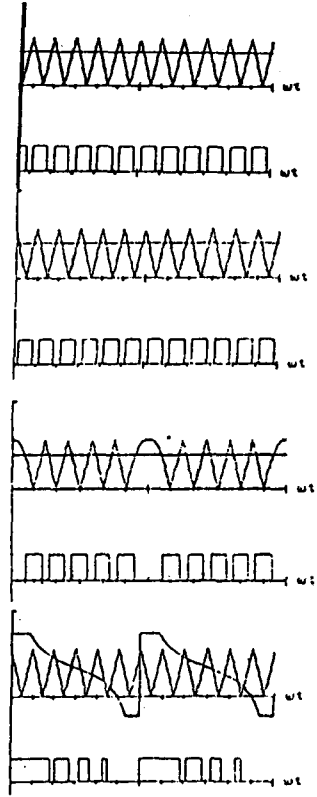
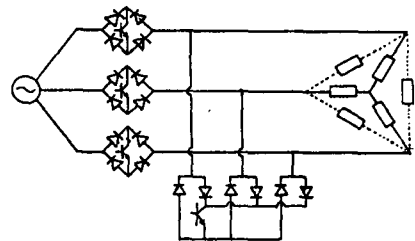
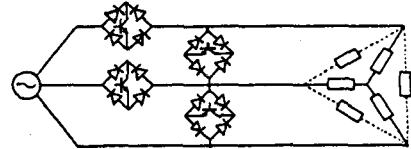
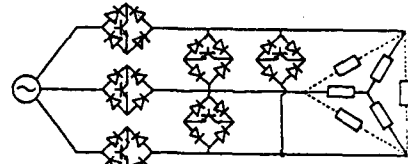


그림 6. 변조의 제 방식



(d) 회로 D - Tr. 4 개



(e) 회로 E - Tr. 6 개

그림 7. 3상 교류초퍼를 위한 제회로

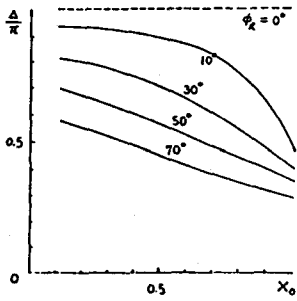


그림 8. 주어진  $\phi_o$ 에 대한  $X_o$ 의 상대적인 제어범위

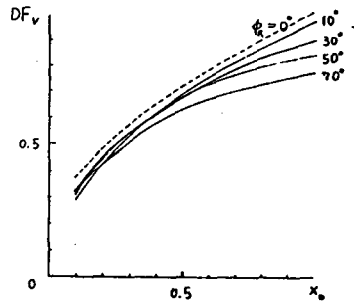


그림 9. 출력전압의 왜형을

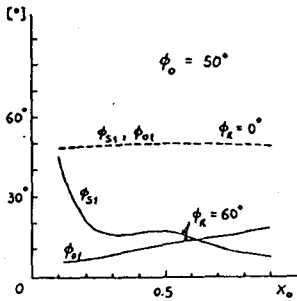


그림 10.  $\phi_o$ 에 대한  $X_o$ 의 전류각  $\phi_{o1}, \phi_{s1}$ 의 관계

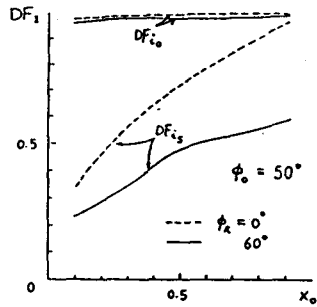


그림 11. 교류 입,출력 전류의 왜형을

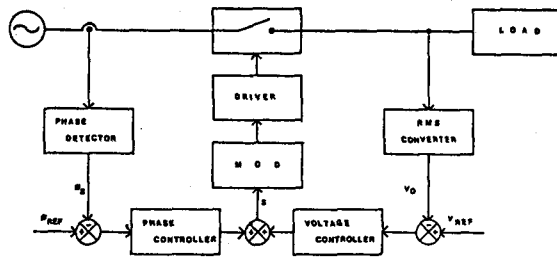


그림 12. 고주파 APWM 3상 교류초퍼 회로의 구성도