

# 플라잉 커패시터 멀티레벨 인버터의 플라잉 커패시터 전압 균형을 위한 멀티 캐리어 PWM 기법에 대한 연구

진범승, 김태진, 강대욱, 현동석  
한양 대학교

## A Study on the Multi-carrier PWM Methods for Voltage Balancing of Flying Capacitor in the Flying Capacitor Multi-level Inverter

Bum-Seung Jin, Tae-Jin Kim, Dae-Wook Kang, Dong-Seok Hyun  
Hanyang University

### ABSTRACT

The flying capacitor voltage control of the flying capacitor multi-level inverter (FCMLI) is very important for safe operation. The voltage unbalancing of flying capacitors caused serious problems in safety and reliability of system. In the FCMLI, balancing problem of the flying capacitor has its applications limited. The voltage unbalance is occurred by the difference of each capacitors charging and discharging time applied to FCMLI. This paper investigates and analyzes multi-carrier PWM methods to solve capacitor voltage balancing problem. The Phase-Shift PWM (PSPWM) method that is commonly used, The Modified Carrier-Redistribution PWM (MCRPWM) method and The Saw-Tooth-Rotation PWM (STRPWM) method are discussed and compared with respect to switching state, balancing voltage of capacitors and output waveform. These three PWM methods are analyzed by using a flying capacitor three-level inverter and provided result through simulation. Finally, the harmonics about the output voltages of their methods are compared using the harmonic distortion factor (HDF).

### 1. 서 론

최근, 전력 반도체 소자의 발전과 제어 시스템의 진보에 힘입어 고성능 전력 변환 장치는 여러 연구소와 산업 분야에서 폭넓게 개발되어 사용되어지고 있다. 그로 인해 인버터 시스템의 고압화, 대용량화를 위한 토폴로지로서 멀티-레벨 인버터에 그 관심이 집중되고 있다. 이러한 멀티 레벨 인버터는 다음과 같이 고압 대용량에 많은 이점을 가지고 있다<sup>[1]</sup>.  $N$ -레벨의 경우, 멀티 레벨 인버터는 기존의 2-레벨 인버터에 비하여 같은 소자 정격을 사용할 경우,  $(N-1)$  배의 인버터

용량을 증가시킬 수 있으며, 2-레벨 인버터보다 더 많은 전압 레벨을 가짐으로서 보다 정현적인 출력 전압 파형을 가진다. 이로 인해 고조파 성분을 크게 줄일 수 있고 스위칭 과도 상태 동안 발생하는  $dv/dt$  와 Surge 전압의 감소로 인하여 EMI 현상이 저감된다.

이러한 멀티-레벨 인버터는 크게 3가지, 즉, 다이오드 클램프드 인버터, 캐스캐이드 H-브릿지 인버터, 플라잉 커패시터 인버터가 소개 되었다<sup>[2]</sup>. 현재 다이오드 클램프드 인버터가 가장 많이 사용되고 있지만, 이 방식은 4-레벨 이상 확장시 DC-링크를 구성하는 각 커패시터 전압을 제어하기가 상당히 어렵고, 레벨이 증가함에 따라 구조적으로 많은 수의 클램핑 다이오드가 요구된다. 캐스캐이드 H-브릿지 인버터는 절연된 다수의 독립 전원을 사용하기 때문에 부피가 큰 변압기를 사용해야 하며 2차측에 여러 개의 탭을 필요로 하는 단점이 있다. 반면에, 플라잉 커패시터 인버터는 부가적인 커패시터가 필요하고 커패시터 전압 제어가 필요하다는 단점이 있지만, 이 커패시터들은 DC-링크 커패시터보다 용량이 작아도 되며 한 레그에 커패시터를 충·방전시키는 전압 리던던시 (전압 리던던시란 같은 전압을 출력하지만 다른 스위칭 상태이며, 각 스위칭 상태는 개별적인 플라잉 커패시터를 충전 혹은 방전이 가능하도록 커패시터를 조합한 상태를 나타낸다)가 존재하는 특성을 가지고 있기 때문에 일정 제어 주기 내에서 이 스위칭 상태의 인가시간을 같게 한다면 전압 균형 제어가 가능하다. 그러므로 플라잉 커패시터 인버터는 다른 두 멀티-레벨 인버터보다 멀티-레벨로의 확장이 용이하다<sup>[3]</sup>.

플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터에서 가장 중요한 문제중의 하나는 커패시터 전압의 불균형 제어 문제이다. 불균형 전압 문제는 출력전압의 파형을 왜곡하고, 스위치 오프 시 차단전압이 증가하여 소자의 파괴를 가져올 수 있다. 그러므로 플라잉

커패시터 인버터는 모든 동작 상태 하에서 플라잉 커패시터 전압 균형을 이루어야 한다.

본 논문은 이러한 플라잉 커패시터 전압 불균형 문제를 풀기 위한 멀티 캐리어 (Multi-Carrier) PWM 기법인, PSPWM (Phase-Shift PWM) 기법, MCRPWM (Modified Carrier-Redistribution PWM) 기법, 그리고 삼각파 캐리어 대신 톱니파를 사용하는 STRPWM (Saw-Tooth-Rotation PWM) 기법에 대하여 각각의 스위칭 상태, 커패시터 전압의 균형 문제, 그리고 출력 파형에 대하여 논의하고 비교하였다. 이 3 가지 방법을 3-레벨 인버터에 적용하여 해석하였고, 시뮬레이션을 통해 타당함을 입증하였다. 마지막으로 고조파 특성을 Harmonic Distortion Factor (HDF) 를 통하여 비교분석하였다<sup>[4]</sup>.

## 2. 플라잉 커패시터 3-레벨 인버터

### 2.1 플라잉 커패시터 3-레벨 인버터의 구조

일반적으로 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터는  $(N-1)*(N-2)/2$  개의 플라잉 커패시터가 요구된다<sup>[3]</sup>. 그림 1은 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 한 레그에 대한 회로도이다. 여기서 한 레그는 두 개의 스위칭 셀 (Switching Cell) 로 구성된다. 첫 번째 스위칭 셀은 DC-link와 플라잉 커패시터( $C_x$ )로 클램핑 된 스위칭  $S_{s1}$ 과  $S_{s1}'$ 이고, 다른 하나는 플라잉 커패시터로 클램핑 된  $S_{s2}$ 와  $S_{s2}'$ 이다. 각 스위칭 셀을 이루고 있는 두 개의 스위치는 항상 상보적으로 온/오프 스위칭 동작을 한다<sup>[5]</sup>.

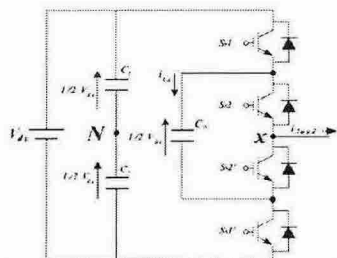


그림 1 플라잉 커패시터 3-레벨 인버터의 한 레그의 일반적 구조

Fig. 1 General structure of one leg of flying Capacitor three-level inverter

스위칭 함수를  $S_{s1}$ 과  $S_{s2}$ 로 나타내면 출력 레그 전압은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$V_{XN} = S_{s2} * V_{cx} + S_{s1} * (V_{dc} - V_{cx}) - V_{dc}/2 \quad (1)$$

스위치가 온 이면 스위칭 함수는 '1' 값을 가지고 오프 이면 '0' 값을 가진다. 예를 들어 3-레벨 인버터는 X와 N사이에  $V_{XN}=V_{dc}/2$ , 0, 또는  $-V_{dc}/2$ 의

3-레벨 출력 레그 전압을 발생한다. 출력 레그 전압  $V_{dc}/2$ 를 출력하기 위해서는 스위치  $S_{s1}$ 과  $S_{s2}$ 가 온이 되어야 한다. 마찬가지로  $-V_{dc}/2$ 는  $S_{s1}'$ 과  $S_{s2}'$ 이, 출력 레그 전압 0는  $S_{s1}$ 과  $S_{s2}'$  또는  $S_{s2}$ 와  $S_{s1}'$ 이 턴 온이 되어야 한다.

표 1 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 출력 레그 전압과 스위치 상태 및 스위칭 시퀀스

Table 1 Output leg voltage and switch sequence for switch states of flying capacitor 3-level inverter

출력 레그전압 ( $V_{xv}$ )	스위치 상태	스위칭 시퀀스	
		$S_{s1}$	$S_{s2}$
$V_{dc}/2$	P	1	1
0	$O_1$	1	0
	$O_2$	0	1
$-V_{dc}/2$	N	0	0

표 1은 출력 레그 전압과 스위칭 상태 및 스위칭 시퀀스 사이의 관계를 나타내고 있다. 이 4가지 상태중, P와 N은 부하가 DC-link와 직접 연결되는 상태이고,  $O_1$ 과  $O_2$ 는 부하가 플라잉 커패시터와 DC-link 혹은 플라잉 커패시터와 연결되는 상태이다. 그렇기 때문에,  $O_1$ 과  $O_2$  상태가 플라잉 커패시터의 전압 변동에 영향을 준다. 만약 부하가 유도성이고 전류는 그림 1에서처럼 부하쪽으로 흐른다면  $O_1$ 의 스위칭 상태는 충전,  $O_2$ 의 상태는 방전이 되어진다. 따라서 이 두가지 상태의 인가시간을 스위칭 주기 동안 같게 하면 전압의 평균 변화는 0이 되기 때문에, 플라잉 커패시터의 전압의 변동을 제어할 수 있다.

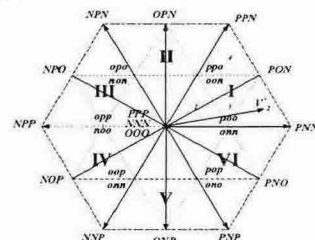


그림 2 3-레벨 인버터의 공간 전압 벡터 다이어그램

Fig. 2 Space voltage vector diagram for three-level inverter

그림 2는 3-레벨 인버터의 공간 벡터 다이어그램을 보여준다. P, O, N의 세가지 스위칭 상태가 존재한다. 다음 섹션부터 나오는 세가지 PWM 방법을 레퍼런스 전압 벡터가 2의 위치에 있다고 가정하고 해석하겠다.

## 3. 플라잉 커패시터 멀티-레벨을 위한 PWM 방법

### 3.1 PSPWM (Phase-Shift PWM) 방법

PSPWM 방법은 캐리어를 phase shift 시켜 한 레그의 충전과 방전 스위칭 상태를 같게 한다<sup>[5]</sup>.

그림 3(a)는 PSPWM 방법에서의 레퍼런스 전압, 캐리어 시그널, 게이트 시그널 그리고 스위칭 상태를 나타낸다. 여기서  $V_a^*, V_b^*, V_c^*$  는 레퍼런스 전압이다. 같은 크기와 주파수의 2개의 캐리어를 사용하고, 상을 180도 시프트 시켜서 3레벨 출력 전압을 발생시킨다. 또한, 캐리어 1과 캐리어 2의 사용으로  $T_s$  (샘플링 타임) 동안  $O_1$ 과  $O_2$ 의 스위칭 시간을 같게 할 수 있다<sup>[6]</sup>.

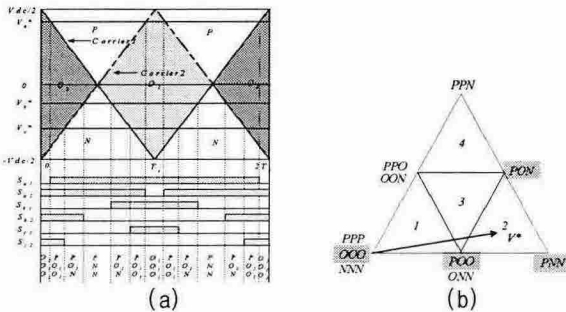


그림 3 PSPWM 방법과 공간 벡터 다이어그램.  
Fig. 3 PSPWM method and Space voltage vector diagram

그림 3(b)는 레퍼런스 전압  $V^*$ 가 2 영역에 위치하였을때의 공간 벡터 다이어그램을 보여준다. PSPWM방법은 3개의 인접한 벡터 ( $PON$ ,  $PPO$ ,  $PNN$ ) 외에 인접하지 않은 벡터 ( $OOO$ ) 로 출력이 되기 때문에 다음에 소개될 MCRPWM 방법과 STRPWM 방법보다 선간 출력 전압에 고조파 성분을 많이 포함하게 된다.

### 3.2 MCRPWM (Modified Carrier-Redistribution PWM) 방법

MCRPWM 방법은 CRPWM (Carrier-Redistribution PWM)의 단점을 수정한 PWM 방법이다. CRPWM 방법의  $V_b^*$ 와  $V_c^*$  가 그림 4(a)의 위치에 있다면, 각각  $O_1-O_1-N-N-N-O_2-O_2$  와  $O_1-N-N-N-N-O_2$  연속적인 스위칭 상태를 만들어 충·방전 시간이 같지만,  $V_a^*$  레퍼런스 전압은  $P-P-P-O_1-P-P-P$ 가 되어 반주기 동안 충전 또는 방전 상태가 되어, 최종상태에 따라 플라잉 커패시터 전압의 변동이 됨을 알 수 있다<sup>[7]</sup>. 이런 단점을 보완하기 위해, MCRPWM 방법은 레퍼런스 전압의 매 기본과 주기 동안 대칭적으로 캐리어들을 배치하는 것이다<sup>[8]</sup>. 다시 말해, 기본과 주기까지는 캐리어 1과 캐리어 2를 사용하고 다음 주기에는 캐리어 1과 캐리어 2의 위치를 변화시킴으로서 전압 균형을 이룰 수 있다. 그림 4(b)는 MCRPWM의 공간벡

터 다이어그램이다. PSPWM 방법과 달리 3개의 인접한 벡터들로만 구성된다.

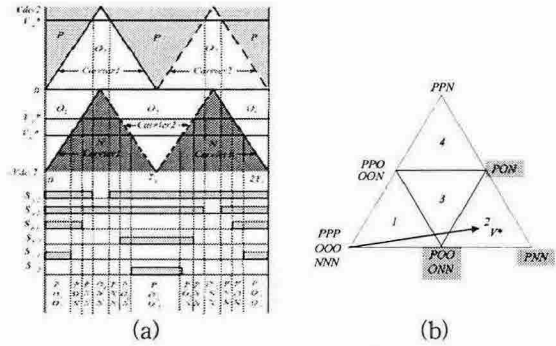


그림 4 CRPWM 방법과 공간 벡터 다이어그램.  
Fig. 4 CRPWM method and Space voltage vector diagram

### 3.3 STRPWM (Saw-Tooth-Rotation PWM) 방법

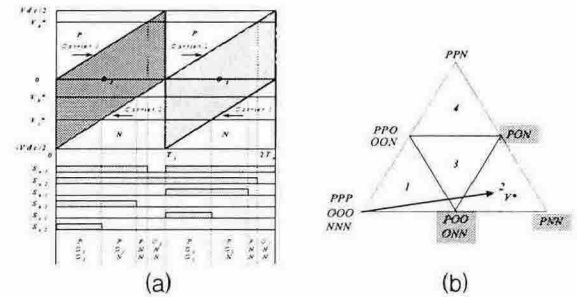


그림 5 STRPWM 방법과 공간 벡터 다이어그램.  
Fig. 5 STRPWM method and Space voltage vector diagram

STRPWM 방법은 그림 5(a)에 나타내었다. 첫  $T_s$  동안 캐리어 1과 캐리어2를 가지고 각 밴드를 만든후, 다음  $T_s$  동안 캐리어 1을 하위밴드 ( $0$ 과  $-V_{dc}/2$ 의 사이) 에 위치시키고, 캐리어 2를 상위밴드 ( $V_{dc}/2$ 와  $0$  사이) 에 위치시킴으로서  $O_1$ 과  $O_2$ 의 스위칭 시간을 같게 할 수 있다. 하지만, 만약 이 방법을 삼각파로 적용을 한다면, 레퍼런스 전압의 위치에 따라 스위치 상태가 달라지기 때문에 플라잉 커패시터의 전압 균형을 이룰 수 없게 된다 (레퍼런스). 그림 5(b)는 STRPWM의 공간벡터 다이어그램이다. MCRPWM 방법과 마찬가지로 인접한 벡터들로 구성됨을 알 수 있다<sup>[9]</sup>.

## 4. 시뮬레이션

3가지 PWM 방법을 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터를 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은,  $V_{dc}=700[V]$ ,  $T_s=125[us]$ , 변조지수  $=0.9$ , 출력주파수  $=60[Hz]$ , 커패시터용량  $=1000[uF]$ , 부하저항  $=10[\Omega]$ , 부하인덕턴스  $=10[mH]$ .

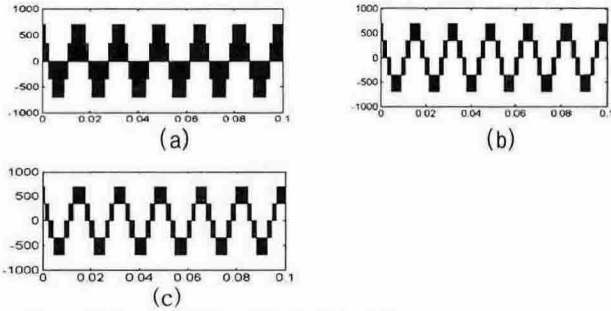


그림 6 출력 선간전압 시뮬레이션 파형  
(a)PSPWM 방법 (b)MCRPWM 방법 (c)STRPWM 방법  
Fig. 6 simulation result of line-to-line voltage

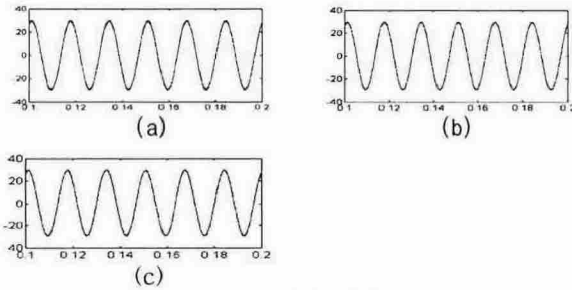


그림 7 부하 전류(ia) 시뮬레이션 파형  
(a)PSPWM 방법 (b)MCRPWM 방법 (c)STRPWM 방법  
Fig. 7 simulation result of load current(ia)

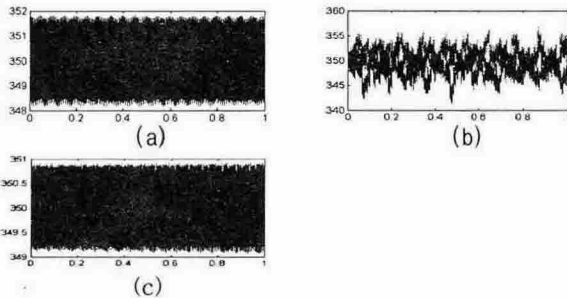


그림 8 플라잉 커패시터 전압 시뮬레이션 파형  
(a)PSPWM 방법 (b)MCRPWM 방법 (c)STRPWM 방법  
Fig. 8 simulation result of flying capacitor voltage

그림 6은 각 PWM 방법의 선간전압 파형이다. 그림 6 (a)의 PSPWM 방법이 다른 두 방법 보다 고조파가 많은 걸 알 수 있다. 그림 8은 일정 주기 동안의 플라잉 커패시터 전압의 파형으로서 3가지 방법 모두 커패시터의 전압 균형을 이루지만, MCRPWM 방법이 다른 방법들보다 변동이 조금 큰 걸 알 수 있다. 그 이유는 MCRPWM 방법이 다른 방법보다 제어를 위한 주기가 크고, 캐리어밴드가 포개어져 레퍼런스 전압의 위치에 따라 전압레벨이 변하게 된다.

## 6. 고조파 특성 비교

본 논문에서 고조파 특성은 HDF를 통하여 분석 비교하였다<sup>[4]</sup>. HDF는 선형 변조 영역 전체에서의 고조파 성분 비교가 가능하다.

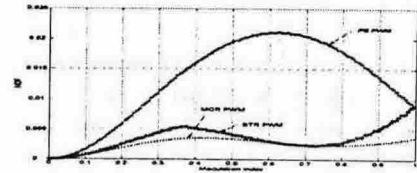


그림 9 HDF 비교  
Fig. 9 Comparison of HDF.

## 7. 결론

본 논문은 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터의 플라잉 커패시터의 전압 균형을 이루기 위한 3가지 PWM 방법에 대하여 해석하고 비교하였다. 일반적으로, 플라잉 커패시터의 전압균형을 이루기 위하여 일정 주기 동안에 충전과 방전의 시간이 같아야 한다. 논의한 3가지 방법 모두 일정 주기 동안 플라잉 커패시터 전압 균형을 안정적으로 제어할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] T. A. Meynard and H. Foch, "Multi-level conversion: High voltage choppers and voltage-source inverter," in *Proc., IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 1, pp. 397-403, 1992.
- [2] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverter: a survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 49, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [3] X. Yuan, H. Stemmler and I. Barbi, "Investigation on the Clamping Voltage Self-Balancing of the Three-Level Capacitor Clamping Inverter," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp.1059-1064, 1999.
- [4] D. W. Kang and D. S. Hyun, "Simple harmonic analysis method for multi-carrier PWM techniques using output phase voltage in multi-level inverter," *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 152, no. 2, pp.157-165, April, 2005.
- [5] S. G. Lee, D. W. Kang, Y. H. Lee and D. S. Hyun, "The Carrier-Based PWM method for Voltage Balancing of Flying Capacitor Multilevel Inverter," *IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 1, pp. 126-131, 2001.
- [6] M. Calais, L. J. Borle, V. G. Agelidis, "Analysis of multicarrier PWM methods for a single-phase five level inverter," *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 1351-1356, 2001.
- [7] D. W. Kang, Y. H. Lee, B. S. Suh, C. H. Choi and D. S. Hyun, "An Improved Carrier-Based SVPWM Method Using Leg Voltage Redundances in Generalized Cascaded Multilevel Inverter Topology," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 18, no. 1, pp 180-187, Jan., 2003.
- [8] D. W. Kang, B. K. LEE, J. H. Jeon, T. J. Kim and D. S. Hyun, "A Symmetric Carrier Technique of CRPWM for Voltage Balance Method of Flying-Capacitor Multilevel Inverter," *will be published in IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, June, 2005
- [9] D. W. Kang, W. K. Lee and D. S. Hyun, "Carrier-Rotation Strategy for Voltage Balancing in Flying Capacitor Multi-level Inverter," *IEE Proc. Electr.*