

# 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터의 커패시터 전압 균형을 위한 캐리어 비교방식의 펄스 폭 변조 기법

이상길\*, 강대욱, 이요한, 현동석  
한양대학교 전기공학과

## The Carrier-based SVPWM method for voltage balance of flying capacitor multilevel inverter

Sang-Gil Lee, Dae-Wook Kang, Yo-Han Lee, Dong-Seok Hyun  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

### ABSTRACT

This paper proposes a new solution by carrier-based SVPWM method to solve the most serious problem of Flying Capacitor Multi-level Inverter that is unbalance of capacitor voltages. The voltage unbalance is occurred by the difference of each capacitor's charging and discharging time applied to Flying Capacitor Multi-level Inverter. It controls the variation of capacitor voltages into the mean '0' during some period by means of new carriers using the leg voltage redundancy in the Inverter. The solution can be easily expanded to the multi-level. Also, this method can make the switching loss and conduction loss of device equal by the use of leg voltage redundancy.

First, the unbalance of capacitor voltage is analyzed and the conventional theory of self-balance using phase-shifted carrier is reviewed. And then the new method that is suitable to the Flying Capacitor Inverter is explained. The simulation results would be shown to verify the proposed method

### 1. 서론

최근 인버터 시스템의 고압화·대용화를 위한 토 팔로지로서 멀티-레벨 인버터에 관심이 집중되고 있다. 이는 N-레벨의 경우 기존의 범용 인버터인 2-레벨 인버터에 비해 전압을 (N-1)배 증가시킴으로서 전력변환장치를 대용량화 할 수 있으며 2-레벨 인버터보다 더 많은 전압 레벨을 가짐으로서, 즉 보다 더 정현적인 출력 전압 파형을 가짐으로서 고조파 감소뿐 아니라 EMI현상 등의 감소라는 부가적인 장점을 가지게 된다.

이러한 멀티-레벨 인버터는 크게 3가지의 종류(다이오드 클램프 인버터, 캐스캐이드 인버터, 플라잉 커패시터 인버터)가 있으며 현재 3-레벨 다이오드 클램프 방식인 Neutral Point Clamped(NPC) 인버터가 가장 널리 사용되고 있다[1]-[5]. 그러나 이 방식은 4-레벨 이상에서 DC-링크를 구성하는 각 커패시터 전압 균형을 위한 제어방법이 매우 어려우며 부가적인 클램핑 다이오드 수가  $(N-1) \times (N-2)$ 로 증가하기 때문에 고-레벨로의 적용이 구조적으로 어려운 상황이다[8].

이에 비해 Flying 커패시터 방식은 부가적인 커패시터가 필요하고 다이오드 방식의 인버터처럼 커패시터 전압제어가 필요하다는 단점이 있으나 이 커패시터들은 DC-링크 커패시터보다 용량이 작아도 되며 또한 다이오드 방식과는 달리 한 레그에서 커패시터를 충·방전시키는 스위칭 상태가 모두 존재하기 때문에 일정 제어주기내에서 이 스위칭 상태의 인가시간을 같게 한다면 전압 불균형이 발생하지 않으므로 다이오드 방식보다 멀티-레벨로의 확장이 쉬워진다.

이러한 커패시터 전압 변동을 제어하기 위한 펄스 폭 변조(PWM)방식으로서 캐리어를 180도 phase shift시켜 한 레그의 충전과 방전 스위칭상태의 인가시간을 같게 하여 커패시터 전압을 일정하게 유지시키는 'Self-Balancing Sub-Harmonic PWM방식'이 제안되었다[6][7]. 그러나 이 방식은 멀티-레벨에서 다른 PWM방식(SPWM과 SVPWM)에 비하여 스위칭 주파수가 두 배로 증가하며 출력 선간 전압에 더 많은 고조파 성분을 갖는 단점을 가지고 있다.

이에 비해 제안한 방법은 N-레벨의 경우 항상  $2(N-1)T_s$ 동안 각 스위치가 한 번 온과 오프를 수행하므로 결국  $T_s$ 동안 한 번의 온이나 오프가 발생한다. 따라서 이 방법은 Self-Balancing Sub-Harmonic PWM방법보다 스위칭 주파수를 반으로 줄일 수 있다. 또한  $2(N-1)T_s$ 동안 기준전압을 일

정하게 유지시킴으로서 커패시터의 전압균형을 얻을 수 있으며 기존의 삼각파 캐리어로부터 출력 레그전압과 스위칭 시퀀스의 관계로부터 유도되어지는 새로운 캐리어는 기존의 삼각파 캐리어를 제어 목적에 따라 분해하는 특성을 가지므로 기존의 방법에서 출력되는 선간전압과 동일한 파형을 갖는 장점을 갖는다[9]. 따라서 제안한 방법은 Self-Balancing Sub-Harmonic PWM방법보다 더 좋은 고조파 특성을 갖게된다.

## 2. 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터의 커패시터 전압 균형을 위한 캐리어 비교방식의 PWM기법

### 2.1 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터

그림 1은 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 한 레그에 대한 회로도이고 표 1은 출력 레그전압과 그에 해당하는 스위치 상태와 스위치 시퀀스를 나타내고 있다. 플라잉 커패시터 인버터는 다이오드 클램프 인버터와 같은 크기의 DC-링크단을 가지지만 각 상에 이 DC-링크단과 분리된 플라잉 커패시터를 통해서 중간 전압을 발생시키므로 DC-링크단에 연결된 클램핑 다이오드를 통해서 중간전압을 출력하는 다이오드 클램프 방식과는 전압불균형의 원인과 양상이 다르게 된다. 또한 이 두 인버터가 출력하는 레그전압의 종류는 같으나 이를 구성하는 스위치상태는 다르므로 전압불균형에 대한 제어방식이 다르게 나타난다. 3-레벨의 경우 플라잉 방식은 윗 단의 두 개의 스위치에서 가질 수 있는 스위치 조합은 4가지이며 중간 레그 전압을 내는 스위

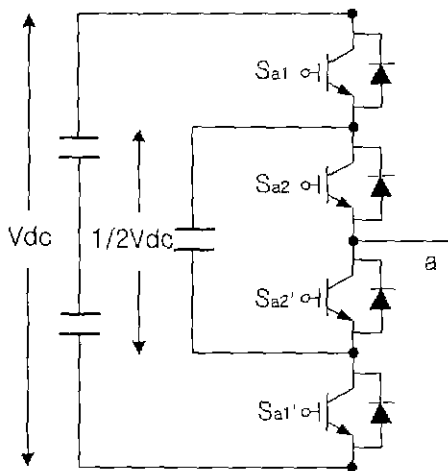


그림 1 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 한 레그에 대한 회로도

표 1 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 한 레그에 대한 출력전압과 그에 해당하는 스위치상태와 스위치시퀀스

Output Leg Voltage (Van)	Switch State	Switch Sequence	
		Sa1	Sa2
Vdc	2	1	1
Vdc/2	1 <sub>1</sub>	1	0
	1 <sub>2</sub>	0	1
0	0	0	0

칭 상태가 두 개가 있게 된다. 부하가 유도성이고 전류는 부하쪽으로 흐른다고 가정하면 표에서 '1' 스위치상태는 플라잉 커패시터를 충전시키며 '1' 스위치상태는 방전시키게 된다. 따라서 이 두 스위치상태의 인가시간을 일정제어주기동안 같게 해주면 커패시터의 전압변동을 평균적으로 영으로 제어해 줄 수 있다. 이에 비해 다이오드 방식은 중간전압을 출력하는 스위치상태는 하나만 사용 가능하고 이로 인해 부하상태에 따라 DC-링크의 중성점전압이 영향을 받게 된다. 멀티-레벨로 확장이 되면서 다이오드 방식은 부하상태에 따라 DC-링크 전압 불균형의 양상이 복잡해지고 제어영역이 줄어드는데 비해 플라잉 커패시터 방식은 커패시터 전압 균형을 위한 두 가지 스위치상태가 존재하므로 이를 제어해 줄 수 있다.

### 2.2 커패시터 전압 균형을 위한 새로운 캐리어 비교방식의 PWM방법

앞서 플라잉 커패시터는 스위치의 온-오프에 따라 커패시터에 전압이 변동하게 되므로 이를 제어하기 위해서는 일정 전류제어주기동안 충전과 방전이 서로 교대로 발생하고 그 시간이 같도록 하는 스위칭 패턴이 요구된다는 것을 설명했다. 이를 위해 제안한 방법은 플라잉 커패시터 인버터의 레그 전압에 존재하는 Redundancy(같은 레그전압을 출력하지만 다른 스위칭 시퀀스를 갖는 스위칭 상태)를 이용하여 일정주기동안 커패시터 전압의 충전과 방전이 한번씩 그리고 같은 시간동안 발생하도록 하여 이 일정시간동안 커패시터 전압의 변동량을 영으로 제어하는 펄스 폭 변조 방식이며 멀티-레벨로의 확장을 쉽게 하기 위해 캐리어 비교방식의 형태를 갖는다. 이 방법은 N-레벨의 경우 항상  $2(N-1)T_s$ 동안 각 스위치가 한 번 온과 오프를 수행하므로 결국  $T_s$ 동안 한 번의 온이나 오프가 발생한다.

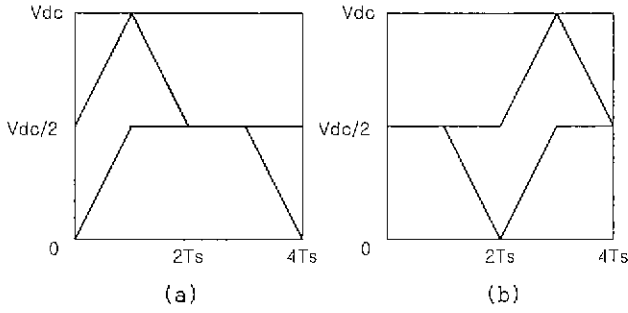
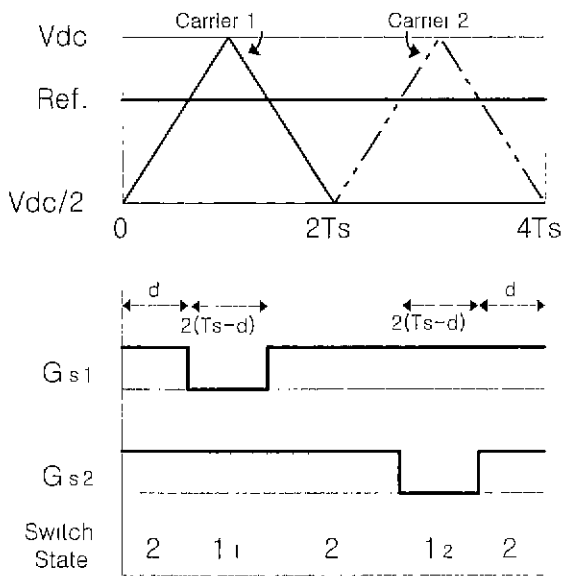


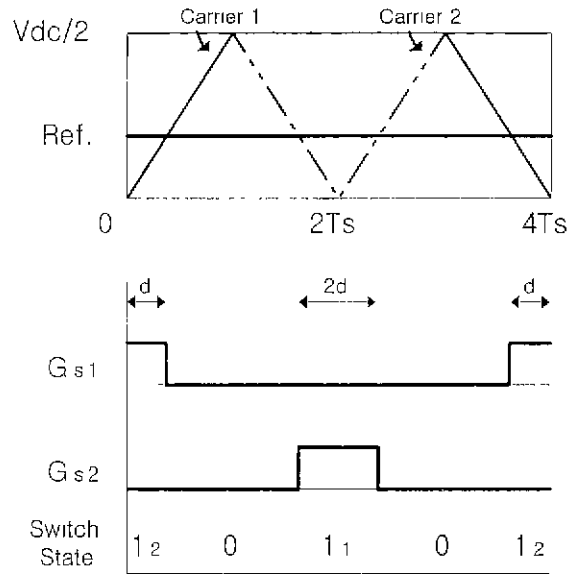
그림 2 새로운 캐리어웨이브 (a)  $S_1$  (b)  $S_2$

3-레벨의 경우  $4T_s$  동안 윗 단의 두 개의 스위치가 한 번씩 온과 오프를 하므로 4번의 온 또는 오프가 발생하여 평균적으로  $T_s$  동안 한 번의 온이나 오프가 발생한다. 또한 기존의 삼각파 캐리어로부터 출력 레그전압과 스위칭 시퀀스의 관계로부터 새로운 캐리어가 유도되어지며 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 스위치  $S_1$ 에 대한 그리고 그림 2(b)는 스위치  $S_2$ 에 대한 캐리어이다. 새로운 캐리어는 같은 기준전압에 대해 삼각파 캐리어를 제어목적에 따라 분해하는 특성을 가지므로 기존의 다른 방법(SPWM, SVPWM)에서 출력되는 선간전압과 동일한 파형을 갖는다.

그림 3은 커패시터 전압 균형을 설명하기 위해 캐리어와 기준전압 그리고 게이트 인가전압을 나타낸 그림이다. 새로운 캐리어는 기준전압의 크기에 의해서 다르게 선택되므로 그림에서 2가지 경우(고변조지수와 저변조지수)로 나누어 도시하였다. 여기서 변조지수는 최대 선형변조를 갖는 전압에 대한 기준전압의 비로 정의한다.



(a) 고변조지수인 경우



(b) 저변조지수인 경우

그림 3 커패시터 전압 균형을 위한 새로운 캐리어 비교방식의 PWM방법

그림 3(a)에서처럼 기준전압이 고변조지수이고  $4T_s$  동안 일정하면 캐리어 1과의 비교에 의한  $S_1$ 에 대한 게이트 신호는 그림처럼  $G_{s1}$ 으로 나타내지며 캐리어 2에 의한  $S_2$ 에 대한 게이트 신호는  $G_{s2}$ 로 나타내어진다. 두 게이트 신호에 의한 스위치상태는 그림에서처럼 2-1<sub>1</sub>-2-1<sub>2</sub>-2의 순으로 나타내지며 1<sub>1</sub>과 1<sub>2</sub>의 인가시간은  $2(T_s-d)$ 로 같아짐을 알 수 있다. 따라서 부하가 유도성이고 전류의 방향이 일정하다면 이 두 스위치상태는 같은 시간동안 각각 플라이잉 커패시터를 충전과 방전시키므로  $4T_s$ 의 주기동안 그 변동량은 영이 되게 된다. 저변조지수인 경우에는 고변조지수인 경우와 같은 방법으로 그림 3(b)로부터 두 스위치상태 1<sub>1</sub>과 1<sub>2</sub>의 인가시간이  $2d$ 로 얻어지며 역시 커패시터의 변동량이 영으로 제어됨을 알 수 있다.

이처럼 제안된 방법은 새로운 캐리어를 토대로 일정주기동안 플라이잉 커패시터의 충전방전량을 같게 제어할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 RL-부하를 갖는 삼상 5-레벨 플라이잉 커패시터 인버터를 모델링하고 제안한 알고리즘을 5-레벨로 확장하여 시뮬레이션을 수행하였다.

· 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

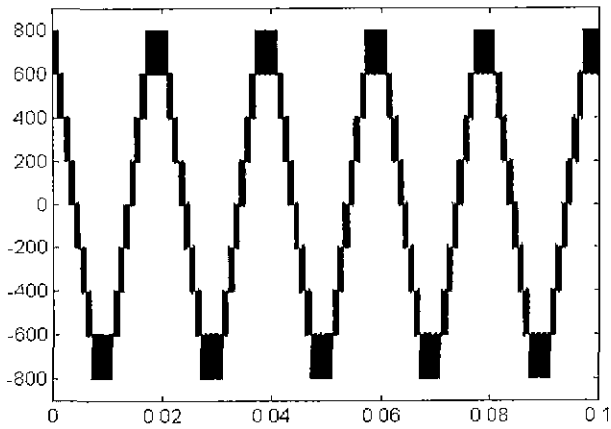


그림 4 5-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 출력 선간전압

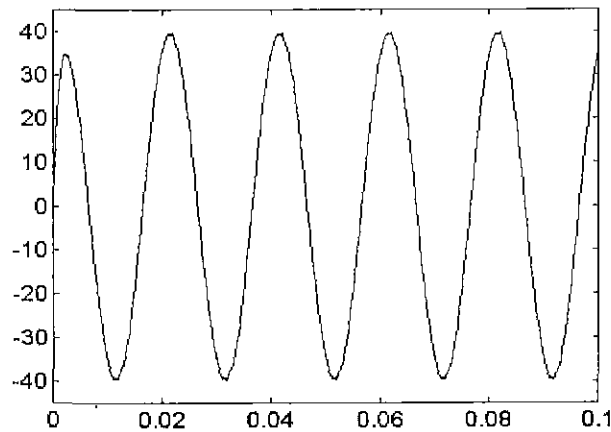


그림 5 5-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 부하전류

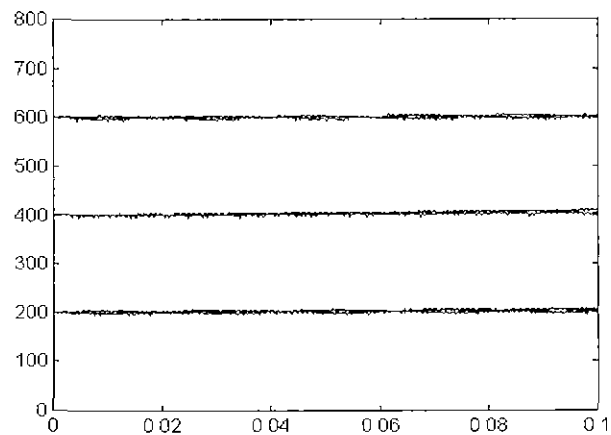


그림 6 5-레벨 플라잉 커패시터 인버터 각 상의 커패시터 전압

$V_{dc}=800V$ ,  $T_s=125\mu s$ , 변조지수=0.9, 출력주파수=50Hz, 커패시터용량=1000 $\mu F$ , 부하저항=10 $\Omega$ , 부하인덕터스=10mH

그림 4는 출력 선간전압을 나타내며 그림 5는 부

하전류를 그림 6은 삼상의 각 플라잉 커패시터 전압을 나타낸다. 그림으로부터 출력 선간전압은 Self-Balancing Sub-Harmonic PWM방법보다 고조파가 더 적게 포함되어 있으며 커패시터 전압의 균형이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

제안한 방법은 기존의 삼각파 캐리어로부터 출력 레그 전압과 스위칭 시퀀스의 관계로부터 유도되어지는 새로운 캐리어를 이용하여 Self-Balancing Sub-Harmonic PWM방식과 동일하게 커패시터의 충전과 방전시간을 같게 하여 전압 평형을 이룰 수 있으며 기존의 방법보다 스위칭 주파수를 반으로 줄일 수 있고 또한 출력되는 선간 전압에 더 적은 고조파가 포함되는 장점을 갖는다. 따라서 제안한 방법은 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터에 적합한 방식이다.

#### 참고 문헌

- [1] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral-point-clamped PWM Inverter," *IEEE Trans. on IA*, Vol. 17, No. 5, pp. 518-523, 1981.
- [2] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli and S. Tenconi, "A Non Conventional Power Converter for Plasma Stabilization", *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 122-129, 1988.
- [3] T. Meynard and H. Foch, "Multi-Level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage Source Inverters", *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 397-403, 1992.
- [4] J. Steinke, "Switching Frequency Optimal PWM Control of a Three Level Inverter", *IEEE Trans. on PE*, Vol. 7, NO. 3, pp.487-496, 1992
- [5] C. Newton, M. Summer, "Neutral Point Control for Multi-level Inverter: theory, design and operational limitation," *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp.1336-1343, 1997
- [6] X. Yuan, H. Stemmler and I. Barbi, "Investigation on the Clamping Voltage Self-Balancing of the Three-Level Capacitor Clamping Inverter", *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp 1059-1064, 1999.
- [7] Y. Liang, C. O. Nwankpa, "A Power Line Conditioner Based on Flying capacitor multilevel Voltage Source Converter with Phase Shift SPWM", *Proceedings of IEEE Industry Applications Meeting*, Vol. 4, pp. 2337-2343, 1999.
- [8] Y. H. Lee, R. Y. Kim and D. S. Hyun, "A Novel SVPWM Strategy Considering DC-link Balancing for a Multi-level Voltage Source Inverter", *IEEE-APEC Conf. Rec.*, pp 509-514, 1999
- [9] D. W. Kang, Y. H. Lee, B. S. Suh, C. H. Choi and D. S. Hyun, "An Improved Carrierwave-based SVPWM Method Using Phase Voltage Redundancies for Generalized Cascaded Multilevel Inverter Topology", *IEEE-APEC Conf. Rec.*, pp. 542-548, 2000.