

플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터의 커패시터 전압 균형을 이루기 위한 캐리어 비교방식을 이용한 캐리어 대칭 기법

전재현, 김태진, 강대욱, 현동석
한양대학교 전기공학과

A Symmetric Carrier Technique of CRPWM for Voltage Balance Method of the Flying Capacitor Multi-level Inverter

J.H. Jeon, T.J. Kim, D.W. Kang, and D.S. Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

This paper presents a simple carrier symmetric method for the voltage balance of flying capacitors in FCMLI(flying capacitor multi-level inverter). To achieve the voltage balance of flying capacitors, the utilization of each carrier must be balanced during a half-cycle of the switching period such as PSPWM(Phase-Shifted PWM). However, the CRPWM(Carrier Redistribution PWM) method causes the fluctuation of flying capacitor voltages because the balanced utilization of carriers is not achieved. Moreover, it does not consider that the load current change has an influence on flying capacitor voltages by assuming that the current flows into the load. To overcome the drawbacks of CRPWM, it is modified by the technique that carriers of each band are disposed symmetrically at every fundamental period. Firstly, the CRPWM method is reviewed and the theory on voltage balance of flying capacitors is analyzed. The proposed method is introduced and is verified through the experiment result.

1. 서 론

최근에, 멀티-레벨 인버터는 고압 대용량 인버터 시스템을 위한 토팔로지로써 관심이 증대되고 있다^[1]. 멀티-레벨 인버터는 고압 대용량에 적합한 장점을 가지고 있다. 왜냐하면 보다 더 정현적인 출력전압 파형을 가지고 제한된 최대정격 전압으로 높은 전압을 얻을 수 있는 능력을 가지고 있기 때문이다. 게다가, 전압의 레벨이 증가함에 따라 같은 스위칭 주파수에서 출력전압의 고조파 특성이 비례적으로 감소하게 된다^{[2],[3]}. 이러한 멀티-레벨 인버터는 크게 3가지 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^[4]. 그러나 이 방식은 4-레벨 이상에서 DC-링크를 구성하는 각 커패시터 전압 균형을 위한 제어방법이 매우 어려우며 부가적인 클램핑 다이오드 수가 증가하기 때문에 멀티-레벨로의 적용이 구조적으로 어려운 상황이다. 반면에, 플라잉 커패시터 방식은 부가적인 커패시터가 필요하고 다이오드 방식의 인버터처럼 커패시터 전압 제어가 필요하다는 단점을 가지고 있다^{[5],[6]}. 그러나 이 커패시터들은 DC-링크 커패시터보다 용량이 작아도 되며 또한 다이오드 방식과는 달리 한 레그에서 커패시터를 충·방전시키는 스위치 상태(리턴던서)가 모두 존재한다. 그러므로 다이오드 클램프 방식보다 멀티-레벨로의 확장이 용이하다. 플라잉 커패시터 전압의 균형을 이루기 위해서는 충·방전 스위칭 상태의 인가시간을 같게 하여 커패시터 전압을 일정하게 유지시키는 PSPWM(Phase-Shifted PWM)에서처럼 스위칭 주기동안 전압레벨과 관련한 스위칭 조합이 사용되어야 한다^{[7],[10]}. 그러므로, 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터는 원하는 스위칭조합으로 전력변환 장치에 사용되어야 한다. 그러나 PSPWM 방법은 3개의 인접한 벡터와 그렇지 않은 기준전압 벡터로 인해서 출력 선간 전압에 더 많은 고조파 성분을 갖는 단점을 가지고 있다. 전압균형을 이루기 위한 다른 방법으로 캐리어 재배치 기법 CRPWM(Carrier-Redistribution PWM)이 있다^[8]. 기존의 삼각파 캐리어로부터 출력 레그 전압과 스위칭 시퀀스의 관계로부터 유도되어진 이 방법은 삼각파 캐리어를 제어목적에 따라 분해하는 특성을 가지므로 기존의 방법에서 출력되는 선간 전압과 동일한 파형을 갖는 장점을 갖는다^[9]. 그러므로 PSPWM 방법보다 더 좋은 고조파 특성을 갖게된다. 그러나, 캐리어 비교 방식은 캐리어의 이용이 균형을 이루지 않기 때문에 플라잉 커패시터 전압의 변동을

야기한다. 게다가, 전류의 흐름이 부하 쪽으로 흐른다고 가정할 때 전류의 변화가 커패시터 전압에 영향을 주는 것을 고려하지 않았다. 그러므로 플라잉 커패시터 전압의 충·방전량이 스위칭 주기동안 “0”이 되지 않는다. CRPWM 방법의 결점을 극복하기 위해서 각 밴드의 캐리어들을 매 기본과 주기동안 대칭적으로 배치하는 기법으로 수정하였다. 제안한 방법은 기본과 주기동안 플라잉 커패시터의 불균형을 다음 기본과 주기에서 보상하는 것이다. 제안된 방법은 쉽게 멀티-레벨로의 확장이 용이하고 CRPWM 방법과 비교하여 플라잉 커패시터 전압의 안정성을 확인하였다. 물론, PSPWM 방법이 플라잉 커패시터 전압 제어를 위해서는 가장 좋은 방법이다. 그러나 제안된 방법보다는 더 많은 고조파를 가지고 있다. 제안된 기법의 결과를 실험으로 보여준다.

2. 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터

2.1 플라잉 커패시터 멀티-레벨 인버터

그림 1은 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 한 레그에 대한 회로도이다. 각각의 스위치들은 쌍으로 배열되어 있으며 서로 상보적인 스위치 동작을 한다. 즉 하나의 스위치가 온이면 다른 하나는 오프이다.

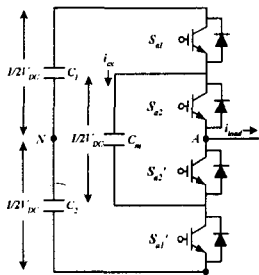


그림 1 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 한 레그에 대한 회로도

Fig. 1 A leg circuit of 3-level flying capacitor inverter

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

Table I The output leg voltage for the switch state and the switch sequence of 3-level flying capacitor inverter

Output Voltage(V_{AN})	Switch State	Switch Sequence	
		S_{a1}	S_{a2}
$V_{dc}/2$	P	1	1
0	O_1	1	0
	O_2	0	1
$-V_{dc}/2$	N	0	0

3. CRPWM 방법의 고찰

3.1 플라잉 커패시터 전압 균형을 위한 캐리어 재배치 방법

CRPWM 방법은 캐스캐이드 멀티-레벨 인버터에서 스위치의 효과적인 이용으로부터 기원하였다. 또한, 이 방법은 PDPWM 방법과 같이 동위상으로 캐리어를 배치하는 것이다. 모든 스위치의 스위칭 주파수는 같고, 리던던시는 한 주기동안 교대로 사용된다. 플라잉 커패시터 인버터와 캐스캐이드 인버터는 같은 리던던시를 가진다. 그러므로 CRPWM 방법은 플라잉 커패시터 인버터에 적용시킬 수 있다.

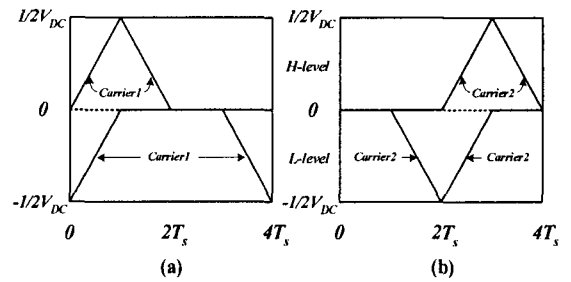


그림 2 CRPWM 캐리어 (a) Sa1 캐리어 (b) Sa2 캐리어
Fig. 2 Carriers for CRPWM (a) Sa1 (b) Sa2

그림 2는 출력 레그 전압과 스위칭 시퀀스 사이의 관계로부터 3-레벨 인버터에서 삼각파 캐리어를 재구성하여 얻은 CRPWM 캐리어를 보여준다. 그림 2(a)는 스위치 S_{a1} 에 대한 캐리어이고 그림 2(b)는 스위치 S_{a2} 에 대한 캐리어이다. 각 스위치들이 항상 $2(N-1)T_s$ 동안 한 번씩 온과 오프를 하기 때문에 N레벨의 경우 전체적으로 $(N-1)$ 번의 온과 오프가 발생한다. 따라서 $2(N-1)T_s$ 동안 $(N-1)$ 번의 온과 오프가 발생하므로 평균적으로 T_s 동안 한 번의 온 또는 오프가 일어나게 되며 이는 삼각파 캐리어를 사용했을 때와 동일하다. 3-레벨인 경우 CRPWM 방법의 캐리어들은 그림 2에서 보여진 것처럼 기준 전압의 크기에 따라 $2T_s$ 이동 관계에 있다. 그러나 CRPWM 방법은 플라잉 커패시터 전압의 변동을 야기하는 다음과 같은 문제를 고려하지 않았다.

4. 플라잉 커패시터 전압 균형을 위한 두 가지 조건

4.1 전압 균형을 위한 첫 번째 조건

플라잉 커패시터 인버터의 각 밴드에서 캐리어들의 사용이 스위칭 주기의 반주기 동안 균형 있게 사용되어야 한다.

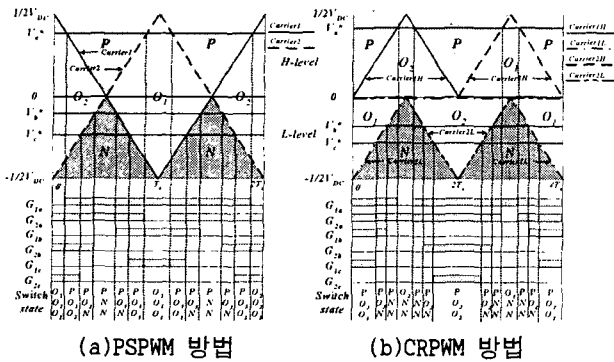


그림 3 PWM 방법의 비교

Fig. 3 Comparison of PWM methods

그림 3은 3-레벨에서 phase-shift PWM 방법과 CRPWM 방법을 비교하기 위해 3상에 대한 기준전압, 캐리어, 게이트 인가신호, 스위치 상태들을 나타낸 그림이다. 여기서 V_a^* , V_b^* , V_c^* 는 기준전압이다. 기준전압 V_a^* 가 H-레벨에 위치하고 나머지는 L-레벨에 위치할 때, 그림 3(a)에서 캐리어1과 캐리어2의 사용이 플라잉 커패시터 전압의 균형을 이루는 PSPWM 방법처럼 T_s 동안 O_1 , O_2 의 같은 스위치 상태의 인가 시간을 가진다. CRPWM 방법인 3(b)에서 기준전압이 L-레벨에 위치할 때 캐리어1과 캐리어2의 사용은 $2T_s$ 동안 캐리어의 이용이 균형을 이룬다. 그러나, H-레벨에서는 캐리어1H와 캐리어2H의 사용은 균형을 이루지 못한다. 다시 말해, 전압 리턴던시 O_1 , O_2 는 L-레벨에서는 균형 있게 적용되나 H-레벨에서는 $2T_s$ 동안 단지 하나의 스위치 상태가 적용이 됨을 의미한다. 예를 들어, 기준전압이 V_b^* 가 L-레벨에서 만들어내는 두 개의 게이트신호 G_{1b} , G_{2b} 는 $2T_s$ 동안 $O_1-O_1-N-N-N-O_2-O_2$ 가 된다. 유사하게 V_c^* 는 $O_1-N-N-N-N-N-O_2$ 의 연속적인 게이트 신호를 가진다. 이 두 가지의 경우 O_1 의 충전시간과 O_2 의 방전시간은 같다. 그러나 기준전압 V_a^* 가 H-레벨에 위치하면 그때의 연속적인 게이트 신호는 $2T_s$ 동안 P-P-P- O_1 -P-P-P이다. 결과적으로 H-레벨에서 캐리어들은 스위칭 주기의 반주기 동안 충전 또는 방전 상태만을 유지한다. 그것은 3-레벨에서 기준전압이 반주기 동안 H-레벨에 위치 시 나중상태가 충전 또는 방전으로 끝남을 의미한다. H-레벨에서 최종 상태에 따라 플라잉 커패시터 전압이 변동을 한다.

4.2 전압 균형을 위한 두 번째 조건

일반적으로, 인버터는 유도성 부하로써 같은 전압 레벨인 경우 부하 전류의 방향이 변하는 것을 야기한다. 그러므로, 전류의 변화에 따라 스위치 상태의 변동을 고려해야 한다.

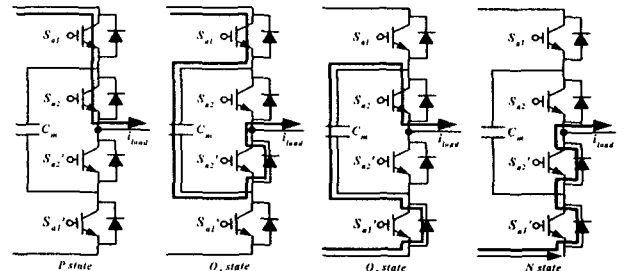
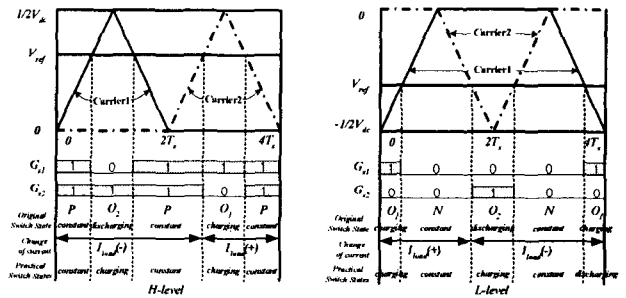


그림 4 스위치상태를 고려한 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 전류 방향

Fig. 4 Current path in 3-level flying capacitor inverter considering the switching state

그림 4는 각각의 스위치 상태에 따른 플라잉 커패시터 인버터의 전류의 방향을 보여준다. P, N 상태에서 부하는 직접적으로 DC 링크와 연결되어 있고, 이 상태는 플라잉 커패시터 전압에 영향을 주지 않는다. O_1 , O_2 상태에서는 부하전류는 플라잉 커패시터 C_m 으로 흐른다. 부하전류가 부하 쪽으로 흐른다고 가정하면 O_1 상태는 플라잉 커패시터를 충전시키고 O_2 상태는 방전시킨다. 만약, 부하전류의 변화가 반대로 변하면 스위치 상태는 반대로 방전 상태와 충전 상태로 변하게 된다.



(a) 기준 전압이 영보다 큰 경우 (b) 기준 전압이 영보다 작은 경우

그림 5 전류 변화를 고려한 실제 스위칭 상태

Fig. 5 Practical switching states according to the current change in the 3-level

만약 그림 5에서 보여진 것처럼 충·방전 상태가 H-레벨과 L-레벨에서 변한다면 초기의 스위치 상태가 전류의 변화를 고려한 실제적인 스위치 상태로 변하게 된다. 그림 5(a)의 H-레벨에서 실제적인 스위치 상태는 항상 충전 상태이다. 즉, P- O_2 (방전)-P- O_1 (충전)-P의 초기상태에서 플라잉 커패시터 전압의 증가를 발생하는 P- O_2 (충전)-P- O_1 (충전)-P 상태로 된다. 이러한 상황은 부하전류의 방향이 매 기본과 주파수가 변할 때 발생한다. 그러므로, 플라잉 커패시터 전압의 변동은 전류가 변화하는 시점과 그때의 스위치 상태에 의존한다. 유사하게 그림 5(b)에서는 O_1 (충전)-N- O_2 (방전)-N- O_1 (충전) 상태에서 실제적 스위치 상태는

O_1 (충전)- N - O_2 (충전)- N - O_1 (방전)이 된다. L-레벨에서는 처음 $2T_s$ 동안 적은 플라잉 커패시터 전압의 변동을 가진다. 그러나 그 변동량은 전류의 값이 거의 영에 가까우므로 무시할 수 있다. 그리고 다음 $2T_s$ 에서 충·방전량이 같아진다. 그 결과로써, 다음의 두 가지 요인이 CRPWM 방법에서 플라잉 커패시터 전압의 불균형을 발생한다. 첫째는, 캐리어의 균형적인 이용이 H-레벨에서는 이루지 못한다. 두 번째는, 부하전류의 변화가 실제 스위치 상태를 변화시킨다.

5. 플라잉 커패시터 전압균형을 위한 제안된 대칭 캐리어 기법

플라잉 커패시터 인버터는 커패시터 전압의 안정성을 이루기 위해 스위칭 주기동안 충전시간과 방전시간이 같은 스위칭 패턴이 요구된다. PSPWM 방법이 가장 좋은 해결책이나 고조파 특성에서는 단점을 가지고 있다. 반면에, CRPWM 방법은 이전에 언급한 문제점들이 있으나 고조파 측면에서는 PSPWM 방법보다는 우수하다. 만약 CRPWM 방법이 변동하는 플라잉 커패시터 전압을 보상할 수 있다면 플라잉 커패시터 인버터에 적용할 수 있는 좋은 다른 방법이다.

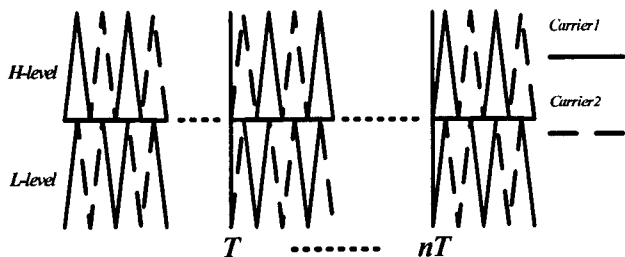


그림 6 CRPWM 방법의 대칭 캐리어 기법
Fig. 6 Symmetric carrier method of CRPWM

그림 6은 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터인 경우에 제안된 방법을 위한 PWM 기법을 보여준다. CRPWM 방법의 캐리어들을 사용하고 각각의 전압 레벨은 캐리어1과 캐리어2로 구성되었다. 그러므로 CRPWM 방법의 특성을 유지한다. 그러나 제안된 방법과의 차이는 그림 6에서 보여진 것처럼 기준전압의 매 기본과 주기동안 대칭적으로 캐리어들을 배치하는 것이다. 다시 말해, 기본과 주기인 T시간까지는 캐리어1과 캐리어2를 사용하고 다음 T시간에는 캐리어1과 캐리어2의 위치가 변한다. 변화된 캐리어들은 앞에서 언급한 두 가지 문제로 인한 기본과 주기동안 변동된 전압량을 다음 주기동안 반대의 전압량으로 보상하는 스위치 상태의 전환을 의미한다. 게다가, 출력 파형은 매 기본과 주기동안 캐리어들을 대칭적으로 배치하는 것이 같은 출력전압을

만드는 리던던시의 변화를 의미하므로 CRPWM 방법과 같은 고조파 특성을 가진다. 수정된 CRPWM 방법은 고조파 측면에서 장점을 유지하면서 적은 범위에서 플라잉 커패시터 전압 리플을 제한한다. 제안된 방법은 간단하며 멀티-레벨로의 확장이 용이하다.

6. 실험 결과

제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터 원형을 3상 인덕션 (2HP-220V)모터에 적용하였다. TMS320C31 DSP 보드를 이용하여 제어하였고 전력 소자로써 CM100DY-6H를 사용되었다. 모터를 구동하기 위해서 v/f 제어를 수행하였으며 출력 주파수는 30[Hz]이다. DC-링크 커패시터는 8200[μ F]이고, 플라잉 커패시터는 2200[μ F]이다. 스위칭 주파수는 2[kHz]이고 총 DC-링크 전압은 200[V], 변조지수는 0.75이다. 그림 7은 플라잉 커패시터 전압, 레그 전압, 선간 전압, 부하전류를 각각 보여준다. 그림 7(a)는 리던던시를 고려하지 않은 NPC PWM 방법이며, 7(b)는 CRPWM 방법, 7(c)는 PSPWM 방법, 7(d)는 제안된 CRPWM 방법이다. 그림 8은 그림 7과 같은 각 방법에서 각 상의 플라잉 커패시터 전압을 보여준다. 그림 7과 8에서 수정한 제안된 방법이 다른 방법보다 출력 선간 전압과 고조파 측면에서 가장 우수함을 보여준다. 게다가, 적은 리플을 가지고 플라잉 커패시터 전압 변동을 제어할 수 있다.

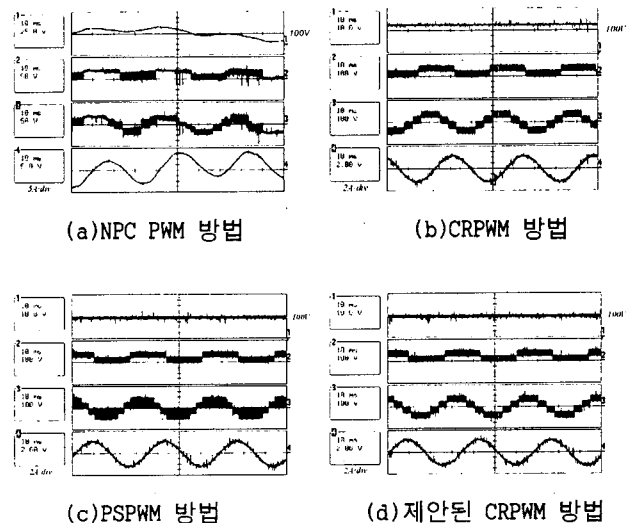


그림 7 3-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 플라잉 커패시터 전압, 레그 전압, 선간 전압, 부하전류
Fig. 7 Flying capacitor voltage, leg voltage, line-to-line voltage, and load current in 3-level flying capacitor inverter

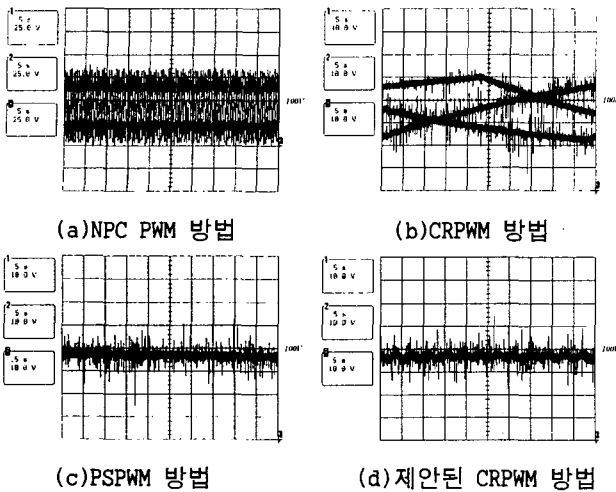


그림 8 각 상의 플라잉 커패시터 전압
Fig. 8 Flying capacitor voltages for each phase

7. 결 론

본 논문은 멀티-레벨 플라잉 커패시터 인버터의 플라잉 커패시터의 전압 균형을 이루기 위한 간단한 대칭 캐리어 기법을 보여준다. CRPWM 방법을 기준으로 그 문제점을 보상하였다. 일반적으로, 플라잉 커패시터의 전압 균형을 이루기 위하여 캐리어의 이용이 스위칭 주기의 반주기 동안 균형을 이루어야 한다. 그러나, CRPWM 방법은 캐리어의 불균형적인 사용과 부하 전류의 변화 때문에 플라잉 커패시터 전압의 변동을 발생한다. 제안된 방법은 매 기본과 주기동안 대칭적으로 캐리어를 배치하는 것이다. 그러므로 작은 리플과 출력전압의 최소의 고조파 성분으로 플라잉 커패시터 전압을 제어하며 멀티-레벨로의 확장이 용이하다. 실험으로써 제안된 방법의 우수성을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] C. Hochgraf, R. Lasseter, D. Divan, T. Lipo, "Comparison of multilevel inverters for static Var compensation", in *Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu Conf.*, vol. 2, pp. 921-928, 1994.
- [2] T. A. Meynard, 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.
- [3] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng, "Multilevel inverter: a survey of topologies, controls, and applications", *IEEE Trans. on Industrial Electronics.*, vol. 49, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [4] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral-point-clamped PWM Inverter", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 17, No. 5, pp. 518-523, 1981.
- [5] Gasulla-Fomer, M.; Jordana-Barnils, J.; Pallas-Areny, R.; Torrents, J. M., "The floating capacitor as a differential building block", *IEEE Trans. on instrumentation and measurement.*, vol. 47, Issue. 1, Feb. 1998.
- [6] Newton, C.; Summer, M., "Multi-level converter a real solution to medium/high-voltage drives"? *Power Engineering Journal*, vol. 12, Issue. 1, Feb. 1998.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 Redundancies for Generalized Cascaded Multilevel Inverter Topology", *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol. 18, no. 1, pp. 180-187, Jan. 2003.
- [10] Y. Liang, C. O. Nwankpa, "A Power Line Conditioner Based on Flying capacitor multilevel Voltage Source Converter with Phase Shift SPWM", *IEEE Trans. on Industry Applications.*, vol. 36, Issue. 4, pp. 965-971, Aug. 2000.