

## 회생능력을 가지는 7-레벨 고압인버터 시스템

김광섭, 방상석, 권병기, 문상호, 양병훈, 이명준, 최창호  
(주)포스콘 기술연구소

### 7-Level Medium Voltage Inverter System with PWM Converter for Regenerating Operation

Kwang-Seob Kim, Sang-Suk Bang, Byung-Ki Kwon, Sang-Ho Moon, Byung-Hun Yang,  
Myung-Jun Lee, Chang-Ho Choi  
POSCON CORPORATION R & D Center

#### ABSTRACT

We introduce 2[MVA] 3300[V] 7-level voltage source inverter system developed by POSCON and describe the main characteristics of inverter system, i.e. PWM converter, H-bridge power module, phase shifted carrier PWM. The PWM converter is a three-phase boost converter, which operates in a 4-quadrant and in a nearly unit displacement power factor. Experimental waveforms are also presented to verify the proposed method and performance of the developed system.

#### 1. 서 론

최근 산업설비의 대용량화 추세와 고압화에 따라 고압 대용량 인버터 시스템에 대한 수요가 증가하고 있으며, 전력용 반도체 소자의 제한된 정격을 극복할 수 있는 멀티레벨 토폴로지에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 멀티레벨 인버터는 neutral point clamped(NPC) type, H-bridge cascaded type, flying capacitor(FC) type으로 나눌 수 있다. NPC type 멀티레벨 인버터는 소자를 직렬 연결한 구조이지만 clamping diode가 소자간 차단전압의 불균형을 구조적으로 해소해 주는 장점이 있다. 3-레벨 인버터에 대해서는 전압 불균형을 해소하면서 고조파를 저감하는 PWM 방식들이 많이 개발되어 있다. 하지만 5-레벨 이상에는 clamping diode의 전압정격이 높아지고 커패시터 전압불균형 제어가 어렵고 space vector pulse width modulation(SVPWM)이 복잡해지는 단점이 있다. FC type 멀티레벨 인버터는 커패시터 전압 불균형이 없고 상전압 출력에 redundancy가 존재하므로 스위치 선택 자유도가 크다는 장점이 있지만 대용량의 커패시터와 서로 다른 크기의 절연된 입력 단 변압기를 필요로 한다. H-bridge cascaded type 멀티레벨 인버터는 독립된 같은 크기의 입력 변압기가 필요하지만 clamping diode나 대용량의 flying capacitor가 필요 없고 모듈화가 쉬워 멀티레벨로 확장이 용이한 장점이 있다<sup>[1]</sup>.

멀티레벨 인버터를 제어하기 위한 PWM 방식들이 다양하게 제안되었으며, 크게 carrier-based PWM 방식과 SVPWM 방식으로 나눌 수 있다. NPC 3-레벨 인버터는 커패시터 전압 불균형을 해소시키면서 출력 고조파를 줄이기 위한 SVPWM 방식들이 다양하게 구현되었다. 하지만 5-레벨 이상이 되면 너무 복

잡해져서 구현하기가 매우 어렵다. Carrier-based PWM 방식은 phase disposition PWM(PDPWM), phase shifted carrier PWM(PSCPWM) 등과 같이 carrier나 지령값의 위상을 변화시켜 출력 고조파 특성을 높이거나 carrier redistribution PWM(CRPWM) 방식과 같이 스위칭 주파수와 소비전력을 동일하게 제어하여 소자 이용율을 높이는 방식 등 다양하게 제안되어 왔다<sup>[3,4]</sup>.

멀티레벨 인버터의 입력단에 3상 다이오드 정류기를 사용하는 경우에는 위상차를 가지는 다펄스 변압기를 같이 사용하여 입력단 고조파를 크게 저감시킬 수 있어 많이 사용되고 있다. 하지만 단방향성을 가지는 다이오드 정류기로 인해 부하에서 회생되는 에너지를 전원으로 되돌릴 수 없다. 다이오드 정류기를 대신해 단상 컨버터, 3상 PWM 컨버터, H-bridge와 커패시터 등을 이용하여 회생 능력을 가지는 멀티레벨 토폴로지도 제안되었다. 단상 컨버터나 H-bridge와 커패시터를 이용하는 토폴로지는 소자수를 줄이고 입력 변압기를 간단하게 만들 수 있지만 전압변동이 심해서 대용량의 커패시터를 필요로 한다<sup>[2]</sup>.

#### 2. 본 론

##### 2.1 7-레벨 고압 인버터 시스템 구성

7-레벨 고압 인버터 시스템은 주변압기, PWM 컨버터, H-Bridge cascaded 인버터, 제어기로 구성되어 있으며, 그림1에 7-레벨 고압 인버터 시스템 구성도를 나타내었다. 주변압기는 2[MVA], 3300[V] 건식 변압기로 9개의 절연된 2차측 출력을 가지고 있다. 독립된 모듈 제어를 가지고 있는 승압형 3상 PWM 컨버터는 주변압기 2차측 출력에 연결되어 있으며 단위 역률 제어를 수행하고 각 인버터 모듈에 독립된 DC 전원을 공급하고 있다. 인버터는 9개의 단상 인버터로 구성되어 있고 한 상은 3개의 모듈이 직렬 연결된 구조를 가지며, 주제어기와 controller area network(CAN) 통신을 통해 출력전압 지령값을 받아 PWM을 수행한다. 제어기간에는 광통신을 이용하여 노이즈에 대한 영향을 차단하고, 제어기 전원은 정전 등과 같은 전원 고장 시에도 영향을 받지 않도록 설계하였다. 사용자의 친숙한 조작과 원거리 감시를 위한 human machine interface와 web-기반 감시 시스템 및 상위 제어기와 통신을 위해 Profibus-DP, DeviceNet이 장착되어 있다. 그림2에 제작된 시스템의 외관을 나타내었다.

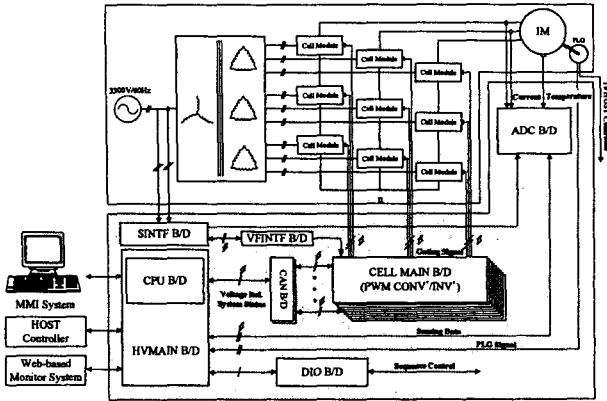


그림 1 7-레벨 고압 인버터 시스템 구성도

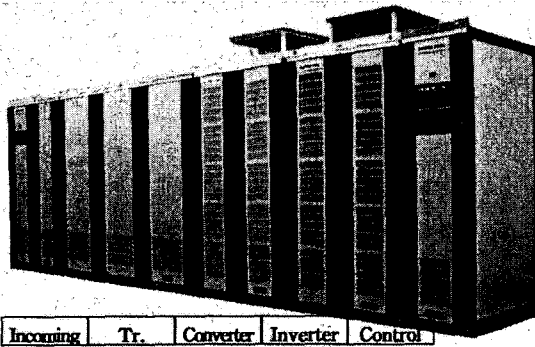


그림 2 7-레벨 고압 인버터 시스템 외관

## 2.2 제어 알고리즘

### 2.2.1 제어 시스템

주제어기는 floating-point 연산이 가능한 TI사의 TMS320VC33-150 DSP로 구현하였으며, 인터페이스를 위한 확장보드로 외부의 접점 입력력 기능을 위한 DIO 보드와 전동기의 속도를 검출하기 위한 PLG 보드가 있다. 입력전압 감시를 위한 SINTF 보드는 입력전압과 전류를 검출하여 ADC 보드로 입력한다. ADC 보드는 입력전압, 입력전류 및 인버터 출력전류를 검출하고 디지털 값으로 변환한 후 직렬 광통신을 이용해 주제어기로 전송한다. 주제어기는 제어 알고리즘을 수행하고 출력전압 지령값을 CAN 통신으로 인버터의 각 모듈 제어기에 보내준다. CAN통신은 전기적 절연과 내노이즈성을 고려하여 광통신으로 구현하였다.

모듈 제어기는 32-bit fixed-point 연산이 가능한 TI사의 TMS320F2812 DSP로 구현하였으며, 주제어기로부터 출력전압 지령값을 받아 DC-링크 전압을 이용하여 PWM을 직접 수행하고 셀의 정보를 주제어기로 전송한다.

### 2.2.2 PWM 컨버터 제어 알고리즘

입력 전압을 주파수로 변환하고 광통신으로 각 셀에 동일하게 분배한 후 각 셀에서는 주파수를 전압으로 변환하였으며, 광통신을 이용하여 절연을 확보하면서 노이즈에 대한 영향을 배제시켰다. 제어기는 검출된 입력전압과 일치시킨 동기 좌표계에서 전류제어를 수행하고 D축 전류를 0으로 제어하여 단위 역률 제어를 구현하였다.

PWM 컨버터의 스위칭 주파수는 2[kHz]이며, 9개의 컨버터 간에  $40(=360[\text{도}]/9[\text{cell}])$ 도 위상차를 주어 변압기 1차측에는 9개의 컨버터 출력전압이 합성되어 나타나게 되므로 전원으로

유입되는 고조파를 크게 줄였다. 인버터 제어기의 출력 지령값을 이용하여 컨버터 전류 제어기 지령값에 전향 보상함으로써 급격한 부하 변동시에도 빠른 응답성을 확보하고 무효전력을 컨버터에서 흡수하여 커패시터를 크게 줄이면서 우수한 전압 제어 특성을 가지도록 하였다.

### 2.2.3 7-레벨 PWM 알고리즘

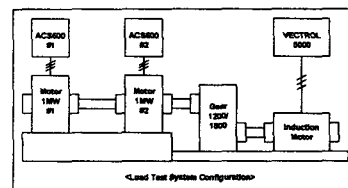
앞에서 언급한 바와 같이 멀티레벨 인버터를 제어하기 위한 PWM 방식은 다양하게 있으며, 상대적으로 구현이 간단하면서 동일한 스위칭 주파수와 전력소비를 갖게 되므로 동일한 형태의 셀 모듈을 사용할 수 있는 장점을 지니고 있고 고조파 특성이 우수한 PSCPWM 방식을 사용하였다. PSCPWM은 단상 인버터 모듈의 두 상에 대한 지령값이 서로 180도 위상차를 가진다. 캐리어간에는  $180/N$ 도의 위상차를 가지도록 하며, 7-레벨 인버터의 경우  $60(=180/3)$ 도의 위상차를 가진다. N은 멀티레벨 인버터의 한 상을 구성하는 단상 인버터 모듈의 개수를 나타낸다. 이 경우 단상 인버터 모듈의 출력은 3-레벨이 되며 출력전압은 각 모듈의 스위칭 주파수가 합성되어 나타나게 되며, 모든 캐리어 주파수와 side-band 고조파들이 상쇄되고  $2*N$ 캐리어 주파수에 해당하는 고조파부터 나타나게 된다.

### 2.2.4 유도전동기 벡터 제어 알고리즘

유도 전동기의 순시 토크 제어 및 속도 제어를 위해 회전자자속 기준 벡터 제어 알고리즘을 사용하였다.

## 2.3 7-레벨 인버터 시스템 시험결과

한국전기연구원에서 2[MW] 전동기 부하시험 설비를 이용하여 성능시험을 하였다. 부하 시험용 전동기는 1[MW], 440[V], 4[pole] 유도전동기 2대를 기계적으로 직렬 연결한 구조이며 구동 드라이브는 ABB사의 ACS600이다. 부하 전동기는 3300[V], 6[pole], 60[Hz] 유도전동기를 사용하였으며, 1200/1800[rpm] 감속기를 이용하여 부하 시험용 전동기에 연결하였다. 그림3에 부하시험 설비의 구성도를 나타내었다.

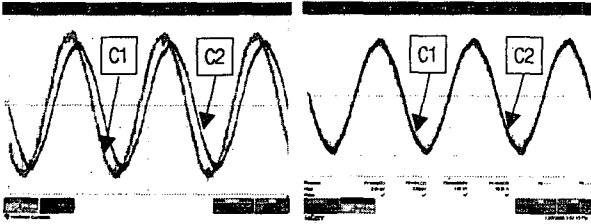


(a) 시험 설비 구성도

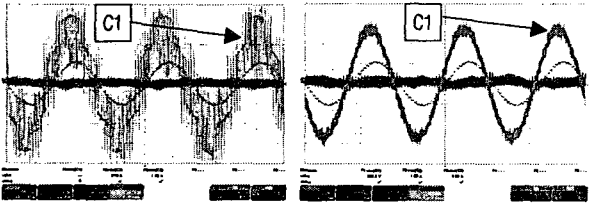
(b) 시험 설비 외관

그림 3 2[MW] 전동기 부하시험 설비 구성도

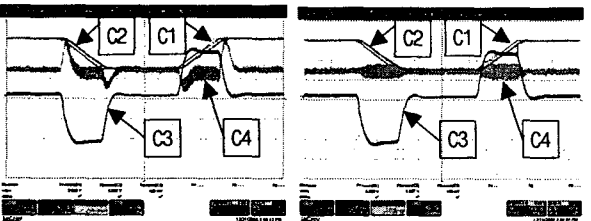
그림 4의 (a)는 입력측 PT 2차측 선간 전압 파형과 입력 상 전류 파형이며, (b)는 입력단 U상 전압과 전류파형으로 PWM 컨버터가 역률을 1로 제어하고 있음을 보여주고 있다. 그림5는 PWM 컨버터간 위상차를 준 시험파형이며, (a)는 컨버터간에 동일한 위상을 가지는 경우이고 (b)는 컨버터간 40도 위상차를 가지는 경우의 입력 선간전압 파형으로 전압 고조파가 현저히 감소되었음을 알 수 있다. 그림 6은 급격한 부하 가변시 컨버터 DC-링크 전압파형이다. (a)는 일반 PI제어기를 사용한 경우이며 가감속시 DC-링크 전압의 변동이 심하게 나타나고 있다. (b)는 동일한 부하조건에서 전향보상을 한 경우이며 부하 변동시에도 급격한 전압변동 없이 제어가 잘 되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 선간전압 및 전류파형 (b) 상전압 및 전류파형  
 그림 4 입력전압 및 전류파형 (a) C1(155[V/div]), C2(200[A/div]) (b) C1(1[kV/div]), C2(200[A/div])



(a) 위상차 없는 경우 (b) 위상차가 있는 경우  
 그림 5 PWM 컨버터간 위상차에 따른 입력파형, C1(1500[V/div])



(a) 전항보상 하지 않은 경우 (b) 전항보상 한 경우  
 그림 6 전항보상 시험파형, C1-속도지령(400[rpm/div]), C2-전동기속도(400[rpm/div]), C3-토크전류(100[A/div]), C4-DC링크전압(50[V/div])

그림7은 출력 상전압(C1,C2)과 선간전압(C3=C1-C2) 파형을 보여주고 있다. 상전압은 전동기 단자와 프레임간 전압이다.

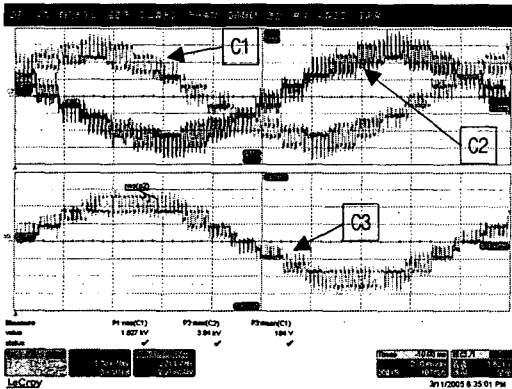
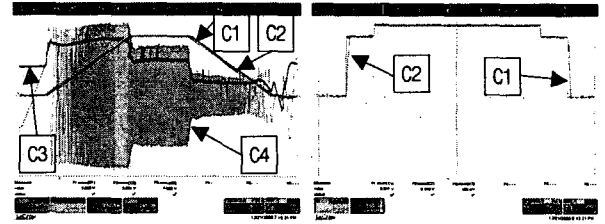
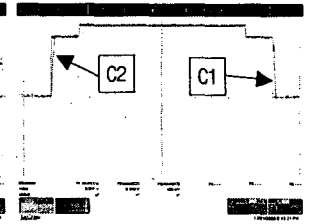


그림 7 인버터 출력전압 파형, C1-U상전압(1[kV/div]), C2-V상전압(1[kV/div]), C3-UV선간전압(2[kV/div])

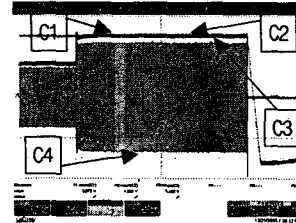
JEM1157의 압연기용 전동기중에서 제2종 전동기의 특성 및 성능검증을 위해 시험을 수행하였다. 그림8 (a)는 정격부하 조건에서 가감속 시간이 6[초]일 때 시험파형이며 (b)는 120% 과속도(1440[rpm]) 시험파형이다. (c)는 175%와 200% 과부하 시험파형이며, (d)는 영속도 제어특성으로 slip주파수의 전류가 흐르고 속도는 0으로 유지되어 우수한 성능을 보여 주고 있다.



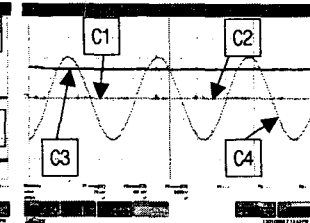
(a) 가감속 시험



(b) 과속도 시험



(c) 과부하 시험



(d) 영속도 시험

그림 8 전동기 특성 시험, C1-속도지령(400[rpm/div]), C2-전동기속도(400[rpm/div]), C3-토크(10,000[Nm/div]), C4-U상전류(200[A/div])

### 3. 결론

개발된 3300[V]/2[MVA] 7-레벨 고압 인버터 시스템은 3상 PWM 컨버터를 채택하여 단위 역률 제어 및 4상한 운전이 가능하다. 전항보상 알고리즘을 적용하여 커패시터를 줄이면서 시스템의 응답성을 높였으며, 컨버터간 위상차를 가지도록 하여 전원 고조파를 최소화하였다. 2[MW]급 전동기 부하시험 장치를 구비한 한국전기연구원에서 부하시험과 시스템 성능시험을 수행하였으며, 시험파형과 결과자료를 통해 제품의 성능과 신뢰성을 확인하였다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 에너지자원기술개발 사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] Jose Rodriguez et al, "Multilevel Inverters : A Survey of Topologies, Controls, and Applications", IEEE Trans. On Industry Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, August 2002.
- [2] Jose Rodriguez et al., "High-Voltage Multilevel Converter With Regeneration Capability", IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 839-846, August 2002.
- [3] Brendan Peter McGrath et al., "Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters", IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 858-867, August 2002.
- [4] Dae-Wook Kang et al., "An Improved Carrier-Based SVPWM Method Using Leg Voltage Redundancies in Generalized Cascaded Multilevel Inverter Topology", IEEE Trans. On POWER ELECTRONICS, vol. 18, no. 1, pp. 180-187, January 2003.