

## CAN통신을 이용한 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 PWM 동기화 및 위상전이 방법

박영민 · 유한승 · 장성영 · 이현원 · 이세현 · 서광덕  
현대중공업 기계전기연구소 전력변환연구실

### PWM Synchronization and Phase-Shift Method using CAN Communication in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter

Y.M.Park, H.S.Yoo, S.Y.Jang, H.W.Lee, S.H.Lee and K.D.Seo  
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

#### Abstract

H-브릿지 멀티레벨 인버터는 여러 개의 단상 Power Cell을 직렬로 연결함으로써 저전압 전력용 반도체를 사용하여 고전압을 얻을 수 있고, 정현파에 가까운 출력전압 파형을 얻을 수 있는 멀티레벨 인버터 토폴로지이다. 본 토폴로지는 출력전압 레벨에 비례하여 Power Cell의 수가 증가하므로, 제어기기의 연산능력에 대한 부담증가와 신호선의 많아지는 단점이 있다. 따라서 Power Cell제어를 직접적인 PWM 신호가 아닌 통신을 사용함으로써 이러한 단점을 극복할 수 있으며, 신뢰성 측면이나 보수/유지 측면에서도 유리하다. 본 논문은 산업현장에서 신뢰성을 인정받아 많이 사용되고 있는 직렬통신 방식의 일종인 CAN통신 인터럽터를 이용한 H-브릿지 멀티레벨 인버터 Power Cell의 PWM 동기화 및 위상전이 방법에 관한 것이다. 제안된 방법의 주요 장점은 제어기와 셀 제어기 사이에 직렬통신(CAN)을 사용함으로써 제어기와 셀 제어기의 신호선의 단순화, 제어기기의 부담 감소, Power Cell의 모듈화, 셀 단위의 보호동작 용이, 확장성 향상 그리고 제어 신호 및 Power Cell의 신뢰성을 향상에 있다. 13레벨로 구성된 H-브릿지 멀티레벨 인버터 시험을 통해 제안된 방법의 타당성과 신뢰성을 입증하였다.

#### 1. 서 론

H-브릿지 멀티레벨 인버터의 각 상은 직렬 접속된 여러 개의 Power Cell로 구성된다. 각 Power Cell은 독립된 단상 인버터 구조이며 여러 개의 Power Cell을 직렬로 연결함으로써 저전압 Power Cell, 즉 저전압 전력용 반도체를 사용하여 고전압을 얻을 수 있고, 또한 Power Cell의 수에 따라 출력 전압 레벨의 수가 증가하여 정현파에 가까운 전압 파형을 얻을 수 있다. 전원 계통과 연결된 입력부는 2차측이 지그재그 또는 확장 델타 결선방법의 여

러 개의 탭을 갖는 변압기로 연결된다. 입력측 변압기는 두 가지의 용도로 사용된다. 첫번째 용도는 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 각 Power Cell에 독립된 전원을 공급하기 위함이고, 두번째 용도는 2차측 탭간에 위상차를 두어 Multi-pulse 방식의 정류기형 컨버터를 구성함으로써 기존의 6-pulse 정류 방식에 비하여 아주 낮은 입력단 THD(total harmonic distortion)를 얻기 위함이다. 일반적인 멀티레벨 방식의 인버터는 고정된 회로 방식이므로 다른 인버터 출력 전압 레벨에 대한 응용이 어렵다. 그러나 Cascaded 방식의 H-브릿지 멀티레벨 인버터는 Power Cell 수를 조정함으로써 전압 레벨을 손쉽게 바꿀 수 있어 여러 종류의 전압에도 대응할 수 있는 장점을 가져 좀 더 유연한 방식이라 할 수 있다. 또한 시스템이 동일한 Power Cell의 조합이므로 고장시 Power Cell 단위 교체가 가능하여 평균 고장 수리 시간을 수 분 이내로 짧게 할 수 있고 또한 여유분의 Power Cell만을 확보하면 되므로 여분 부품(Spare Part)에 대한 부담이 적다. Protection은 Cell 단위의 고장감시, 그리고 시스템 단위의 고장 감시 기능으로 분리하여 좀 더 신뢰성 있고 유연한 고장 감시 및 진단 기능을 구현할 수 있다. 시스템이 정지되어서는 안 되는 중요 부하의 경우는 각 셀의 출력을 bypass 시킬 수 있는 보조 스위치를 장착함으로써 고장시 고장 수리 기간동안 시스템이 정지하지 않고 전압만을 낮추어 운전할 수 있도록 하는 정격감소 운전(De-Rating Operation)이 가능하다.

이러한 면에서 Cascaded 방식의 H-브릿지 멀티레벨 인버터는 고전압 대응량에서 유리한 전력 토폴로지라고 할 수 있다. H-브릿지 멀티레벨 인버터의 구조적 특징과 입출력 특성을 요약하면 다음과 같다.

#### 구조적 특징

- 1) 독립적이고 절연된 DC Link를 갖는 단상 인버터의 직렬 연결
- 2) 전력회로의 완전한 모듈(Module)화 가능
- 3) 저압의 IGBT로 구성되기 때문에 경제적

- 4) 모듈(Module) 단위로 설계되기 때문에 전압정격 증대가 용이함 (인버터 전압별 시리즈화 용이)
- 5) 개별 Power Cell 고장 발생시에도 운전 가능 (De-Rating Operation)

**입출력 특성**

- 1) 개별 Power Cell의 PWM 위상전이(Phase Shift)를 이용한 출력의 멀티레벨화
- 2) 낮은 스위칭 주파수에서도 적은 출력 고조파
- 3) 다중 펄스 변압기를 사용함으로 입력 THD가 낮다. (입력필터 필요 없음)
- 4) 전압 Step이 여러 단계이므로 출력 THD가 낮다. (출력필터 필요 없음)
- 5) 전압반사 영향이 작기 때문에 인버터와 전동기 사이의 거리가 멀어도 설치 가능

Power Topology를 H-브릿지 멀티레벨 인버터로 할 경우 제어기는 집중제어와 분산제어 두 가지 방식으로 구성할 수 있다. 집중제어 방식은 주제어기에서 각종 신호를 입력받아 단상 인버터로 구성된 Power Cell에 PWM 신호를 보내는 것이고, 분산제어 방식은 셀마다 보조제어기가 설치되어 게이팅 신호를 만들어 내며, 셀 단위의 보호동작을 수행한다. 주제어기에서 셀 제어기 사이에는 전압 기준값, 셀 운전정보 등의 데이터 교환만 이루어지면 되므로 신호선이 간단해 지고 주제어기의 부담이 줄어든다. 하지만, 일반적인 분산제어 방법은 규격화된 통신을 이용하지 않고 PWM duty 형태로 정보를 전송함으로써 부가적인 하드웨어가 필요하고, 전송속도 및 전송량에 한계가 있으며 시스템의 신뢰성이 저하되는 단점이 있다.

본 논문은 CAN통신을 이용한 분산제어방식을 이용하며, 주제어기와 셀제어는 CAN통신 인터럽터를 이용한 H-브릿지 멀티레벨 인버터 Power Cell의 PWM 동기화 및 위상전이를 수행한다. 절연 및 신뢰성 향상을 위해 통신선은 광케이블로 구성하였다.

**2. H-브릿지 멀티레벨 인버터의 일반적인 PWM구현방법**

Power Topology를 H-브릿지 멀티레벨 인버터로 구성할 경우 제어기는 집중제어와 분산제어 두 가지 방식으로 구성할 수 있다.

**2.1 집중제어**

집중제어 방식은 각 인버터 셀에는 gating amp와 일부 보호회로만이 내장되고 모든 제어회로와 제어 동작을 주 제어기에서 수행하게 된다. 이 방식의 장점은 전체 시스템의 제어와 감시를 집중해서 하므로

일괄 제어가 간편하여지고 데이터 처리나 시퀀스 처리 등이 간단하여 진다. 반면에 주제어기의 부담이 커지고 주제어기에서 게이팅 신호를 보내야 하므로 최소 4개 이상의 신호선(신뢰성과 절연을 고려하여 광케이블)이 연결되어야 하므로 전체 신호선의 개수가 많아지는 부담이 있으며, 주제어기에서 위상지연 및 게이팅 신호를 발생하기 위한 회로가 복잡하며, Power Cell의 모듈화가 용이하지 않다는 문제점이 존재한다.

**2.2 일반적인 분산제어**

두 번째 방법은 분산제어 방식이다. 이 방식은 각각의 셀마다 보조제어기가 설치되어 게이팅 신호를 만들어 내거나 셀 단위의 보호동작을 수행한다. 셀과 주제어기 사이에는 전압/전류 기준값, 고장신호 등의 데이터 교환만 이루어지면 되므로 신호선이 간단해 지고 주제어기의 부담이 줄어든다. 또한 셀 단위의 보호동작이 용이하므로 전체 시스템의 신뢰성을 높일 수 있으며, 모듈화라는 면에 있어서 유리한 구조이다. 기존에 사용되어 온 분산제어에 대하여 자세하게 살펴보면, Console로부터 원하는 제어 지령치를 제어기에 장착되어 있는 RS-232C 직렬통신으로 받아서 이를 셀 제어기로 보내기 위하여 통신 frame으로 구성을 한 후에 EPLD 내의 PWM 로직을 사용하여 정의된 Duty cycle로 변환하여 이를 광케이블을 통하여 셀 제어기로 전송을 하게 된다. 기동 명령이 지시되면 마스터 제어기에서 지시된 커맨드에 맞도록 운전시작(Start), 출력전압 위상(Theta), 출력주파수의 크기(Frequency\_ref), 출력전압의 크기(Vac\_ref), 인버터 상태(State), 기타(Spare) 정보의 프레임의 만든 후에 이에 해당하는 PWM duty cycle로 Local controller로 광전송을 하게된다. 이때 PWM duty는 10%보다 적거나 90%보다 클 경우 오류처리 된다.

해당 data에 대한 환산치는 표1과 같다.

표 1. 기존 분산제어 방식의 PWM data 송신 예

항 목	하한치	상한치	범 위	환 산 값
Start	20	80	0 ~ 100	0, 1
Theta	20	80	0 ~ 100	0 ~ 2π
Frequency_ref	20	80	0 ~ 100	0 ~ 100Hz
Vac_ref	20	80	0 ~ 100	0 ~ 6600V
State	20	80	0 ~ 100	0, 1
Spare	20	80	0 ~ 100	

위의 값들에 대한 프레임은 그림1과 같다.

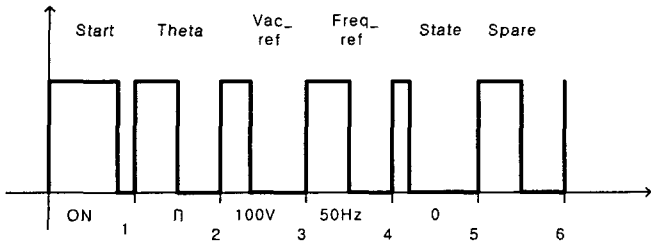


그림 1. 기존 분산제어 방식의 PWM data 프레임

상기와 같은 분산제어 방식을 적용할 경우 즉, Power Cell의 PWM을 제어하기 위해 양방향 통신 방식이 아닌 PWM 형태의 정보를 상위제어기에서 셀 제어기로 전송하는 방법은 주제어기와 셀 제어기에 PWM 발생과 수신을 위해 추가적인 하드웨어가 필요하며 양방향 통신이 어렵고 송수신 정보가 많을 경우 제품의 신뢰성을 저하시키고 주제어기와 셀 제어기 사이에 운전 및 상태정보 교환을 위해 PWM을 위한 신호선 외에 별도의 신호선이 필요한 문제점이 있다.

### 3. 제시한 분산제어:

#### CAN통신 인터럽터를 이용한 Power Cell의 PWM 동기화 및 위상전이

##### 3.1 제어기 구성 및 기능

본 시스템의 제어기는 주 제어기와 셀 제어기의 두 가지로 구성된다. 주 제어기는 전동기 가변속 제어를 위한 제어기를 내장하며 이에 필요한 전압/전류 값을 계산한다. 또한 시스템 level에서의 감시 및 진단, 모니터링, 보호, MMI, 통신, 기타 보조 기능을 수행한다. 셀 제어기는 각 셀마다 위치하며 시스템 제어기의 지령치에 따라 필요한 PWM 전압제어 및 위상제어를 하며, 또한 셀 단위의 감시 및 보호 기능을 갖는다. 주 제어기는 각 셀 제어기와 광케이블로 이루어진 고속 링크로 연결되며, 직렬통신을 이용하여 데이터를 주고받는다. 주 제어기는 고기능 DSP(TMS320C31)와 주변회로로 구성되며 셀 제어기는 주변회로 기능이 포함된 one-chip controller인 DSP(TMS320LF2406A)로 구성된다. 주 제어기와 셀 제어기의 통신은 CAN(Controller Area Network)을 이용하였다.

그림 2는 주 제어기와 셀 제어기의 기능 및 직렬통신 블록 구성도로서 주 제어기는 전동기 속도와 인버터 출력 전류를 받아들여 전동기 속도 및 전류제어를 수행한다. 전류제어기의 출력인 3상의 전압 기준값을 각 상별로 동기 맞추어서 광 케이블을 이용한 CAN 통신을 통하여 셀 제어기로 데이터를 송신한다. 셀 제어기는 Power Cell의 DC Link 전압을 센싱하며, 센싱된 전압과 주 제어기의 전압 기준값을 사용하여 PWM 신호를 만든다. Power Cell의 위상제어는 주 제어기에서 송신되어 오는 한 상당

Power Cell의 갯수, Power Cell 고장시 고장 Power Cell의 갯수 및 위치 그리고 각 Power Cell의 위치 정보를 이용한다. 표 2는 주제어기와 셀제어기 사이의 통신 간격 및 송신수 DATA의 종류를 나타낸다.

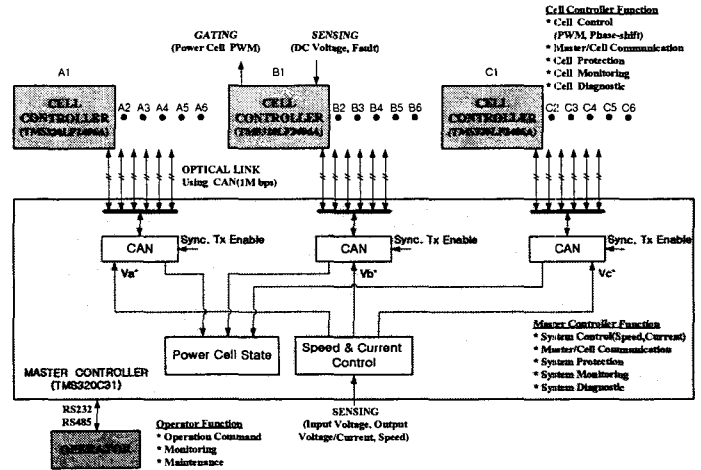


그림 2. H-브릿지 멀티레벨 인버터 제어기 구성

표 2. MASTER/CELL 송수신 DATA

Master ⇒ Cell (Interval:Sampling Time)	Cell ⇒ Master (Interval:Sampling Time*N)
1. Sequence(Run,Stop)	1. Power Cell Number
2. Voltage Reference	2. Communication Check
3. Sampling Time	3. Power Cell Fault
4. Power Cell Total Number per Phase	4. DC Link Voltage
5. Failed Power Cell Number	
6. Failed Power Cell Location	
7. Response Power Cell	

##### 3.2 Power Cell PWM 동기화 및 위상제어블록도

그림3은 6Layer 18EA로 구성된 H-브릿지 멀티레벨 인버터에 적용된 광 케이블 및 직렬통신을 이용한 Power Cell 위상제어 블록 구성도로서 주 제어기, CAN통신, 셀 제어기 그리고 Power Cell의 구성 및 기능을 나타내고 있다. 전압 지령치  $V_a^*$ ,  $V_b^*$ ,  $V_c^*$ 는 동시에 CAN통신을 이용해 주제어기에서 셀 제어기로 전달되며, 셀 제어기는 CAN통신 수신 인터럽터 신호에 동기하여 PWM 발생을 위한 내부 타이머(Timer)를 초기화 시킨다. 각 상의 1Layer는 위상지연이 없고 2Layer는 샘플링 주기의 1/6, 3Layer는 샘플링 주기의 2/6, 4Layer는 샘플링 주기의 3/6, 5Layer는 샘플링 주기의 4/6, 6Layer는 샘플링 주기의 5/6만큼 내부 타이머를 이용하여 PWM 위상을 지연시킨 후 출력을 낸다.

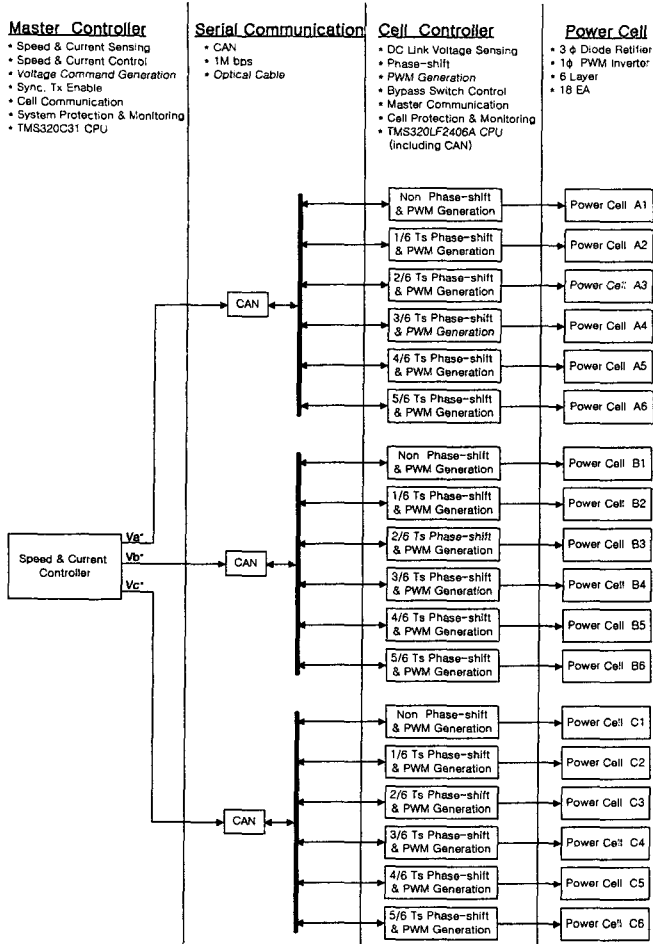


그림 3. 광 케이블과 CAN통신을 이용한 Power Cell PWM 동기화 및 위상제어 블록도

### 3.3 Power Cell PWM 동기화 및 위상전이 구현 방법

그림 4는 CAN통신 인터럽터를 이용한 6Layer H-브릿지 멀티레벨 인버터의 PWM 동기화 및 위상전이 방법에 관한 것이다. 각 Layer의 셀 제어기는 CAN Receive 인터럽터를 기준으로 위상 전이(Shift)의 기준 시점을 정하고 첫 번째 Layer에서는 위상 전이 없이 PWM을 만들고, 두 번째 Layer부터 제어기 내부 타이머를 이용하여 전이 양을 제어한다. 일반적으로 n개의 layer가 존재할 경우에는 k번째 Layer에서는  $k \cdot T_s/n$  만큼 이동하여 게이팅 시간을 인가하면 된다.

그림5는 6Layer로 구성된 A상의 각 Layer에서 Power Cell의 개별 출력전압과 출력전압 합성을 시뮬레이션을 통해 보여주고 있다. 개별 Power Cell의 출력전압은 동일한 크기의 단상 전압이나 서로 절연되어 있으며 PWM 출력전압의 위상에 차이가 있으며 직렬로 연결되어 있기 때문에 최종 출력전압의 합성은 멀티레벨 형태로 나타난다.

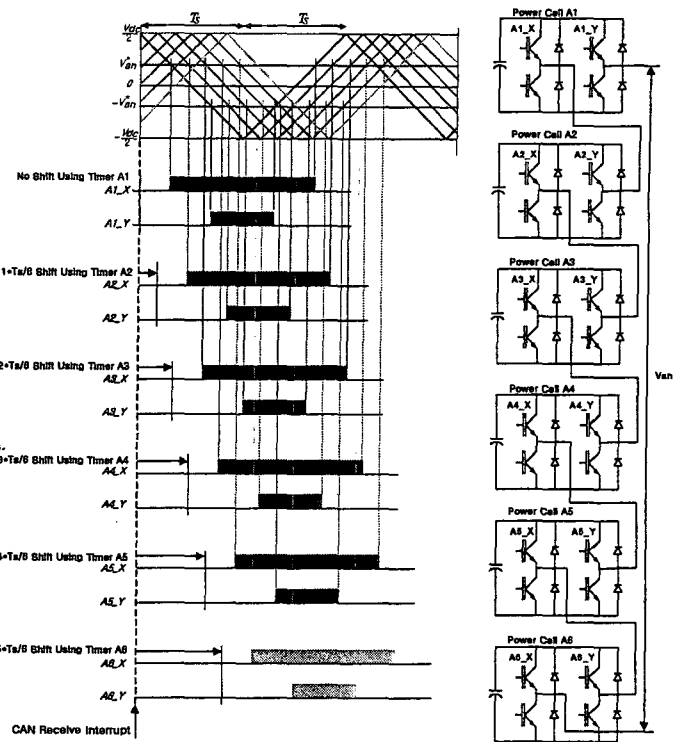


그림 4. CAN통신 인터럽터를 이용한 6Layer H-브릿지 멀티레벨 인버터 PWM 개념도

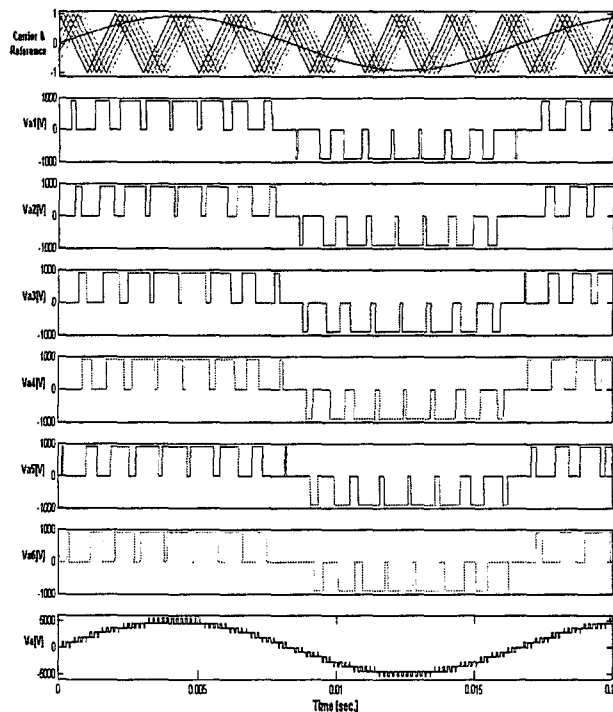


그림 5. Power Cell 출력전압 위상전이에 의한 인버터 출력전압 멀티레벨화

## 4. 시스템 구성과 시험결과

### 4.1 시스템 구성

그림 6은 6,600V 2MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터 전력회로 구성도이다. 시스템 입력측에는 전원분리와 전력 품질을 위하여 다권선 변압기가 사용되며, 변압기 1차측은 6,600V이고 2차측은 665V이다. 111kVA 635V Power Cell을 상당 6개씩 연결함으로써 18개의 구성으로 6,600V 2MVA를 출력한다. 출력 전압 Step은 상전압 기준으로 13레벨이며 전압 스텝의 크기는 898V이다.

그림 7은 개발된 제품의 정면 사진으로 패널 내부 공간을 변압기공간과 Power Cell 인버터 공간으로 분리하였다. 인버터 공간은 동일 구조 동일 용량의 Power Cell을 18개를 3상 인버터 결선이 용이하게 배치하였으며 방열판을 후면으로 배치한 후 Fan을 이용 강제 냉각시키는 구조로 설계하였다.

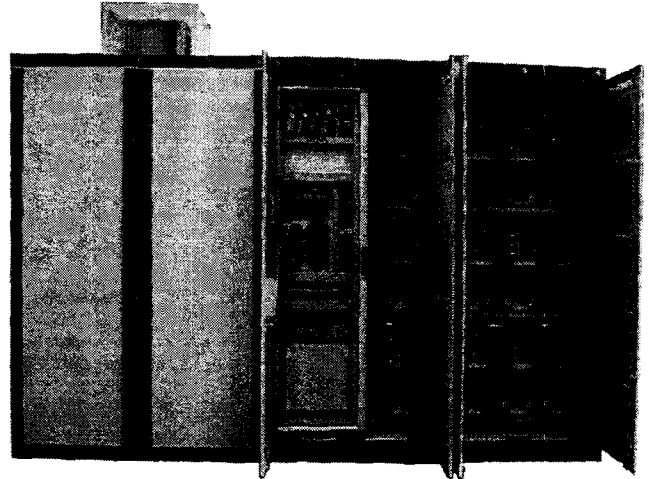


그림 7. 6,600V 2MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터

### 4.2 실험 결과

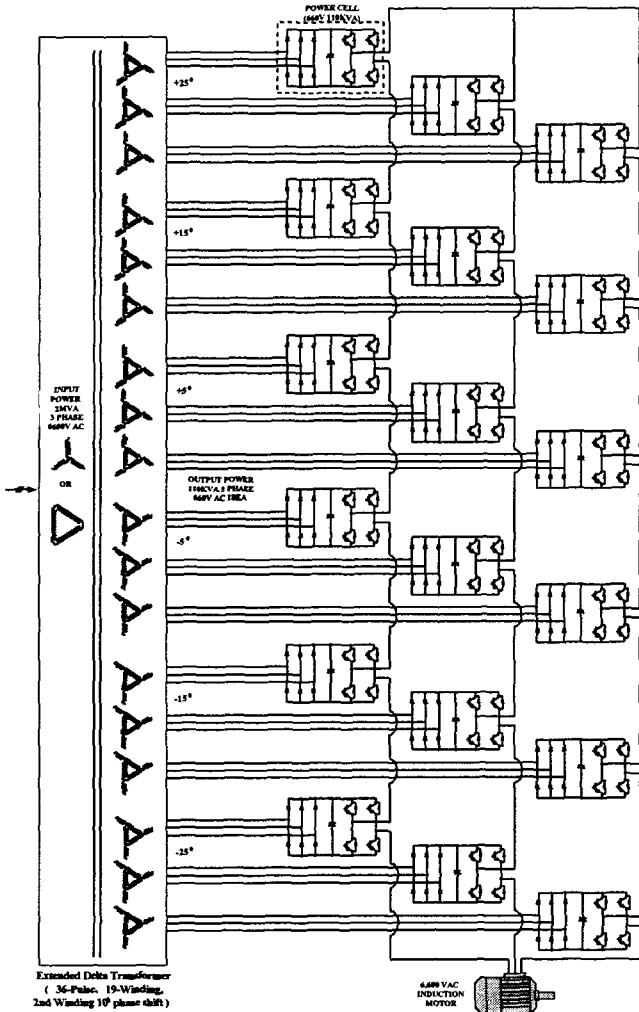


그림 6. 6Layer 18EA Power Cell로 구성된 6,600V 2MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터 구성도

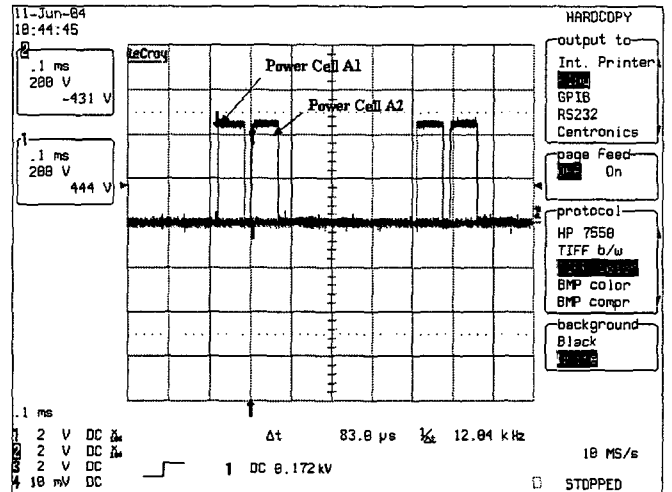


그림 8. Power Cell 위상 전이(출력전압: 200V/div.)

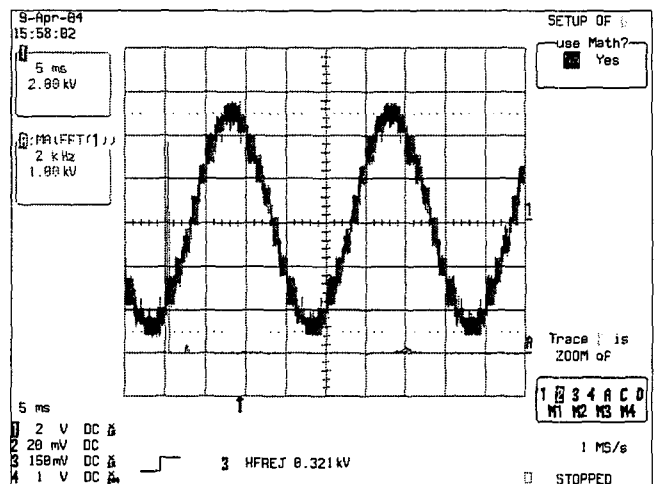


그림 9. 순간 출력전압: 3,300Vrms(2,000V/div.)

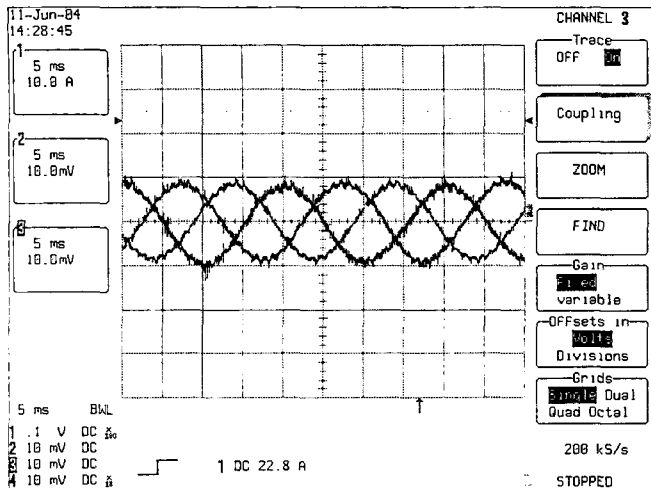


그림 10. 전동기 무부하 운전시 3상 출력전류(10A/div.)

그림 8은 본 논문에서 제안한 CAN통신 인터럽터를 이용한 Power Cell 위상전이 실험으로 Power Cell 출력전압의 위상차는 83 $\mu$ sec (Sampling Time 500 $\mu$ sec / 6Layer)이다. 그림 9는 상당 Power Cell 6개씩 18개를 3상에 연결하였을 때, Power Cell 출력전압의 위상 차이에 의해서 선간 전압 기준으로 25레벨의 멀티레벨 출력전압이 구현됨을 알 수 있다. 그림 10은 전동기 무부하 구동시 인버터 출력전류이다.

## 5. 결 론

이상에서 상세히 설명한 바와 같이 본 논문은 H-브릿지 멀티레벨 인버터 Power Cell 제어기의 CAN(Controller Area Network) Receiver Interrupt를 이용하여 각각의 Power Cell PWM을 동기화하고 Cell 제어기의 내부 타이머를 이용하여 PWM 위상을 전이 시킴으로써, 2레벨의 단상 인버터 출력을 멀티레벨화 하였다. 산업체에서 안정성이 확보된 통신 방법을 PWM Interrupt에 적용하여 제품의 신뢰성을 증가시킬 수 있었고 또한 별도의 통신선로를 추가하지 않고 PWM Interrupt에 사용된 CAN 통신선로를 이용하여 Cell 제어기와 상위 제어기 사이에 양방향 통신을 가능하게 함으로써 전체 신호선의 갯수가 많아지는 부담을 줄였다.

## 참 고 문 헌

[1] Bor-Ren Lin; Yuan-Po Chien; Hsin-Hung Lu; "Multilevel inverter with series connection of H-bridge cells", Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference, Volume: 2, pp. 859-864, 1999.

[2] Shakweh, Y.; Lewis, E.A.; "Assessment of medium voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drive applications", *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE*, Volume: 2. pp. 965-971, 1999.

[3] Peter W. Hammond, "A New Approach to Enhance Power Quality for Medium Voltage AC Drives", *IEEE Trans. on IA*, Vol. 33, No. 1, pp. 202-208, 1997, Jan/Feb.

[4] Hammond, Peter W., Hammond, "Medium voltage pwm drive and method", *United States Patent Number 5625545*, 1997. 4. 29.

[5] Ichikawa, Kosaku; Hirata, Akio; Kawakami, Kazuto; Satoh, Kazuhiro; "Multiple inverter system", *United States Patent Number 6229722*, 2001. 5. 8.

[6] Hammond, Peter W.; Aiello, Marc F.; "Multiphase power supply with plural series connected cells and failed cell bypass", *United States Patent Number 5986909*, 1999. 11. 16.