

H-브릿지 멀티레벨 인버터 개별 전력 셀 동작에 관한 연구

김봉석*, 임익현*, 이주현*, 류호선*, 박영민**
전력연구원*, 현대중공업**

The Study on the Power Cell Operation for H-Bridge Multi-level Inverter

Bong-Suck Kim, Ik-Hun Lim, Joo-Hyun Lee, Ho-Seon Ryu, Young-Min Park
KEPRI, HYUNDAI

Abstract - 본 논문에서는 고압전동기를 직접 드라이브 할 수 있는 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 개별 전력 셀의 동작원리에 대해서 고찰하였다. 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. 480V, 180kVA H-브릿지 멀티레벨 인버터를 제작하고 V/F제어, 벡터제어, 센서리스 벡터제어 이론을 적용하여 인버터 출력전압 레벨이 여러 단계이며 dv/dt 가 적으며 입력단 THD를 크게 낮출수 있다는 결론을 얻었다.

1. 서 론

최근 전력 설비의 용량의 대형화, 고 전압화에 따라 수메가, 수천 볼트 급의 전력변환장치의 수요가 증가하고 있다. 또한, 전력용 반도체 소자 기술 분야의 비약적인 발전에 힘입어 전력전자 기술은 고도로 성장하였으며, 특히 전력용 반도체 소자의 스위칭 속도, 전압정격 및 전류정격의 증대는 H-브릿지 멀티레벨 인버터를 가변속 전동기 구동 시스템에 적용 가능하게 하였다. 가변속 전동기 구동 시스템은 고압 대용량 유도 전동기에 입력되는 전압 및 주파수 가변을 통해 전동기의 속도를 제어하여 에너지 절감 효과를 얻을 수 있는 전력변환 장치이다. 기존의 대용량 고압 인버터 토폴로지인 전류형 인버터의 경우 스위칭 소자의 동작에 따라 발생하는 큰 dv/dt 에 의한 고조파와 common mode 전압에 의한 누설전류는 시스템 전체의 신뢰성을 떨어뜨리며, 스위칭 주파수에 따른 고차 고조파는 발열 및 신호선 간섭 측면에서 문제를 발생시킨다. 이에 대한 해결 방안으로 인버터 출력단에 L-C 필터를 설치하는 방법이 있으나 이는 출력 전압의 제어 응답특성을 떨어뜨리고 대용량 시스템에서는 크기 및 비용 증가 등의 단점이 있다. 이러한 단점으로 인하여 고압 전압형 인버터의 사용이 증가되고 있으나 과도한 dv/dt 에 의한 전동기 절연파괴, 인버터와 전동기 사이의 거리가 멀 경우 전압반사에 의한 과전압의 문제가 있으며 고압 전압형 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 경우 출력 전압 step이 여러 단계이므로 출력 필터가 없어 우수한 동적특성과 dv/dt 를 줄일 수 있다. 본 논문에서 제안하는 H-브릿지 멀티레벨 인버터는 우수한 동적 특성을 가지고 전속도 영역에 대해서 원활한 토크, 속도 제어가 가능하며 입/출력 역률 측면에서도 유리하다.

2. 본 론

2.1 개발된 H-브릿지 멀티레벨 인버터

개발된 3상 440V, 180kVA H-브릿지 멀티레벨 H-bridge 인버터는 그림 1과 같이 입력 다권선 변압기와

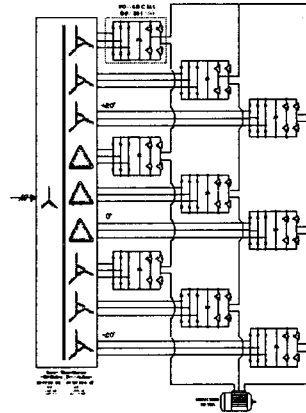


그림 1. H-브릿지 멀티레벨 인버터 구성도

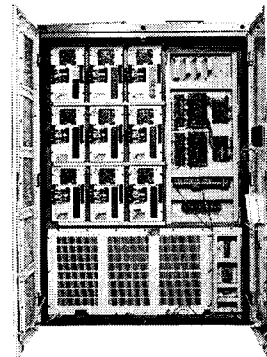


그림 2. 480V, 180kVA H-브릿지 멀티레벨 인버터

한 상당 3대의 셀 인버터가 직렬 연결되어 총 9대의 셀 인버터로 구성되어있다. 각 셀 인버터는 전압형 인버터로써 직렬 연결되어 있으며, 다권선 변압기에 의하여 위상차를 주어 출력 전압은 멀티레벨을 가지며 유사정현파이다. 인버터 출력전압의 레벨수를 증가시키기 위하여 분리된 직류전원을 갖는 셀 인버터 출력을 시스템 1상당 3대 씩 직렬 연결하여 상 전압 기준 7레벨, 선간전압 기준 13레벨의 유사정현파 파형을 생성한다. 다수의 독립 절연 직류부를 만들기 위해 입력 측에 다권선 변압기를 사용하여 권선 위상차를 포함시켜 18펄스 다이오드 정류부를 구성함으로써 입력 측 고조파 함유율을 축소시키는 구조를 가진다. 그림 2는 480V, 180kVA H-브릿지 멀티레벨 인버터의 사진이다. 상단에는 Power Cell과 제어부가 배치되었고 하단에는 다권선 변압기가 배치되어 있다. 표 1은 개발된 480V, 180kVA H-브릿지 멀티레벨 인버터의 사양이다.

인버터 형태	전압형 인버터 (H-Bridge 멀티레벨 인버터)
정격 용량	180kVA
입력전압	3상 440V ± 10%
입력변압기	180kVA, 다권선 변압기
입력주파수	50/60Hz ± 5%
입력 정류 방식	18펄스 다이오드 정류
입력 전원품질	TDD<5% ,
역률(DPF)	0.95 (from 20% to 100% load)
출력전압	3상 0-440V, 선간전압
출력전압 Lc vel	상 전압 : 7레벨 선간 전압 : 13레벨
셀 인버터 수량	총 9대 (1상 당 3셀 직렬연결)
출력주파수	0Hz-120Hz
사용전력소자 & 변조방식	IGBT, 펄스 폭 변조방식(광 신호 전송)
효율	97% (정격속도, 정격전류 내)
냉각	강제 풍냉
적용 규격	IEEE or NEMA

표1. 개발된 H-브릿지 멀티레벨 인버터 사양

2.2 개별 셀 인버터

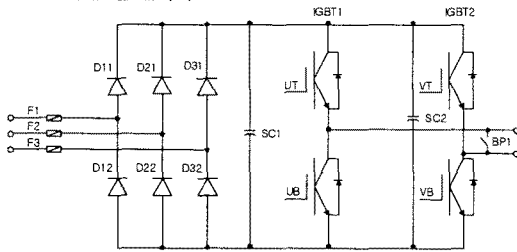


그림 3. 20kVA 셀 인버터 전력회로

그림 3은 셀 인버터 전력회로 구성도로써 20kVA (180kVA / 9개) 용량의 3상 정류부와 단상출력의 인버터부로 구성 되어있다. 셀 출력전압의 최대 크기는 출력 1상 당 3대의 셀 인버터를 연결하는 방식이므로 85V가 된다. 인버터 부 출력 측에 싸이리스터를 이용 양방향 bypass 스위치를 부착하였다. bypass 스위치는 멀티레벨 H-bridge 인버터의 총 9개 셀 인버터 중 임의의 셀 인버터에 고장이 발생하였을 경우 고장 셀 인버터 출력을 격리시키는데 사용되며 bypass 스위치를 통해 격리된 고장 셀 인버터를 교환 하지 않아도 되므로 경지 없이 시스템을 계속 운전할 수 있다. bypass 운전 중에는 격리된 셀 인버터의 수량에 해당하는 용량만큼의 부하 De-rating 운전이 필요하다.

2.2.1. 개별 셀 인버터의 동작원리

H-bridge 인버터의 개별 셀 인버터는 그림 4와 같이 출력전압이 4개의 Mode로 동작한다. Mode 1은 GA1 위 스위치가 on되고 GA2의 아래 스위치가 on되면 출력전압은 V가 된다. Mode 2는 GA1, GA2의 아래 스위치가 모두 on되면 출력전압은 0이 된다. Mode 3은 GA1, GA2의 위의 스위치가 on되면 출력전압은 Mode 2의 경우와 같이 0이 된다. Mode 4는 Mode 1의 반대의 경우로 GA1의 아래 스위치가 on되고 GA2의 위 스위치가 on되면 출력전압은 -V가 된다.

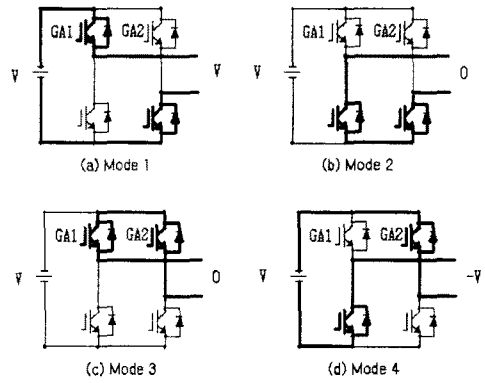
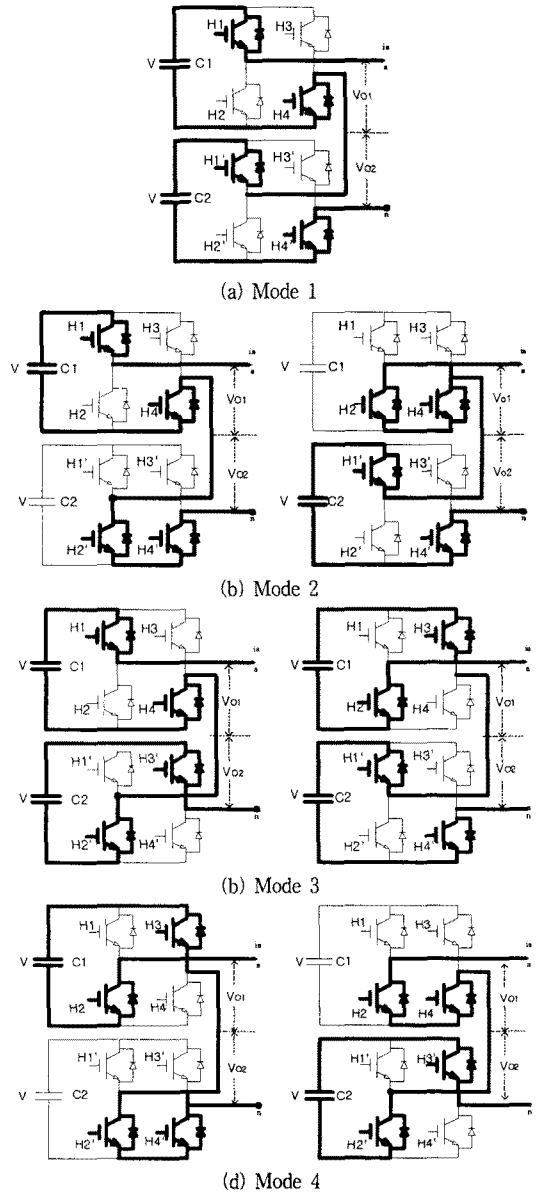
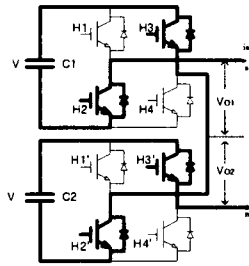


그림 4. 개별 셀 인버터 동작 모드

2.2.2. 2개 셀 직렬 연결된 인버터의 동작원리





(e) Mode 5

그림 5. 2개 셀 직렬 연결된 인버터 동작 모드

그림 5는 2개 셀 직렬 연결된 인버터의 동작 모드이다. 각각의 모드별 해석은 다음과 같다. 2개 셀 직렬 연결된 출력 전압은 아래의 공식으로 산출할 수 있다.

$$V_o = (H1H4 - H2H3) V + (H1'H4' - H2'H3') V$$

Mode 1 : 이 동작모드에서 V_{O1} 과 V_{O2} 는 V 이고 출력 전압 V_o 는 $2V$ 이다. 부하전류가 양의 방향이면 커패시터 C1, C2는 부하전류를 공급하기 위하여 방전한다. 부하전류가 음의 방향이면 부하전류는 커패시터 C1, C2를 충전시킨다.

Mode 2 : 이 동작모드에서 출력전압 V_o 는 V 이다. 부하전류가 양의 방향이고 V_{O1} 은 V , V_{O2} 는 0 일 때 커패시터 C1은 방전한다. 그리고 V_{O1} 은 0 , V_{O2} 는 V 일 때 커패시터 C2는 방전한다. 부하전류가 음의 방향이면 전력소자의 스위칭 상태가 $H1=H4=1$ 또는 $H1'=H4'=1$ 일 때 부하전류는 커패시터 C1, C2를 충전시킨다.

Mode 3 : 이 동작모드에서 출력전압 V_o 는 0 이다. 부하전류가 양의 방향이고 V_{O1} 은 V , V_{O2} 는 $-V$ 일 때 커패시터 C1은 방전하고, C2는 충전한다. 그리고 V_{O1} 은 $-V$, V_{O2} 는 V 이면 커패시터 C1은 충전하고, C2는 방전한다. 부하전류가 음의 방향이고 V_{O1} 은 V , V_{O2} 는 $-V$ 일 때 커패시터 C1은 충전하고, C2는 방전한다. 그리고 V_{O1} 은 $-V$, V_{O2} 는 V 이면 커패시터 C1은 방전하고, C2는 충전한다.

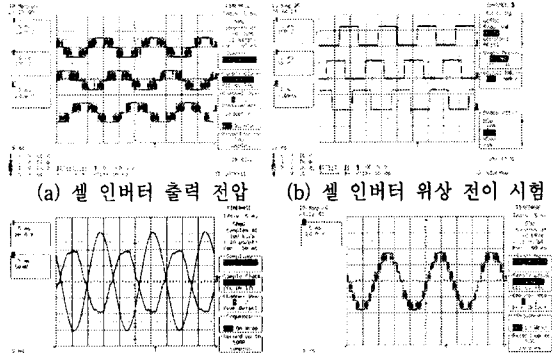
Mode 4 : 이 동작모드에서 출력전압 V_o 는 $-V$ 이다. 부하전류 양의 방향일 때 IGBT H2, H3, H2' 및 H4'가 on이면 커패시터 C1은 충전한다. 그리고 H2, H4, H2' 및 H3'가 on이면 커패시터 C2는 충전한다. 부하전류 음의 방향일 때 IGBT H2, H3, H2' 및 H4'가 on이면 커패시터 C1은 방전한다. 그리고 H2, H4, H2' 및 H3'가 on이면 커패시터 C2는 방전한다.

Mode 5 : IGBT H2, H3, H2' 및 H3가 on이면 출력전압 V_o 는 $-2V$ 이다. 부하전류가 양의 방향 일 때 부하전류는 커패시터 C1, C2를 충전시킨다. 부하전류가 음의 방향 일 때 부하전류는 커패시터 C1, C2를 방전시킨다.

2.3 실험결과

그림 6 (a)는 각 상의 파워 셀(Cell 1, Cell 4, Cell 7)

에 대한 출력 전압을 측정하였다.



(a) 셀 인버터 출력 전압 (b) 셀 인버터 위상 전이 시험
(c) 다권선 변압기 전압 및 전류 (d) 인버터 출력 상 전압(U상)

그림 6. 실험파형

각 파형의 주기는 16.67msec의 주기를 가지며 각 상의 파워 셀 간에는 5.55msec의 위상 차이가 있다. 그림 6 (b)는 Cell 인버터U상의 Cell 1, Cell 2 그리고 Cell 3의 출력 파형을 측정하였다. 각 Cell 인버터 출력 간에는 전체 주기의 3.6도에 해당하는 167μsec의 위상 차이가 있다. 그림 6 (c)는 제어모드는 V/F 제어운전이며 부하는 100[N·M]의 실험 조건에서 측정된 다권선 변압기 1차 측 전압 및 전류 파형이다. 그림 6 (d)는 U상의 Cell 인버터 출력 상 전압의 파형이다. 인버터 출력 상 전압 레벨의 이론치 수는 “2×상당 셀의 수”이며 실제 파형도 이론치와 같은 7레벨임을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 고압전동기를 직접 드라이브 할 수 있는 전동기 가변속 장치인 H-브릿지 멀티레벨 인버터를 선정하였다. 여러개의 단상 Power Cell을 직렬로 연결함으로써 저전압 전력용 반도체를 사용하여 고전압을 얻을 수 있고, 정현파에 가까운 출력전압 파형을 얻을 수 있었다. 상당 3개의 Power Cell이 직렬로 연결되어 총 9개의 Power Cell로 구성되어 되어, 선간전압은 13레벨이며 dv/dt가 적으며 입력 단 THD를 크게 낮출 수 있었다. 정격용량 180kVA 이고 출력전압이 480V인 H-브릿지 멀티레벨 인버터를 제작하여 와전류 다이아모메타 부하 시험을 통해 제안된 방법의 타당성과 신뢰성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ichikawa, Kosaku; Hirata, Akio; Kawakami, Kazuto; Satoh, Kazuhiro, "Multiple inverter system", *United States Patent Number 622~722*, 2001. 5. 8.
- [2] Hammond, Peter W., Hammond, "Medium voltage pwm drive and method", *United States Patent Number 5625545*, 1997. 4. 29.
- [3] 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.