

3300V 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터 개발

박영민, 김연달, 이현원, 이세현, 서광덕
현대중공업 기술개발본부 기계전기연구소

Development of 3300V 1MVA Multilevel Inverter using Cascaded H-Bridge Cell

Y.M. Park, Y.D. Kim, H.W. Lee, S.H. Lee, and K.D. Seo

Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

Multilevel power conversion technology has received increasing attention recently for high power applications. The converters with the technology are suitable for high voltage and high power applications due to their ability to synthesize waveforms with better harmonic spectrum and apply for the high voltage equipment with a limited voltage rating of device. In the family of multilevel inverters, the topologies based on cascaded H-bridges are particularly attractive because of their modularity and simplicity of control.

This paper presents multilevel inverter with cascaded H-bridge for large-power motor drives. The main features of this drive 1) reduce harmonic injection; 2) can generate near-sinusoidal voltages; 3) have almost no common-mode voltage; 4) are low dv/dt at output voltage; 5) do not generate significant over-voltage on motor terminal;

The topology of the developed product is presented and the feasibility study of the inverter on 3300V 1MVA 7-level H-bridge type was carried out with experiments.

1. 서론

고압 대용량 인버터 기술 특징은 구조나 적용 소자 및 특성 면에서 거의 유사한 소용량급의 인버터와 달리 maker에 따라 전력 회로 topology가 다르고 적용 소자나 제어 기법도 상이하게 구성되어 있으며, 장기간의 시간과 많은 투자비용으로 기술 확

보가 가능하여, 대체로 선진 대기업에서 기술 개발을 주도하고 있다. 현재 ABB, Siemens, GE, Robicon 등이 독자적인 Topology Concept으로 신제품을 출시하고 있으며 세계 시장을 선점하고 있다. 국내외 대형 유도 전동기의 전압은 2,400V부터 7,200V로 다양하게 설계되어 있는데 반해, 전동기 가변속 장치인 고압 인버터는 전압이 다양하지 않아 강압 및 승압 변압기를 이용하여 여러 종류의 전동기에 적용하므로 가격 상승, 넓은 설치 공간 필요, 시스템 효율 감소, 변압기 누설 인덕턴스와 대지 정전 용량간의 공진 발생 등 많은 문제점이 야기되어 산업체 인버터 보급의 장애물로 대두되고 있다. 또한 인버터 적용 시 모선의 고조파 영향, PWM전압에 의한 전동기 열화, 진동, 절연, 에너지 절감액 평가저하 등으로 더욱 인버터 적용에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구의 목표는 사용자의 다양한 요구에 대응할 수 있는 전압과 용량을 가지고, 전원의 전력품질을 보장하며 시장 경쟁력이 구비된 전력 topology를 이용하여 인버터를 개발함에 있다.

본 논문에서는 고압 대용량 전동기 구동용 멀티레벨 인버터의 종류 및 특징을 간략히 살펴보고, 그 중에서 개발된 Cascaded H-Bridge 멀티레벨 인버터의 구체적인 전력회로 구조, 제어기 구성, 제어방법, 입출력 특성 그리고 사용자 요구에 대한 대응성에 대해 기술하고자 한다.

2. 멀티레벨 인버터의 개요

전압형 고압 대용량 인버터를 구성하기 위한 회로방식은 크게 스위칭 소자의 직렬연결에 의한 스위칭 소자의 고압화 방식과 Multi-level 방식으로 나눌 수 있다. 소자 직렬 방식은 여러 개의 저압 스

위칭 소자를 시리즈로 연결하여 등가의 고압 스위칭 소자를 구성하는 방법으로 이 경우 회로 동작은 저압 2-level 인버터와 동일하다.

Multi-level 인버터 방식 중 가장 오래된 방식이 NPC(Neutral Point Clamped) 방식으로 다이오드를 통하여 스위칭 소자에 걸리는 전압을 clamp하여 소자의 전압 분배가 일정하도록 하는 방식이다. 인버터 출력전압을 증가시키려면 NPC 방식을 확장하여 Multi-level로 구성하여야 하며 이 경우의 회로 구성은 한 상당 여러 개의 스위치와 clamping 다이오드로 구성된다. 또한 직류링크도 여러 개의 커패시터에 의한 전압 분배회로가 되어야 한다.

3-level의 NPC 방식을 확장하여 Multi-level의 Diode clamped 방식으로 회로를 구성할 경우 clamping 다이오드에 걸리는 전압 스트레스가 일정치 않고 직류단 커패시터의 전압 balance문제가 용이하지 않다. 이를 개선하기 위한 방식이 Flying capacitor 방식이다. 이 방식은 커패시터에 의해 소자의 전압을 balancing 하는 방식으로 Diode clamped 방식의 문제점을 어느 정도 보완할 수 있다.

또 다른 Multi-level 방식은 Cascaded 방식으로 소자를 직렬 연결하는 방식 대신에 단상 H-bridge로 구성된 셀을 시리즈로 연결하는 방식이다. 이 경우 각 셀은 독립된 직류링크를 가지므로 별도의 clamping 회로가 없이도 스위치에 일정 전압이 걸리게 된다. 그러나 각 셀의 직류링크는 절연되어야 한다. 표 1은 해외 선진업체에서 상용화된 멀티레벨 인버터 topology이다.

표 1. 고압대용량 인버터 제작사 전력회로 Topology 비교

제작사	제품명	전력회로 형태	전력소자
ABB	ACS1000	NPC	IGCT
GE	MV-GP-G MV-GP-H	NPC Cascaded	IGBT IGBT
ALSTOM	VDM6000 VDM7000	Flying Capacitor NPC	IGBT GTO
SIEMENS	SIMOVERT	NPC	IGBT
ROBICON	P-HARMONY	Cascaded	IGBT
MITSUBISHI	MELVEC 3000 MELTRAC F500	NPC Cascaded	GTO IGBT
TOSHIBA	TOSVERT	Cascaded	IGBT

3. H-브릿지 멀티레벨 인버터

3.1 특징

H-Bridge 인버터 시스템의 각 상은 직렬 접속된 여러 개의 셀로 구성된다. 각 셀은 독립된 단상 인

버터 구조이며 여러 개의 셀을 직렬로 연결함으로써 저전압 셀, 즉 저저압 전력용 반도체를 사용하여 고전압을 얻을 수 있고, 또한 셀의 수에 따라 출력 전압 level의 수가 증가하여 정현파에 가까운 전압 파형을 얻을 수 있다. 전원 계통과 연결된 입력부는 2차측이 지그재그 또는 확장 델타 결선방법의 여러 개의 탭을 갖는 변압기로 연결된다. 입력측 변압기는 두 가지의 용도로 사용된다. 첫번째 용도는 H-Bridge 인버터의 각 셀에 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 Multi-level 방식의 인버터는 고정된 회로 방식이므로 다른 인버터 출력 전압 level에 대한 응용이 어렵다. 그러나 Cascaded 방식의 H-Bridge 인버터는 셀 수를 조정함으로써 전압 level을 손쉽게 바꿀 수 있어 여러 종류의 전압에도 손쉽게 대응할 수 있는 장점을 가져 좀더 유연한 방식이라 할 수 있다. 또한 시스템이 동일한 cell의 조합이므로 고장시 셀 단위 교체가 가능하여 평균 고장 수리 시간을 최소화 할 수 있고 또한 여유분의 셀만을 확보하면 되므로 Spare Part에 대한 부담이 적다. Protection은 Cell 단위의 고장감시, 그리고 시스템 단위의 고장 감시 기능으로 분리하여 좀더 신뢰성 있고 유연한 고장 감시 및 진단 기능을 구현할 수 있다. 시스템이 정지되어서는 않되는 중요 부하의 경우는 각 셀의 출력을 bypass 시킬 수 있는 보조 스위치를 장착함으로써 고장시 고장 수리 기간동안 시스템이 정지하지 않고 전압만을 낮추어 운전될 수 있도록 하는 것이 가능하다.

이러한 면에서 Cascaded 방식의 H-Bridge 인버터는 유리한 Power Topology라 할 수 있으며 장점을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 다중 펄스 변압기를 사용함으로써 입력 THD가 낮다. (입력필터 필요 없음)
- 2) 전압 Step이 여러 단계이므로 출력 THD가 낮다. (출력필터 필요 없음)
- 3) Module단위(Power Cell)로 설계되기 때문에 전압정격을 쉽게 증가시킬 수 있다. (인버터 전압별 시리즈화 용이)
- 4) 전압반사 영향이 작기 때문에 인버터와 전동기 사이의 거리가 멀어도 무관하다.

3.2 제어기 구성

본 시스템의 제어기는 주 제어기와 셀 제어기의 두 가지로 구성된다. 주 제어기는 전동기 가변속 제어를 위한 제어기를 내장하며 이에 필요한 전압/전

류 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 전압 제어 및 위상제어를 하며, 또한 셀 단위의 감시 및 보호 기능을 갖는다. 주 제어기는 각 셀 제어기와 광 케이블로 이루어진 고속 링크로 연결되며, 직렬통신을 이용하여 데이터를 주고받는다. 주 제어기는 고성능 DSP와 주변회로로 구성되며 셀 제어기는 주변회로 기능이 포함된 one-chip DSP로 구성된다. 주 제어기와 셀 제어기의 통신은 CAN(Controller Area Network)을 이용하였다.

그림 1은 주 제어기와 셀 제어기의 기능 및 직렬 통신 블록 구성도로서 주 제어기는 전동기 속도와 인버터 출력 전류를 받아들여 전동기 속도 및 전류 제어를 수행한다. 전류제어의 출력인 3상의 전압 기준값을 각 상별로 동기를 맞추어서 광 케이블을 이용한 CAN통신을 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 상 당 Power Cell의 갯수, Power Cell 고장시 고장 Power Cell의 갯수 및 위치 그리고 각 Power Cell의 위치 정보를 이용한다.

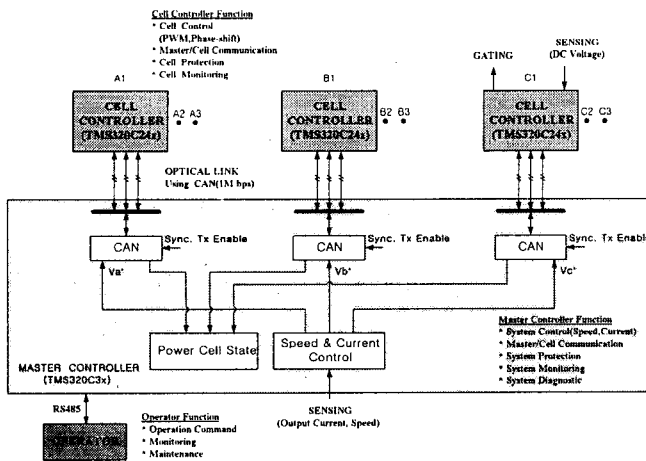


그림 1. H-Bridge 인버터 제어기 구성

3.3 3300V 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터

그림 2는 3300V 1MVA H-Bridge 인버터 전력회로 구성도이다. 시스템 입력측에는 전원의 전력품질을 위하여 다권선 변압기가 사용되며, 2차 출력간에는 20° 위상차가 나며 1차 권선은 Y결선, 2차 권선은 확장 Δ결선이다. 변압기 %임피던스를 높여 개별 Power Cell은 초기충전 회로 없이 직충전이 가능하도록 설계하였다.

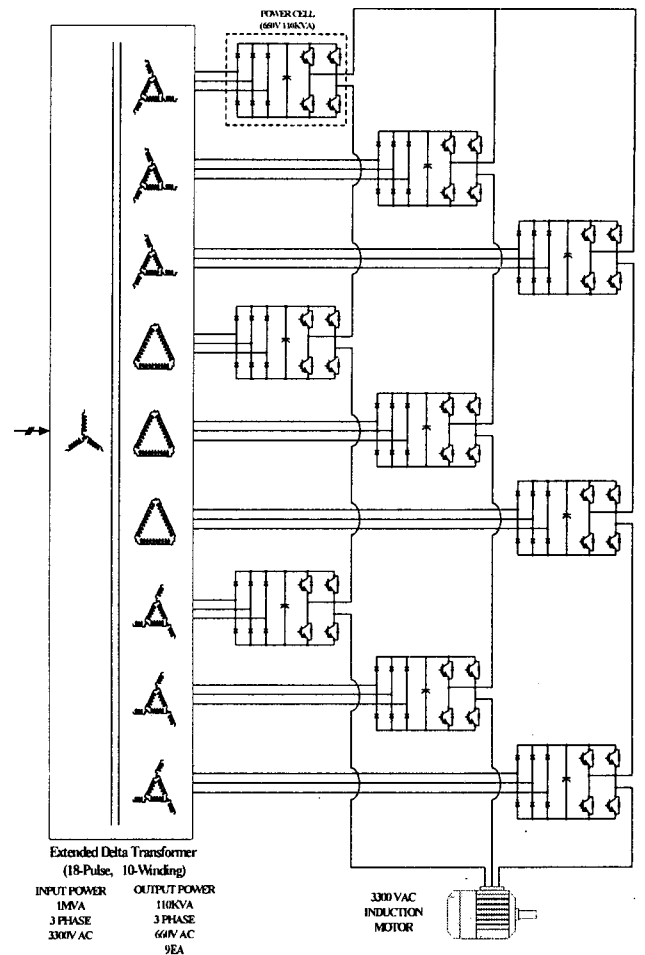


그림 2. 3300V 1MVA H-Bridge 인버터 구성

4. 제작 및 실험을 통한 검증

4.1 제작

그림 3에서 처럼 패널 내부 공간을 변압기공간과 Cell 인버터 공간으로 크게 분리한 후 제어부는 인버터 시스템 전체 폭 크기를 줄이기 위해 2중 구조로 하였다. Cell 인버터 공간은 동일 구조 동일 용량의 Power Cell을 3상 인버터 결선이 용이하게 배치하였으며 방열판을 후면으로 배치한 후 Fan을 이용 강제 냉각시키는 형태로 설계하였다.

4.2 실험

그림 4는 상당 Power Cell 3개를 3상에 연결하여 정격 전압 3,300V 인가했을 때 출력전압으로 전압 Step이 여러 단계임을 알 수 있다.

그림 5는 변압기 1차측 전류로 변압기 2차측 권선간의 위상차에 의해 2차 전류의 합성으로 나타나기 때문에 거의 정현파에 가까운 전류가 흘러 입력 고조파 측면에서 우수한 특성을 나타낸다.

표 2. 시스템 사양

항 목	Specification
인버터 Type	Isolated Series H-Bridge Inverter
용 량	1MVA
입력 전압	3,300V
입력 주파수	50/60Hz
Power Quality	입력전류 TDD<5% 출력전류 THD<3%(전동기 부하)
출력 전압(선간)	0~3,300V(3상)
출력 주파수	0~120Hz
제어 방식	V/F운전, 센서리스 벡터제어
전력소자&변조방식	IGBT, 정현파 PWM 방식
냉 각	강제 공냉

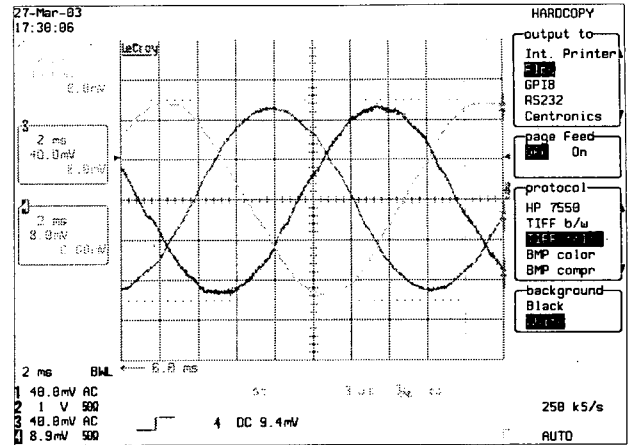


그림 5. 변압기 1차 전류

5. 결 론

본 연구에서 개발된 대용량 인버터는 전력회로를 구성하는 여러 topology 중 전압 및 용량변경에 쉽게 적용할 수 있고 시장 경쟁력이 있는 저 전압용 IGBT를 이용할 수 있는 Cascaded 방식의 H-Bridge topology를 선정하여 셀 수를 조정함으로써 3,300V급 인버터 이외에도 2,400V급, 4,160V급 또는 6,600V이상의 고압에도 쉽게 대응할 수 있는 유연성을 가지도록 시스템을 설계 하였다. 3,300V 1MVA 용량을 시험을 통해 인버터 출력 전압 Step이 여러 단계이고 dv/dt가 적으며 입력단 THD를 크게 낮출 수 있어 성능 면에서도 여타 방식보다 우수함을 입증 하였다. 또한 생산적인 측면에서도 저압 소자를 사용하여 설계하므로 기존의 생산/시험 기술과 설비를 이용할 수 있어 매우 경제적이며 cell단위 결합 구조이므로 신뢰성 측면이나 보수/유지 측면에서도 유리하다는 결론을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] Richard H. Osman, "A Medium-Voltage Drive Utilizing Series-Cell Multi-level Topology for Outstanding Power Quality", pp. 2662-2669, 1999.
- [2] 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 on , Vol.: 2, Page(s): 859-864, 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, Jan/Feb 1997.
- [4] Shakweh, Y.; Lewis, E.A.; "Assessment of medium

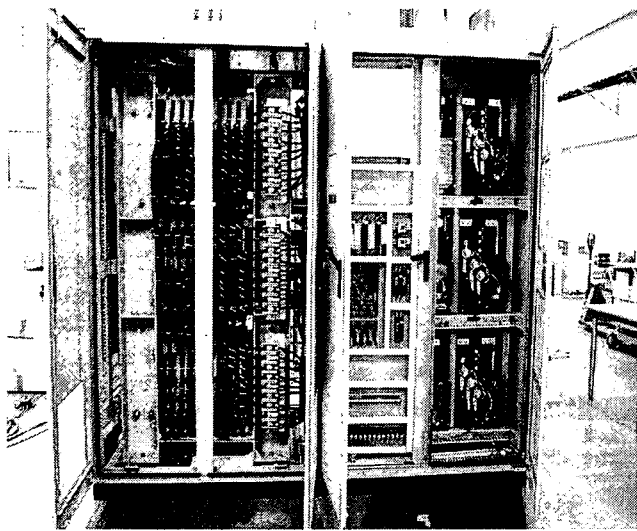


그림 3. 3300V 1MVA H-브릿지 멀티레벨 인버터

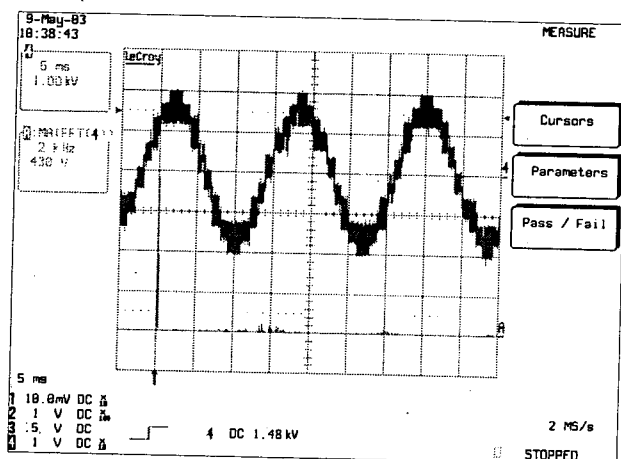


그림 4. 60Hz 운전시 선간 출력전압

voltage PWM VSI topologies for multi-megawatt variable speed drive applications", Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE , Volume: 2, Page(s): 965-971, 1999.

- [5] Peng, Fang Zheng; Lai, Jih-Sheng; "Multilevel cascade voltage source inverter with separate DC sources", United States Patent Number RE37126, 2001. 4.
- [6] Aiello, Marc F.; Hammond, Peter W.; Rastogi, Mukul; "Modular multi-level adjustable supply with parallel connected active inputs", United States Patent Number 6301130, 2001.10.
- [7] Hammond, Peter W., Hammond, "Medium voltage pwm drive and method", United States Patent Number 5625545, 1997.04.
- [8] Ichikawa, Kosaku; Hirata, Akio; Kawakami, Kazuto; Satoh, Kazuhiro; "Multiple inverter system", United States Patent Number 6229722, 2001. 5.