고전압 대용량 유도 전동기 구동용 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 개발 및 적용

박영민*, 유한승*, 이현원*, 정명길*, 이세현*
*현대중공업

Development and Application of H-Bridge Multilevel Inverter for High-Voltage & High-Power Induction Motor Drives

Young-Min Park*, Han-Seong Ryu*, Hyun-Won Lee*, Myung-Gil Jung*, and Se-Hyun Lee*
*Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

본 논문에서는 실용적이며 신뢰성 있는 고전압 대용량 유도 전동기 구동용 H-브릿지 멀티레벨 인버터를 개발하여 산업 현장에 적용한 내용을 소개하였다. 실용적인 PWM (Pulse Width Modulation)과 PEBB (Power Electronics Building Blocks)에 기초한 신뢰성 있는 분산 제어를 적용하였으며, H-브릿지 멀티레벨 인버터를 이용한 유도 전동기 벡터 제어시의 위상지연을 보상하여 제어 성능을 향상시켰다. 또한, Power Cell 고장 발생시 시스템을 정지하지 않으면서 효율적 운전을 가능하게 하는 3상 불평형 제어를 이용하여 잉여성을 확보하였다. 다양한 전압과 용량의 H-브릿지 멀티레벨 인버터를 설계 및 제작하여 각종 부하 실험, 산업 현장 적용을 통해 적용된 방법의 타당성과 실용성을 입증하였다. 또한 실제 제품 설계, 생산, 판매, 유지 보수 과정을 통해 설계의 유연성, 생산의 효율성, 유지 보수의 편리함, 그리고 사용자 요구에 대한 대응성이 우수함을 확인하였다.

1. 서론

국내외 대형 유도 전동기의 전압은 2,400V부터 7,200V로 다양하게 설계되어 있는데 반해, 전동기 가변속 장치인 고전압 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 정전용량간의 공진 발생 등 많은 문제점이 야기되어 산업계에서 인버터 보급의 장애물로 대두되고 있다. 또한 인버터 적용 시 모선의 고조파 영향, PWM 전압에 의한 전동기 열화, 진동, 절연, 에너지 절감액 평가저하 등으로 더욱 인버터 적용에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 사용자의 다양한 요구에 대응할 수 있는 전압과 용량을 가지고, 전원의 전력품질을 보장하며 시장 경쟁력이 구비된 전력 토폴로지인 H-브릿지 멀티레벨 인버터를 이용한 고전압 대용량 유도 전동기 구동용 인버터를 개발하여 산업현장에 적용 하였다.

H-브릿지 멀티레벨 인버터 시스템의 각 상은 직렬 접속된 여러 개의 Power Cell로 구성된다. 각각의 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 갯수가 증가하여 정현파에 가까운 전압 파형을 얻을 수 있다. 입력측 변압기는 2차측 탭간에 위상차를 두어 Multi-pulse 방식의 정류기형 컨버터를 구성함으로써 기존의 6-pulse 정류 방식에 비하여 아주 낮은 입력단 THD(Total Harmonic Distortion) 특성이 있다. 인버터 최종 출력 전압은 Power Cell의 갯수를 조정함으로써 대응이 가능하다.

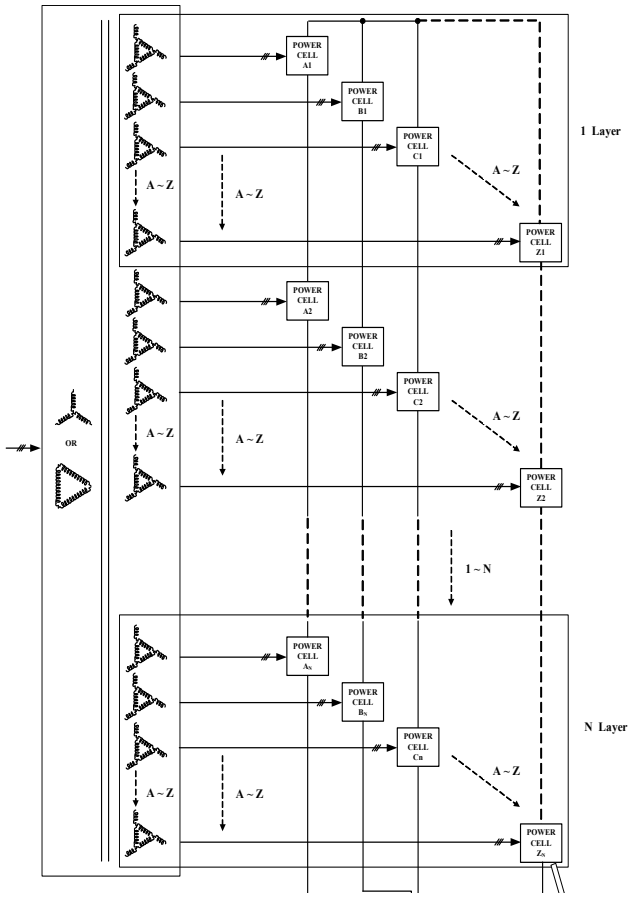

그림 1. H-브릿지 멀티레벨 인버터 전력 회로

따라서, 입출력 전력 품질이 우수하며 강압 및 승압 변압기, 입출력 필터 그리고 고전압 전력용 반도체 소자를 사용하지 않으면서 고전압 전동기를 직접 구동할 수 있는 우수한 전력 토폴로지이다.[1][2] 하지만 제어해야할 많은 전력용 반도체 소자로 인해 PWM 구현의 복잡성, 다양한 고전압 대용량 전동기에 대응할 수 있는 유연성 있는 제어 구조의 미확립, 전력 토폴로지 특성에 의한 출력 전압의 위상 지연, 그리고 부분적인 고장 발생시의 대응 방안 부족 등으로 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 상업화는 많은 어려움이 있다.

2. 개발된 H-브릿지 멀티레벨 인버터

2.1 제어 장치의 구성

전력변환 장치의 모듈화 및 표준화 개념인 PEBB(Power Electronics Building Blocks) 개념을 파워 모듈에 한정하지 않고 제어 장치에 확대함으로써 다양한 용량의 대용량 고전압 전동기 구동 장치인 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 모듈화, 신뢰성 향상, 유지 보수 편리성, 그리고 생산성 향상을 목적으로 하였다. 이를 위해 주 제어기와 Power Cell 제어기로 구분하였으며, 주 제어기는 전동기 가변속 제어를 위한 속도와 전류 제어를 수행하며, Power Cell 제어기는 주 제어기의 기준 전압값에 의한 PWM 발생, PWM 위상 전이, 그리고 Power Cell 단위의 감시 및 보호 기능을 수행한다.

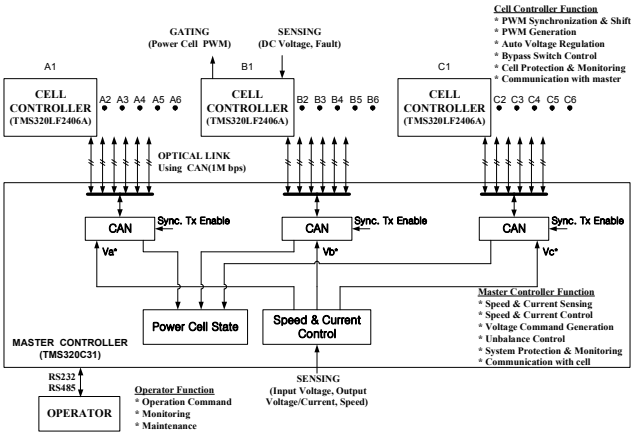

그림 2. 제안된 제어 장치의 구성

2.2 PWM 구현

PEBB 개념으로 설계된 분산 구조의 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 서로 다른 Power Cell 출력 전압 제어를 위한 PWM 동기 시점을 위해 CAN 통신 인터럽터를 사용하고, 개별 Power Cell 제어 장치의 내부 타이머에 의해 위상 전이된 PWM 출력하여 2레벨의 단상 인버터 출력을 멀티레벨화 하였다.

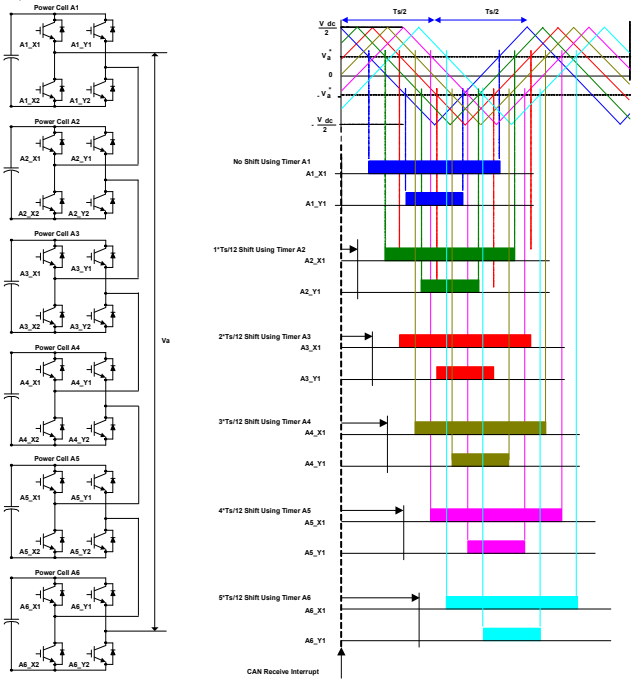

그림 3. CAN통신 인터럽터를 적용한 PWM 구현

2.3 전류 제어기의 위상 지연 보상

Phase-Shifted PWM (PSPWM)을 적용한 H-브릿지 멀티레벨 인버터는 제어기의 출력 전압 기준값과 실제 인버터의 출력전압은 위상 차이가 발생하여 Feedback 제어시 전류 제어를 어렵게 하는 원인이 된다. 따라서 전류제어기의 위상지연 보상 기법을 적용하였다.

$$V_{ABC_delay} = \frac{Ts}{2N} \times \frac{(N-1)}{2} \quad (1) \quad , \quad \theta_{shifted\ phase} = \frac{(N-1)T_s}{4N} \times \omega_e \quad (2)$$

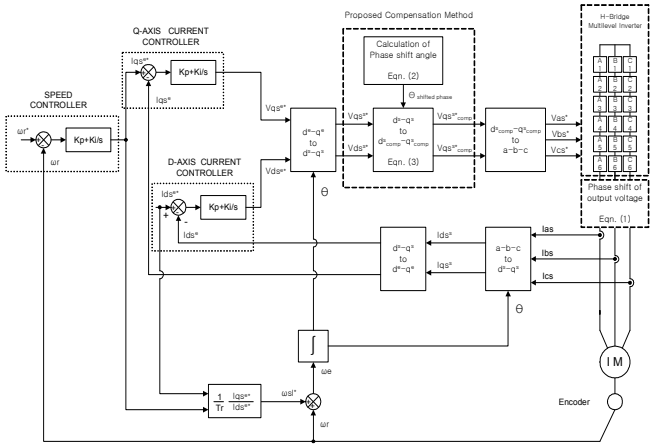

그림 4 . 전류 제어기 위상 지연 보상 블록도

$$V_{ds_comp}^{s*} = V_{ds}^{s*}\cos\theta_{shifted\ phase} - V_{qs}^{s*}\sin\theta_{shifted\ phase}$$
$$V_{qs_comp}^{s*} = V_{ds}^{s*}\sin\theta_{shifted\ phase} + V_{qs}^{s*}\cos\theta_{shifted\ phase} \quad (3)$$

2.4 Power Cell 고장시의 불평형 제어

전동기 구동용 인버터 시스템에서 3상 출력 선간 전압이 평형이면 운전이 가능하다. 따라서 고장이 발생한 Power Cell만 Bypass 시키고 불평형 상전압 위상을 변경하여 3상 출력 선간 전압을 평형으로 유지하면 출력 전압 감소를 최소화하면서 운전하는 것이 가능하다.[3] 옵셋 전압을 이용한 전압 변조 개념을 적용하여 구현하였으며, Power Cell의 고장 위치와 수

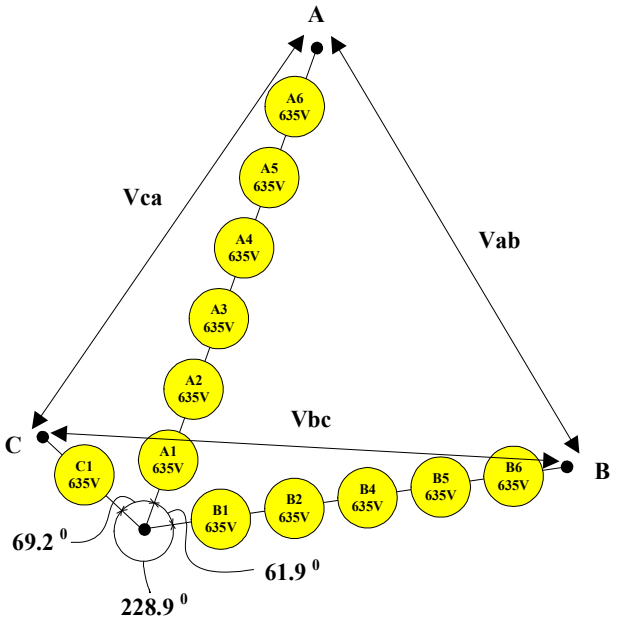

그림 5. 3상 불평형 제어를 위한 벡터도

량에 관계없이 상전압의 실시간 불평형 제어를 이용한 인버터의 최대 출력 전압을 이용할 수 있다.

3. H-브릿지 멀티레벨 인버터의 산업 현장 적용

그림 6은 단상 인버터의 직렬 연결로 구성된 3상 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 전력회로이며, 그림 7은 PEBB과 분산 제어 구조로 구현된 6600V 2MVA 시스템이다. 그림 8은 입출력 전압/전류이며 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 우수한 전력품질을 보여준다.

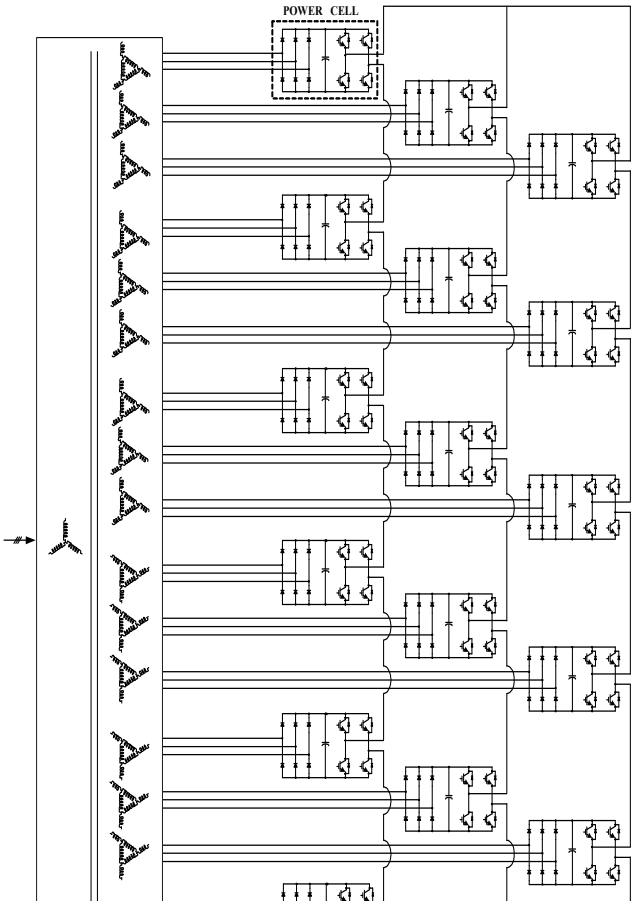

그림 6. 적용된 H-브릿지 멀티레벨 인버터 전력 회로

그림 7. 개발된 H-브릿지 멀티레벨 인버터

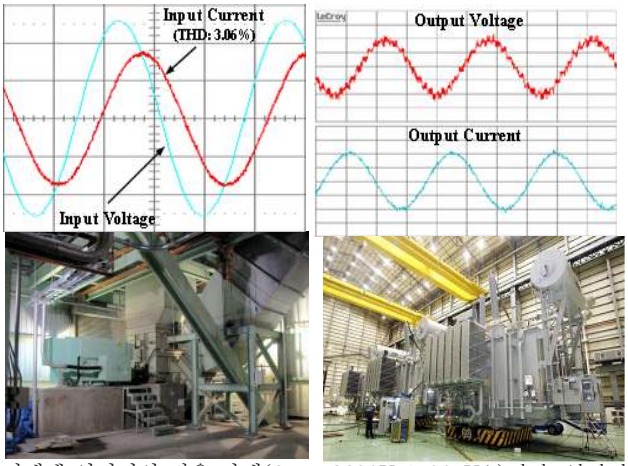

그림 8. 입출력 전압 및 전류

그림 9 (a)는 강원도 동해시 화력 발전소 발전 설비의 발전용 보일러 FD Fan에 적용된 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 적용 사례(2set, 6600V 1000kVA)이며, 전동기 속도 제어를 이용한 에너지 절감을 목적으로 적용되었다. 그림 9 (b)는 울산시 현대중공업 변압기 실험실의 시험 설비에 적용된 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 적용 사례(3set, 6600V 4500kVA)이다. 인버터 부하의 종류는 생산된 대형 변압기를 출고하기 전에 변압기의 무부하 실험 및 동손을 이용한 부하 실험용으로 동기 발전기의 출력 주파수를 설정된 값으로 일정하게 유지하기 위해서 동기 발전기의 축에 연결된 유도전동기의 속도를 제어 대상으로 한다. 그림 9 (c) 경기도 성남시 폐기물 소각장 소각 설비의 소각용 보일러 유인 송풍기에 적용된 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 적용 사례(2set, 6600V 800kVA)이다. 전동기 속도 제어를 이용한 에너지 절감 및 저속 운전을 통한 설비의 진동 완화를 목적으로 적용되었다. 그림 9 (d)는 서울시 탄천 하수 처리 설비의 공기 공급용 Blower에 적용된 H-브릿지 멀티레벨 인버터의 적용 사례(9set, 3300V 750kVA / 3300V 1000kVA)이다. 전동기 속도 제어를 이용한 에너지 절감을 목적으로 적용되었다.

(a) 동해 화력 발전소 FD Fan (b) 현대중공업 변압기 실험실 발전기

(c) 성남시 폐기물 소각장 ID Fan (d) 서울 탄천 하수 처리장 Blower

그림 9. 산업 현장 적용

4. 결론

다양한 전압과 용량의 H-브릿지 멀티레벨 인버터를 설계 및 제작하여 각종 부하 실험, 다양한 산업 현장 적용 실험을 통해 적용된 방법의 타당성과 실용성을 입증하였다. 또한 실제 제품 설계, 생산, 판매, 유지 보수 과정을 통해 제안된 방법 적용시 설계의 유연성, 생산의 효율성, 유지 보수의 편리함, 그리고 사용자 요구에 대한 대응성이 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] D. Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, “Pulse Width Modulation for Power Converters: Principle and Practice”, A John Wiley & Sons, 2003

[2] Bin Wu, “High-Power Converters and AC Drives”, A John Wiley & Sons, 2006

[3] Eaton, D., Rama, J. and Hammond, P., "Neutral shift: five years of continuous operation with adjustable frequency drives", Industry Applications Magazine, IEEE, Volume 9, Issue 6, Nov.-Dec. 2003, pp.40-49