

# 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨을 이용한 3상 유도 전동기용 멀티레벨 인버터

오승훈, 김흥근, 전태원, 노의철  
경북대학교 울산대학교 부경대학교

## Multi-level Inverter for 3 Phase Induction Motor using Hybrid Diode Clamp Multi-level

Seung-Hun Oh, Heung-Geun Kim, Tea-Won Chun, Eui-Cheol Nho  
Kyungpook national univ. Ulsan univ. Pukyong National univ.

### Abstract

현재 멀티레벨 인버터는 고압 대용량 시스템에 많이 사용되고 있으며, 연구 또한 지속되고 있다. 현재 일반적으로 사용되는 멀티레벨 방법으로는 Neutral Point Clamp(NPC), H-Bridge 캐스캐이드, 플라잉 커패시터가 멀티레벨이 있다. 본 논문에서는 Neutral Point Clamp 토폴로지 중 다이오드 클램프 멀티레벨을 이용하여 3상 유도전동기용 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터를 구성 하였다. 그리고 신호 발생 방법으로는 Subhamonic PWM 방식을 사용하였으며, 유도 전동기 제어는 간접벡터제어로 제어를 함으로써 유도 전동기 구동용 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 적합함을 검증 하였다.

### 1. 서론

최근 산업 설비의 대용량화 추세와 고압화에 영향을 따라 고압 대용량 인버터의 수요가 증가하고 있으며, 전력용 반도체 소자의 제한된 정격을 극복할 수 있는 멀티레벨 토폴로지에 대한 연구가 지속 되어왔다. 멀티레벨 인버터는 기존의 2레벨 인버터에 비하여 직렬 연결된 소자를 사용할 때 전압 파형을 정현파와 가깝게 만들어 고조파 성분을 감소시키며, 전압 변화율(dv/dt)를 감소시켜 전자파 간섭현상을 줄일 수 있다.

멀티레벨 토폴로지의 종류로는 3가지로 분류할 수 있다. 고조파를 감소시키는 Neutral Point Clamp(NPC)타입, 레벨의 확장이 용이하며 DC 링크 전압 불평형이 없는 H-Bridge 캐스캐이드 멀티레벨(HC)타입, 스너버 회로 없이 구성이 가능하며 전압 균형이 용이한 플라잉 커패시터 멀티레벨(FC)타입으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 소자간의 차단 전압의 불균형을 구조적으로 해소해 줄 수 있는 Neutral Point Clamp 멀티레벨 구조의 다이오드 클램프 멀티레벨타입을 기초로 구성하였다. 하이브리드 멀티레벨 인버터는 2개의 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터를 직렬로 연결하였다.

본 논문에서는 고압 대용량 유도전동기 구동에 적합한 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터를 설계하였으며, 신호 발생 방법으로는 여러 개의 삼각파 신호를 하나의 지령으로 비교하여 PWM신호를 발생하는 Subhamonics PWM방법을 이용하여 간단하게 구현하였으며, 유도전동기 제어방법으로는 간접벡터제어를 이용하여 시뮬레이션으로 검증 하였다.

### 2. 9레벨 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터구성

### 2.1 단상 하이브리드 다이오드 클램프(CD)멀티레벨 인버터 구조

#### 2.1.1 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 기본구조.

하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터는 2개의 셀로 구성되어 있으며, 구조는 그림 1에서 나타내고 있다. 그림 1에서 나타난 단상 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 각 셀은 고압 IGBT로 구성되며, 그에 대한 출력은 식 (1)에서 나타내고 있다. 식 (1)에서 S는 스위칭 상태, n은 원하는 레벨의 수, E는 최소 전압 레벨을 이며, 그림 1에서는 총 9레벨의 출력을 가진다.

제안한 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터는 기존의 중성점 클램프 멀티레벨 인버터 구조보다 보다 더 많은 레벨을 구성할 수 있으며, 보다 낮은 dv/dt를 가진다는 장점을 가지고 있다. 표 1은 다이오드 클램프, 플라잉 커패시터, H-Bridge 캐스캐이드, 하이브리드 다이오드 클램프 타입의 디바이스 수를 나타내고 있다. 9레벨을 기준으로 볼 때, 메인 스위치 수는 다른 토폴로지의 개수와 동일하나 클램프 다이오드의 수 및 DC Bus 커패시터의 수는 다른 토폴로지 보다 적게 사용함을 알 수 있다.

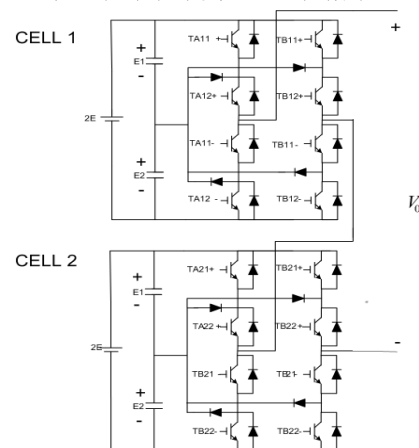


그림 1. 단상 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터  
Fig 1 Single hybrid Diode Clamped Multi-level inverter

$$V_0 = (S - \frac{n-1}{2})E \quad (1)$$

타입 다이오드 의 수	플라잉 캐패시터	H-bridge 캐스캐이드	다이오드 클램프	하이브리드 다이오드 클램프
메인 스위칭 다이오드	$(m-1) \times 2$	$(m-1) \times 2$	$(m-1) \times 2$	$(m-1) \times 2$
클램핑 다이오드	0	0	$(m-1) \times (m-2)$	$(m-1)$
DC Bus 캐패시터	$(m-1)$	$\frac{(m-1)}{2}$	$(m-1)$	$\frac{(m-1)}{2}$
발란스 캐패시터	$\frac{(m-1) \times (m-2)}{2}$	0	0	0

표 1. 4개의 멀티레벨 인버터 각 한 상의 요구되는 전력소자의 수의 비교.

Table 1. Comparison of Power Component Requirements Per Phase Leg Among Four Multi-level Inverter.

### 2.1.2 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터 동작원리.

표 2는 전압 레벨과 스위치 상태를 나타내고 있다. 스위치 상태가 1이면 스위치는 온상태가 되며, 스위치 상태가 0이면 스위치는 오프상태가 된다. 제안한 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 각 셀은 서로 상호 작용하는 4개의 IGBT 스위치 쌍을 가지고 있으며. 그림 1을 볼 때, 한 셀의 스위치의 쌍은 (TA11+, TA11-), (TA22+, TA22-), (TB11+, TB11-), (TB22+, TB22-)로 구성되어 있다.

다이오드 클램프의 한 셀은 동작 순서는 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 한 셀의 출력은 (2E, E, 0, -E, -2E) 총 5레벨로 나타 낼 수 있으며, 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터는 (4E, 3E, 2E, E, 0, -E, -2E, -3E, -4E) 총 9레벨 인버터로 구성된다.

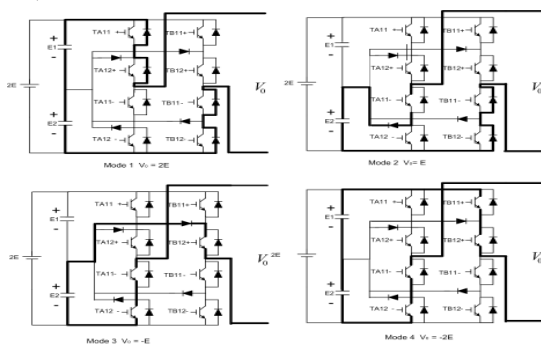


그림 2. 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 동작 순서  
Fig 2. Operation sequence of Diode Clamped Multi-level Inverter.

출력 전압	스위치 상태							
	Ta11+	Ta12+	Ta11-	Ta12-	Tb21+	Tb22+	Tb21-	Tb22-
2E	1	1	0	0	0	0	1	1
E	0	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1
-E	0	0	1	1	0	1	1	0
-2E	0	0	1	1	1	1	0	0

표 2. 하이브리드 다이오드 클램프 5레벨 인버터 전압 레벨과 스위치 상태.

Table 2. Hybrid Diode Clamp 5-Level Inverter Voltage

Level And Switch States.

### 2.2 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 PWM구조

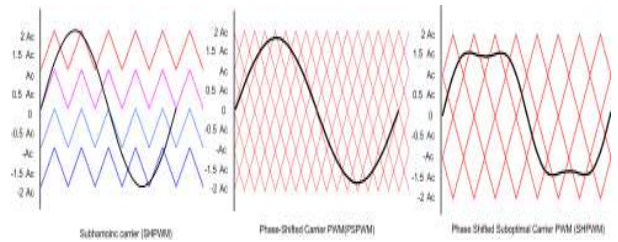


그림 3. Triangular Carrier phase shifting PWM방식  
Fig 3. Method of Triangular Carrier phase shifting PWM

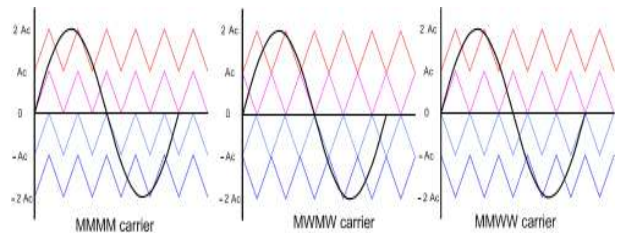


그림 4. Subharmonics PWM의 신호 발생법  
Fig 4. Signal generator of Subharmonics PWM

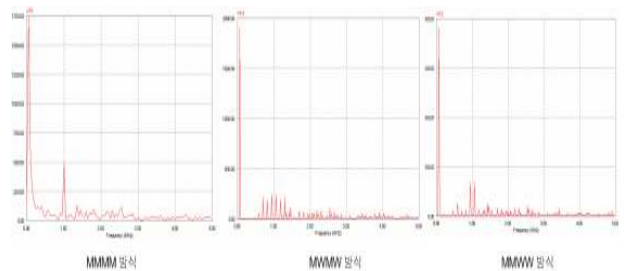


그림 5. Subharmonics PWM의 FFT 결과.  
Fig 5. FFT result of Subharmonics PWM

멀티레벨 인버터의 일반적인 PWM 신호 발생 방법은 Carrier-based PWM과 공간 벡터 PWM으로 구분 할 수 있다. 본 논문에서는 Carrier-based PWM을 기준으로 하였으며, 그림 3에서 보듯이 Carrier-based PWM방법은 Triangular Carrier phase shifting PWM방식, Phase Shifted suboptimal Carrier PWM방식, Subharmonic PWM방식으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 구조가 간단하고 구현이 쉬운 Subharmonic PWM방식을 사용하여 제안한 멀티레벨 인버터를 구현하였다.

Subharmonic PWM방식은 그림 4와 같이 MMMM방식, MWMW 방식, MMWW방식으로 구분 할 수 있다. 각 방식의 구조는 삼각파 신호를 180도 위상차를 두어, 각각의 방식으로 구현 하였으며, 각각의 방식을 푸리에 변환을 통하여, 그림 5에 나타내었다. 각각의 방식을 푸리에 변환을 통하여 본 결과는 MMWW방식이 제일 적합함을 알 수 있다.

### 2.3 하이브리드 멀티레벨 인버터를 이용한 유도전동기 모델링.

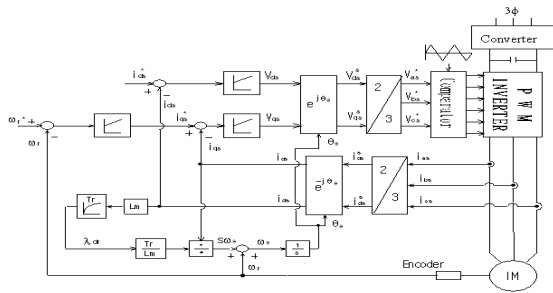


그림 6 유도 전동기 구동을 위한 간접 벡터 제어.  
Fig. 6 Indirect Field Orientation vector control for Induction Motor.

유도 전동기 벡터제어의 제어 방식은 필요한 회전자속을 직접 검출하거나 전동기의 입력전압과 직류전압 전류로부터 자속을 추정하는 방식인 직접벡터제어와 고정자의 입력전류와 전동기의 파라미터에 의하여 전동기의 슬립주파수를 계산하고 이를 회전자속도에 더하여 적분한 값으로 자속의 위치를 추정하는 간접 제어 벡터로 나누어진다. 그림 6은 유도 전동기 구동을 위한 멀티레벨 인버터의 간접 제어벡터를 나타내었다.

### 3. 시뮬레이션 결과

정격 출력	3.7 [KW]	$R_s$	0.59 [ $\Omega$ ]
정격 전압	290 [V]	$R_r$	0.425 [ $\Omega$ ]
정격 전류	20 [A]	$L_s$	52.47 [mH]
극 수	4	$L_r$	52.83 [mH]
정격주파수	60[Hz]	$L_m$	50.12 [mH]
정격속도	1000 [rpm]	$J$	0.13 [ $Kg \cdot m^2$ ]

표 3. 유도 전동기 정수와 정격.  
Table 3. Parameter and rating of induction motor.

본 논문에서 제안한 하이브리드 멀티레벨 인버터의 동작 특성을 확인하기 위하여 PSIM 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 8에서는 유도전동기 구동을 위한 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 구성을 보여주고 있다. 각각의 상은 하이브리드 다이오드 멀티레벨 인버터로 구성 하였으며, 입력 측은 1차 권선은 Y, 2차 권선은 Y,  $\Delta$  결선을 통해  $30^\circ$  위상차를 두어 THD 특성을 낮추었다. 표 3은 유도전동기의 정수와 정격을 나타내고 있다

그림 7은 단상 하이브리드 다이오드 멀티레벨 인버터의 출력을 나타내고 있으며, 그림 9는 하이브리드 다이오드 멀티레벨 인버터의 전류 및 속도 제어를 나타내고 있다. 정격 속도는 1000rpm이며 간접벡터 제어로 유도 전동기를 구동 하였다.

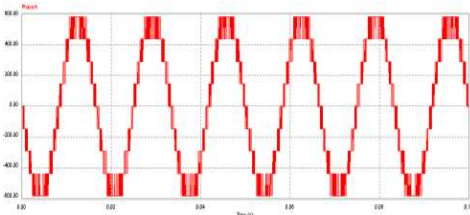


그림 7 단상 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 출력.

Fig. 7 Output of Single Hybrid Diode Clamp Multilevel Inverter.

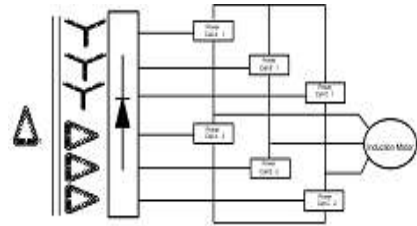


그림 8 유도 전동기 구동을 위한 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 구성.

Fig. 8 Hybrid diode Clamp Multi-level of constitution for Induction Motor Operation.

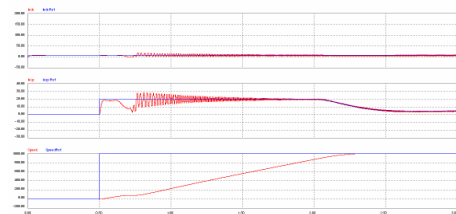


그림 9 하이브리드 다이오드 멀티레벨 인버터의 전류 및 속도제어기.

Fig. 9 Hybrid diode Clamp Multilevel of constitution of Induction Motor Operation.

### 4. 결론

본 논문에서 사용한 대용량 인버터는 전력회로를 구성하는 여러 가지 토폴로지의 중에서 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터를 사용하였다. 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터는 고압 IGBT와 커패시터, 클램프 다이오드, DC링크 커패시터로 구성되어 있다. 기존에 토폴로지는 대용량 고전압을 사용하기 위해서 저압 IGBT를 멀티레벨 토폴로지에 적용하여 사용하여 많은 수의 소자와 단위 셀이 필요하지만, 제안된 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터는 대용량 IGBT를 사용함으로써 간단한 구조로 고전압 대용량 시스템을 구현 할 수 있다. 또한 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 인버터의 입력은  $30^\circ$ 의 위상차를 간단한 Y- $\Delta$  결선을 구성하여 낮은 THD를 가지며, 출력은 전압 레벨이 여러 단계이므로 dv/dt의 영향이 적다. 이따므로 대용량 유도 전동기 구동에 있어, 하이브리드 다이오드 클램프 멀티레벨 방식을 이용하여 유도 전동기 구동이 방식이 다른 토폴로지보다 많은 장점을 가짐을 알 수 있다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-7-067) 주관으로 수행된 과제임

### 참고 문헌

- [1] Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng "Multilevel Converter -Power A New Breed of Power Converters"s in IEEE Transactions on Applications, VOL 32, NO. 3 1996 MAY/JUNE.