

# 3-레벨 T-type 인버터의 새로운 중성점 전압 제어 기법

김영선<sup>1</sup>, 구태홍<sup>2</sup>, 최정환<sup>2</sup>, 허동영<sup>2</sup>, 권봉환<sup>1</sup>  
 포항공과대학교<sup>1</sup>, LG이노텍<sup>2</sup>

## Novel neutral-point voltage control of three-level T-type inverter

Yeong Seon Kim<sup>1</sup>, Tae Hong Goo<sup>2</sup>, Jung Hwan Choi<sup>2</sup>, Dong Young Huh<sup>2</sup>,  
 Bong Hwan Kwon<sup>1</sup>  
 Pohang University of Science and Technology<sup>1</sup>, LG Innotek<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문은 3 레벨 T type 인버터의 새로운 중성점 전압 제어 기법을 제안한다. 3 레벨 T type 인버터는 dc link 전압을 커패시터 2개로 나누어 사용하며 두 커패시터간의 전압 차이로 인해 출력 전압의 왜곡을 야기한다. 공간 벡터 변조 기법으로 P type과 N type 전압 벡터의 스위칭 시간을 조절함으로써 복잡한 수학적 모델링 없이 중성점 전압을 제어하는 간단한 방식을 제안하였다. 제안된 중성점 제어 알고리즘을 설명하고, 10kW급 3 레벨 T type 인버터 시제품을 제작하여 본 논문에서 제안하는 방식에 대한 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

3 레벨 T type 인버터는 2 레벨 인버터에 비해 출력 전압 왜곡이 작고 스위칭 소자의 전압 스트레스를 줄일 수 있으며, 기존 3 레벨 NPC 인버터에 비해 상당 두 개의 클램프 다이오드를 줄일 수 있는 이점이 있어 다양한 분야에 적용되고 있다. 하지만 그림 1에서와 같이 커패시터 2개로 dc link 전압을 나누어 사용하므로 커패시터 특성 불일치 및 스위칭 동작에 따라 중성점이 변동되어 출력 전압의 왜곡이 발생한다. 따라서 이러한 중성점 전압을 제어하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. [1]

본 논문에서는 회로 동작에 따른 중성점 전압 변동의 물리적인 이해를 통해 복잡한 계산 없이 중성점 전압 제어를 수행할 수 있는 제어 기법을 제안한다. 제안된 제어 알고리즘을 설명하고, 최종적으로 10kW급 시제품을 제작하여 실험을 통해 제안하는 제어 기법의 타당성을 검증하였다.

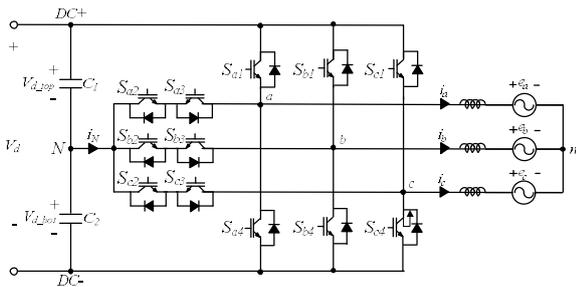


그림 1 3상 3-레벨 T-type 인버터

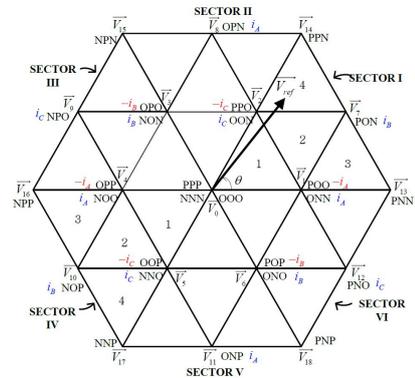


그림 2 공간 벡터의 스위칭 상태 및 중성점 전류

### 2. 3레벨 T-type 인버터의 중성점 전압 제어

#### 2.1 중성점 전압 불평형 발생

3레벨 인버터는 그림 2에서와 같이 총 18개의 공간 벡터와 27개의 스위칭 상태가 존재하며, 스위칭 상태에 따라 중성점에 흐르는 전류  $i_N$ 의 크기와 극성이 정해진다.

공간 벡터는 크기에 따라 4개(zero, small, medium, large) 그룹으로 분류할 수 있고, small 벡터와 medium 벡터가 중성점 전압 변동에 관여한다. P type small 벡터는  $C_2$ 를 충전시키는 방향으로  $i_N$ 이 흐르므로  $V_{d.bot}$  전압을 증가시키고, N type small 벡터는  $C_2$ 를 방전시키는 방향으로  $i_N$ 이 흐르므로  $V_{d.bot}$  전압을 감소시켜 중성점 전압 불평형을 야기한다. 따라서 중성점을 흐르는 평균전류  $i_N$ 가 0이 되도록 제어하면 중성점 전압의 평형을 유지할 수 있다.

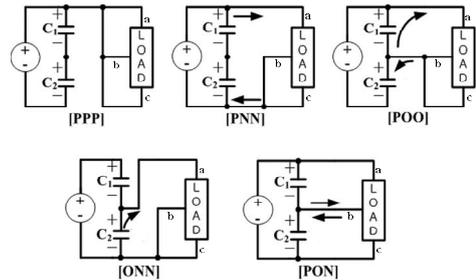


그림 3 스위칭 상태에 따른 중성점 전류

## 2.2 제안된 중성점 전압 제어 알고리즘

그림 4는  $\overline{V_{ref}}$ 가 SECTOR I의 region 4에 있는 경우의 7 segment 스위칭 시퀀스를 나타낸다. 중성점 전압의 변동을 최소화하기 위해 P type과 N type small 벡터의 스위칭 시간을 동일하게 설정하였다. 식 1은 스위칭 한 주기 동안 중성점 평균전류의 일반식이며, 수식의  $i_{1st} \sim i_{4th}$ 는 각 스위칭 상태의 중성점 전류를 나타낸다. 그리고  $T_{max}, T_{mid}, T_{min}$ 은  $T_{aj}, T_{bj}, T_{cj}$ 의 최대값, 중간값, 최소값을 의미한다. 각각의 스위칭 상태에 따른 중성점 전류를 대입하여 한 주기 동안 평균 중성점 전류를 계산하면 0이 아니며, 이는 중성점 전압이 안정화 되지 않음을 의미한다.

$$i_{N\_gen} = \frac{i_{1st}(T_S - T_{max}) + i_{2nd}(T_{max} - T_{mid})}{T_S} + \frac{i_{3rd}(T_{mid} - T_{min}) + i_{4th}T_{min}}{T_S} \quad (1)$$

중성점 전류를 0으로 만들기 위해 보상 시간( $T_{comp}$ )을 정의하고, 식 1의  $T_{max}, T_{mid}, T_{min}$ 에  $T_{max} + T_{comp}, T_{mid} + T_{comp}, T_{min} + T_{comp}$ 를 각각 대입하여 식 2와 같이 보상된 중성점 평균 전류( $i_{N\_gen\_comp}$ ) 일반식을 구할 수 있다.

$$i_{N\_gen\_comp} = i_{N\_gen} + \frac{2i_{4th}T_{comp}}{T_S} \quad (2)$$

식 2에서  $T_{comp}$ 와 4번째 스위칭 상태의 전류가 중성점 전류에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 여기서 중성점 전압 평형을 유지하기 위해  $i_{N\_gen\_comp}$ 가 0이 되는  $T_{comp}$ 를 구하면 식 3과 같다.

$$T_{comp} = k V_{error} \quad (\text{단, } V_{error} = V_{d\_bot} - V_{d\_top}, k = -\frac{i_{N\_gen}}{2i_{4th}V_{error}}T_S) \quad (3)$$

식 3에서 얻어진  $T_{comp}$ 를 식 4와 같이 각 상의 스위칭 시간에 보상함으로써 중성점 전압을 안정하게 제어할 수 있다.  $V_{d\_bot}$ 가  $V_{d\_top}$ 보다 작은 경우와  $V_{d\_bot}$ 의 값이  $V_{d\_top}$ 보다 큰 경우에 대해 보상된 스위칭 시간은 그림 4의 점선으로 표시하였다.

$$\begin{aligned} T_{aj\_comp} &= T_{aj} + T_{comp} \\ T_{bj\_comp} &= T_{bj} + T_{comp} \\ T_{cj\_comp} &= T_{cj} + T_{comp} \end{aligned} \quad (4)$$

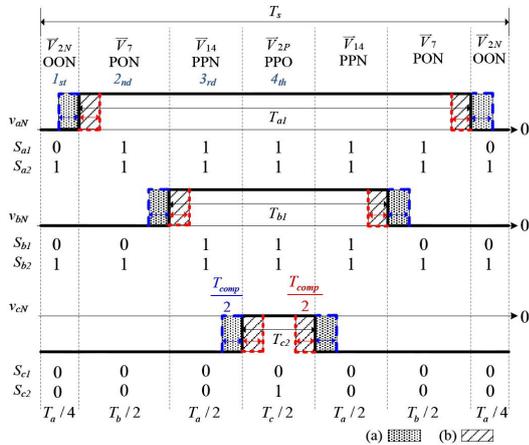


그림 4 7-segment 스위칭 시퀀스

(a)  $V_{d\_bot} < V_{d\_top}$  ( $T_{comp} > 0$ ) (b)  $V_{d\_bot} > V_{d\_top}$  ( $T_{comp} < 0$ )

## 3. 실험 결과

10kW급 3 레벨 T 형 인버터 시제품을 제작하여 본 논문에서 제안하는 방식의 타당성을 검증하였다. 표 1은 시제품 제작에 사용된 파라미터를 나타내고, 그림 5는 중성점 및 출력 선간 전압의 실험 파형이다. 중성점 전압 제어를 미실시한 경우 커패시터 전압 편차가 최대 120V 이고, 출력 선간 전압이 심하게 왜곡됨을 확인할 수 있다. 반면 제안된 중성점 전압 제어 알고리즘 적용 시에는 커패시터 전압 편차 및 출력 선간 전압의 왜곡이 발생하지 않으므로 중성점의 전압 제어가 정상적으로 수행됨을 확인할 수 있다.

표 1 3-레벨 T-type 인버터의 시제품 파라미터

| 파라미터    | 값      | 파라미터         | 값           |
|---------|--------|--------------|-------------|
| 정격 출력   | 10 kW  | dc link 커패시터 | 4700 uF × 2 |
| 입력 전압   | 700 V  | 출력 필터 인덕터    | 1 mH        |
| 스위칭 주파수 | 15 kHz | 출력 필터 커패시터   | 2.2 uF      |

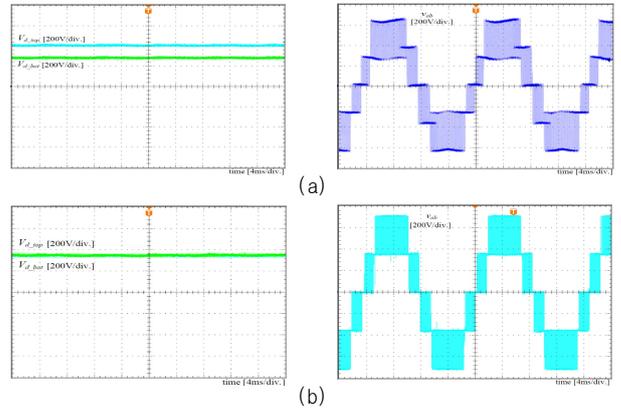


그림 5 중성점 및 출력 선간 전압 파형

(a) 중성점 불평형 및 출력 선간 전압

(b) 제안된 알고리즘 적용시 커패시터 전압 및 출력 선간 전압

## 4. 결론

본 논문에서는 복잡한 수학적 모델링 없이 3 레벨 T 형 인버터의 dc link 커패시터 중성점 전압 불평형을 해결할 수 있는 새로운 제어 기법을 제안 하였다. 제안하는 방식은 회로 동작에 따른 중성점 전압 변동의 물리적 이해를 통해 보상 시간 ( $T_{comp}$ )을 정의하여 스위칭 시간을 조절함으로써 중성점 전압을 제어 하였다. 최종적으로 10kW급 실험을 통해 제안하는 제어 기법의 타당성을 검증하였다.

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT 명품인재양성사업의 연구결과로 수행되었음”  
(IITP 2015 R0346 15 1007)

## 참고 문헌

- [1] C. Newton and M. Sumner, "Neutral point control for multi level inverters: Theory, design and operational limitations," in Proc. Ind. Appl. Soc. (IAS), New Orleans, LA, Oct. 1997, vol. 2, pp. 1336 1343.