

# 직류배전용 NPC 컨버터의 직류출력 고조파 저감

이종원<sup>1)</sup>, 이승용<sup>1)</sup>, 박영호<sup>1)</sup>, 홍승표<sup>2)</sup>, 최남섭<sup>3)</sup>  
 HD현대일렉트릭<sup>1)</sup>, (주)에코스<sup>2)</sup>, 전남대학교<sup>3)</sup>

## Harmonic Reduction of Neutral-Point-Clamped Converter in DC Distribution

Jong-Won Lee<sup>1)</sup>, Seong-Yong Lee<sup>1)</sup>, Young-Ho Park<sup>1)</sup>, Seung-Pyo Hong<sup>2)</sup>, Nam-Sup Choi<sup>3)</sup>  
 HD Hyundai Electric Co., Ltd<sup>1)</sup>, EKOS Co., Ltd<sup>2)</sup>, Chonnam National University<sup>3)</sup>

### ABSTRACT

본 논문에서는 직류 배전용 3-레벨 NPC 컨버터의 양극성 배전 성능 향상을 위하여 중성점 전류 리플을 저감하는 PWM 기법을 제안한다. 컨버터의 중성점 통류율을 3상 평형으로 동작하게 하는 영상분을 주입하여 중성점 밸런싱 제어와 중성점에 흐르는 전류 리플을 저감하였으며 PSIM 시뮬레이션과 실험을 통하여 SVPWM 기법과 제안하는 PWM 기법의 성능을 비교 검증하였다.

### 1. 서 론

최근 계통에 전기차 충전기, Energy Storage System(ESS) 그리고 신재생 에너지원 등과 같은 직류 전원 및 부하의 접속이 증가함에 따라 전력변환 단계를 한차례 줄이고 연계성을 높일 수 있는 직류 배전이 각광받고 있으며 기존 교류 계통과의 연계 및 배전 redundancy 확보를 위한 AC/DC 컨버터의 토폴로지 및 제어기법에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 한국전력은 고품질 전력공급과 직류 전원의 연계성 등을 고려하여 저압 직류배전의 공급전압을 1500V로 선정하였다. 저압 직류 배전의 전원방식은 크게 단극성과 양극성 두 가지로 나뉘는데, 3-level NPC 컨버터의 경우 3상 교류 380V를 통해 ±750V의 양극성 직류 전압 공급이 가능하다<sup>[1]-[2]</sup>. 또한 기존 2-level 컨버터에 비하여 전류 Total Harmonic Distortion (THD) 개선이 가능하며 낮은 정격 전압의 소자 사용이 가능한 장점이 있다. 하지만 3-level NPC 컨버터의 경우 필요한 소자 수가 증가하고 중성점을 갖는 구조적 특성으로 인하여 상·하측 부하의 크기가 다른 경우 전압 불균형이 발생하게 되며 안정적인 전원 공급을 위하여 중성점 밸런싱 제어가 필수적으로 요구된다. 그런데 Space Vector PWM(SVPWM) 방식을 적용하면 동작 시 중성점 전류에 필연적으로 3차 고조파가 발생한다<sup>[3]</sup>. 직류 단에 발생하는 3차 고조파 리플은 직류 측에 높은 과전압/과전류 차단 레벨을 요구하며 이는 신뢰성에 악영향을 미친다. 본 논문에서는 중성점 통류율을 3상 평형으로 동작하게 하는 영상분 전압을 주입하여 중성점 밸런싱 제어 뿐 만 아니라 중성점에 흐르는 전류 리플을 제거하여 직류 단 커패시터에 발생하는 전압, 전류 리플을 저감하는 새로운 PWM기법을 제안하였다.

### 2. 본 론

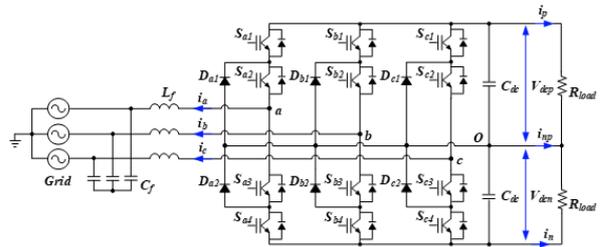


그림1 3-level NPC 컨버터의 구성  
 Fig.1 3-level Neutral-Point-Clamped converter system

#### 2.1 NPC 컨버터의 중성점 전류

그림 1과 같이 3-level NPC 컨버터는 3상 교류 전압원을 입력으로 하여 레그별 4개의 스위치와 2개의 클램프 다이오드로 구성되어 있으며 직류 단에는 2개의 커패시터가 분리된 형태로 중성점을 갖는 구조를 이루고 있다. NPC 컨버터의 중성점 전류는 교류 측 전류와 컨버터의 각 상의 스위치 상태에 따라 달라지며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$i_{np} = (1 - \frac{|v_a + v_{off}|}{V_{dc}/2})i_a + (1 - \frac{|v_b + v_{off}|}{V_{dc}/2})i_b + (1 - \frac{|v_c + v_{off}|}{V_{dc}/2})i_c \quad (1)$$

$v_x(x=a,b,c)$ 는 제어기 출력의 3상 값이며  $v_{off}$ 는 중성점 제어기의 출력 값으로 직류 측 부하 불평형이 발생하였을 때 제어기 보상을 통해 커패시터 상·하측의 충·방전 시간을 조절한다. 따라서 SVPWM으로 동작 시 NPC 컨버터의 중성점 전류에는 3차 고조파가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 리플 성분은 NPC 컨버터의 직류 측 전압/전류 차단 레벨을 높여 컨버터 동작의 신뢰성을 약화하고 직류 부하에 악영향을 미친다. 예를 들어 직류 측에 배터리 또는 PV 판넬이 부착되는 경우 리플로 인한 효율 감소 및 발열로 수명 단축을 야기한다. 따라서 직류 측 리플 제거를 위해 직류 측 전압 센서 출력에 band stop filter를 적용하여 리플 성분을 제거하거나 커패시터 용량 증가 또는 추가적인 active power decoupling 회로를 통하여 직류 측 리플을 저감하게 된다<sup>[4]-[5]</sup>. 대역폭이 낮은 band stop filter의 경우 리플을 효과적으로 제거할 수는 있으나 THD 증가 및 부하 변동과 같은 과도상태에 취약하다는 단점이 있다. 또한 커패시터 용량 증가 및 추가회로 구성의 경우 직류배전 시스템 구성을 위한 부피 및 가격 상승을 초래하며 직류 부하의 연계성을 약화한다.

## 2.2 제안하는 중성점 전류 리플 저감 PWM 기법

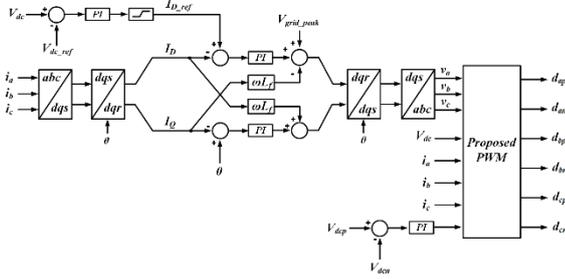


그림2 제안하는 PWM 기법의 제어 블록도  
Fig.2 Control diagram of proposed PWM method

그림 2는 제안하는 PWM 기법의 제어 블록도이다. 2중 루프를 구성하였으며 외부루프와 내부루프에 각각 출력 전압제어와 전류제어를 배치하였다. NPC 컨버터의 직류 측 밸런싱 제어와 3차 고조파 성분을 제거하기 위해 식 (1)의  $v_{off}$ 는 교류 측 3상전류 및 3상 제어기 출력 값을 바탕으로 연산된 제어 수식 값과 전압 밸런싱 제어기 출력 값의 합을 이용한다. 또한 인가 가능한  $v_{off}$ 의 크기는 3상의 제어기 출력 값을 바탕으로 제한한다.

## 2.3 시뮬레이션 결과

표 1 3-level NPC 컨버터의 정격 파라미터  
Table 1 Rated parameters of 3-level NPC converter system

$P$	170kW	$V_{dc}$	1500V
$V_{ac}$	380V	$f_l$	60Hz

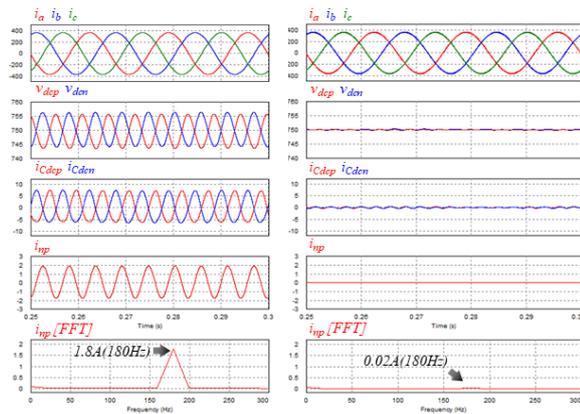
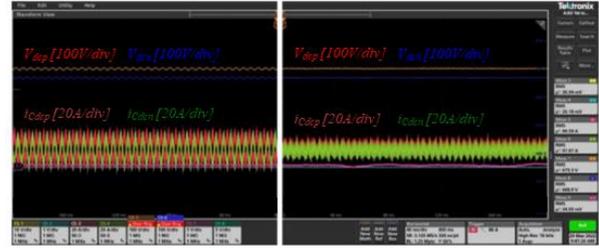


그림3 SVPWM 방식과 제안하는 PWM기법 적용 시 시뮬레이션 결과  
Fig.3 Simulation results of using SVPWM and proposed PWM method

그림 3은 표 1과 같은 정격 파라미터를 가지는 NPC 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 결과 파형이다. 그림 3의 (a)는 SVPWM을 적용한 NPC 컨버터의 주요 파형이다. 출력 전압 및 커패시터 전류, 중성점 전류의 파형과 중성점 전류의 FFT 결과 값을 바탕으로 전압과 전류에 3차 고조파 성분이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이는 직류 측 과전압/과전류 제한치를 높여야하는 결과를 야기한다. 그림 3의 (b)는 제안하는 PWM 기법을 적용한 NPC 컨버터의 주요파형으로 직류 측의 전압과 전류 모두 SVPWM에 비하여 3차 고조파가 저감된 것을 확인하였다.

## 2.4 실험 결과



(a) SVPWM (b) Proposed PWM method

그림4 SVPWM방식과 제안하는 PWM기법을 적용 시 실험 결과  
Fig.4 Experimental results of using SVPWM and proposed PWM method

그림 4는 표 1과 같은 정격 파라미터를 가지는 NPC 컨버터의 실험 결과 파형이다. 그림 4의 (a)는 SVPWM을 적용한 실험 결과이며 170kW 기준 전압 리플은 약 30V이고 전류 리플은 약 9A가 발생하는 것을 확인 하였다. 그림 4의 (b)는 제안하는 PWM 기법을 적용한 NPC 컨버터의 실험 결과이다. SVPWM 기법을 적용한 결과에 비하여 3차 고조파 성분이 크게 저감된 것을 확인할 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 직류배전용 3-level NPC 컨버터에서의 양극성 배전 성능향상을 위한 중성점 전류 리플 저감 PWM 기법을 제안하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 직류 중성점 전류의 3차 고조파가 저감되고, 커패시터 전압 변동 폭이 감소함을 확인하였다. 이를 통하여 직류 측 전압/전류 차단 차단레벨을 낮게 하여 NPC 컨버터 동작의 신뢰성을 높이고 리플 저감을 위한 커패시터 용량 증대나 추가적인 회로 구성이 불필요해지며 시스템 내 수동소자의 수명 증대와 직류 배전 연계 시 고조파 특성을 향상시키는 효과를 기대할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] J. Moia and M. L. Heldwein, "Three-level NPC-based bidirectional PWM converter operation for high availability/power quality bipolar DC distribution networks," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013.
- [2] 이승호, 박영민, 박영호, 김명호, 백주원.(2022). 직류배전을 위한 TAB 기반의 DC-DC 컨버터 설계 및 제어. 전력전자학회 학술대회 논문집, 469-470.
- [3] 이승용. "3 레벨 NPC 컨버터/인버터의 3 병렬 운전." 석사 학위논문, 서울대학교 대학원, 2010. 서울
- [4] Y. Tang, F. Blaabjerg, P. C. Loh, C. Jin and P. Wang, "Decoupling of Fluctuating Power in Single-Phase Systems Through a Symmetrical Half-Bridge Circuit," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 4, pp. 1855-1865, April 2015.
- [5] M. Badoni, A. Singh, S. Pandey and B. Singh, "Fractional-Order Notch Filter for Grid-Connected Solar PV System With Power Quality Improvement," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 1, pp. 429-439, Jan. 2022.