# LVDC 배전용 3레벨 NPC 정류기 개발

김호성, 류명효, 백주원, *조진태, *김재한
한국전기연구원. *한전전력연구원.

# Development of 3 level neutral-point-clamped rectifier for low voltage DC distribution

Ho Sung Kim, Myung Hyo Ryu, Ju Won Baek, *Jin Tae Cho, *Jae Han Kim
KERI, *KEPRI

## ABSTRACT

본 논문에서는 ±750V LVDC 배전용 전원장치에 적합한 3레벨 NPC 정류기 시스템을 제안한다. 제안하는 정류기 시스템은 배선선로의 부하 불평형에 따른 NPC 정류기의 출력 전압 불평형 현상을 해결하기 위해서 출력전압 밸런스 알고리즘을 적용하였다. 제안하는 정류기 시스템은 50kVA 용량의 시제품의 실험을 통해서 성능을 검증하였다.

## 1. 서론

중선선로를 포함하여 세개의 배전 선로로 구성되는 ±750V LVDC 배전 시스템은 기존의 네 개의 배전 선로로 구성된 삼상 교류 배전 선로에 쉽게 적용할 수 있으며, 이를 통한 선로 비용 절감, 신재생 전원과의 쉬운 연계 및 전송 효율 증가 등의 여러 장점을 가진다.

직류 배전을 위해서는 380V 3상 교류 입력 전압을 필요한 직류배전전압으로 만들기 위한 정원 장치가 필요하다. 기존에 많이 연구된 방식은 12펄스 방식의 싸이리스터 정류기, PFC 정류기, 그리고 2레벨 컨버터 구조의 정류기가 있다[1]. 이들은 간단한 구조를 가지며, 이미 기존에 많은 제어 방법들이 연구되어 신뢰성 있게 구성할 수 있는 구조이다. 하지만, 이러한 방식들은 입력단 고조파 저감을 위해서 큰 입력 인덕터 또는 높은 스위칭 주파수를 요구되며, 출력전압이 높으면 전력용 반도체로 사용할 수 있는 소자 전압이 제한적이므로 이를 고려하여 고압 스위치 또는 스위치 직렬 구조를 적용하여야 한다.

3레벨 NPC 컨버터는 입력 고조파 절감에 매우 효과적이므로 스위치들의 스위칭 주파수를 절감할 수 있는 장점이 있다[2]. 또한 고압 출력에 대해 직렬 구성된 스위치 또는 모듈들의 전압 분배가 2레벨 컨버터에 비해 쉽게 가능하다. 하지만, 3레벨 NPC 컨버터는 구조적으로 스위칭과 부하의 변동에 의해 중성점 전위가 변동되는 단점을 가진다. 특히, 중성점을 기준으로 부하의 차이가 발생할 경우 출력 전압은 불평형이 발생한다. 이는 일반적인 구조의 제어기 방식에서는 불평형의 출력 전압을 보상할 수 없다.

제안하는 논문에서는 LVDC 배전용 NPC 정류기의 출력 전압 불평형 현상을 해결하기 위해서 출력전압 밸런스 알고리즘을 적용하였다. 제안하는 정류기 시스템 및 제어기는 50kVA 용량의 시제품의 실험을 통해서 성능을 검증하였다.

## 2. 제안하는 회로 및 제어기의 구성

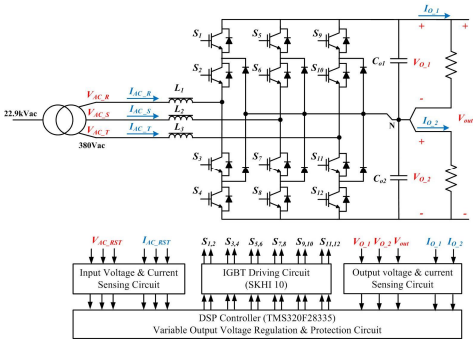


그림 1 제안하는 회로의 구성
Fig. 1 Circuit configuration of the proposed converter

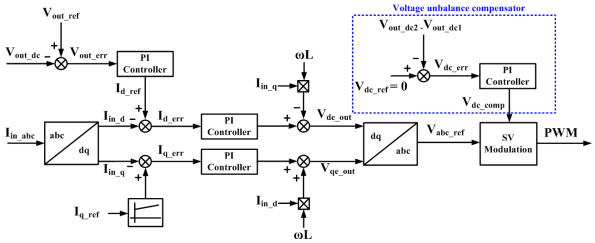


그림 2 제안하는 제어기의 구성
Fig. 2 Configuration of the proposed controller

그림 1은 제안하는 LVDC 배전용 3레벨 NPC 정류기 시스템의 구성도이다. 추가적인 제어기가 없을때는 $I_{o1}$과 $I_{o2}$의 차이에 비례해서 출력 전압이 변화한다. 이를 해결하기 위해서 그림 2는 제안하는 소프트웨어적인 방법을 통하여 출력 전압을 보상하는 제어기이다. 제안하는 방식 3상 PWM 발생 방식에서 가장 많이 사용되는 공간벡터가 생성되는 원리에서 옵셋 전압을 조정하여 각각 상단 캐패시터의 충방전 양과 하단 캐패시터의 충방전 양을 조절하는 방식이다. 일반적으로 양의 옵셋 전압을 준 경우에는 상단 캐패시터의 방전량이 늘어나고 음의 옵셋 전압을 준 경우에는 하단 캐패시터에서의 방전량이 늘어나게 되므로 이것을 이용해서 중성점 전압을 제어해줄 수 있다. 이때 옵셋 전압의 크기를 결정하기 위해서는 불균형 보상기와 같이 두 출력 전압의 차이를 0으로 만드는 PI 제어기를 추가적으로 사용하여 최종 크기를 옵셋 전압으로 공간백터 기준전압에 더해준다. 이를 통해서 출력 전압 불균형을 소프트웨어적으로 보상 시킬 수 있다.

그림 3은 제안된 NPC 3레벨 컨버터의 출력 불평형 보상 기능을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 실험 조건은 보상 알고리즘을 적용하지 않았을 때, 정격 부하인 50kW를 30% (39A, 21A) 차이를 두고 인가하여 출력 전압 불평형이 이루어 짐을 확인하였고, 그 후 이를 보상하기 위해서 보상 알고리즘을 적용하였다. 보상 알고리즘이 적용된 후 출력 전압이 평형으로 제어 되는 것을 확인하였다.

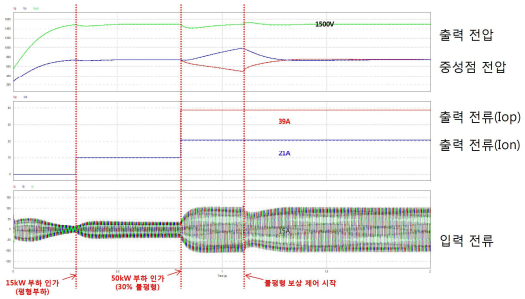


그림 3 불평형 제어 시뮬레이션
Fig. 3 Simulation result of the unbalance compensation

## 3. 실험 결과

표 1 NPC 정류기의 설계값
Table 1 The system parameters of the NPC rectifier

| Specifications | Values |
|---|---|
| Output Power ($P_o$) | 50kW |
| Output Voltage ($V_o$) | 1500Vdc |
| Output Current ($I_o$) | 33.3Adc |
| Input Line Voltage ($V_{AC}$) | 380Vrms |
| Input Current ($I_{in}$) | 80Arms |
| Inductors ($L$) | 1mH |
| Output Cap. ($C_{o1}$, $C_{o2}$) | 6800uF |
| IGBTs | 400A/1200V |
| Diodes | 400A/1200V |
| Switching Frequency | 13.8kHz |

표 1은 제안하는 컨버터의 설계 값을 나타낸다. 설계된 NPC의 정류기의 출력 정격 용량은 50kW (1500V, 33.3A)이며, 스위칭 주파수는 13.8kHz이다. NPC 정류기의 파워스테이지는 SEMIKRON사의 1200V/400A IGBT인 SKM400GAR12E4, SKM400GB12E4, 그리고 SKM400GAL12E4의 조합을 통하여 구성하였다.

그림 3은 NPC 정류기의 부하별 삼상 입력전류 제어 실험 파형이다. 입력 전압으로 삼상 380Vrms 전원을 넣었을 때, 45kW 부하 조건에서 입력측 삼상 전류파형과 한상의 전압 파형을 측정하였다. 위 그림과 같이 각각의 부하 조건에서 입력 전류가 밸런스되며 잘 제어됨을 실험 파형으로 확인하였다.

그림 4와 5는 NPC 정류기의 부하 언밸런스 조건에서 출력 전압 제어에 대한 실험 파형이다. 실험 조건은 40kW 이상의 부하 조건에서 제안하는 출력 전압 밸런싱 제어기를 적용하여 실험을 진행하였다. 그림 4는 15% 언밸런스 조건, 그림 5는 30% 언밸런스 조건하에서 출력 전압의 변화를 측정하였다. 30% 불평형 조건에서 두 출력 전압의 전압 차이는 34V였으며, 이를 통해 제안하는 출력 전압 밸런스 회로의 성능을 검증하였다.

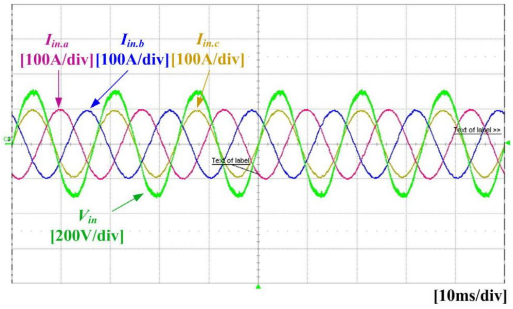


그림 4 90% 부하 조건에서의 정류기 입력 전류 실험파형
Fig. 4 Input current waveforms under 90% load condition

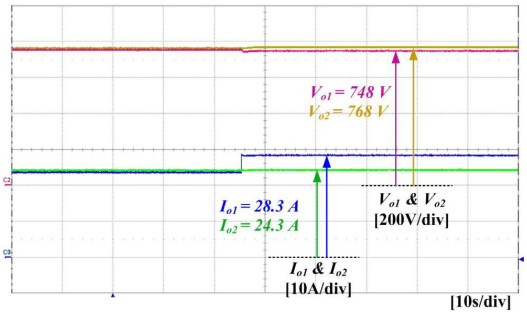


그림 5 15% 불평형 부하 조건에서의 전압 제어 파형
Fig. 5 Waveforms under 15% unbalance load condition

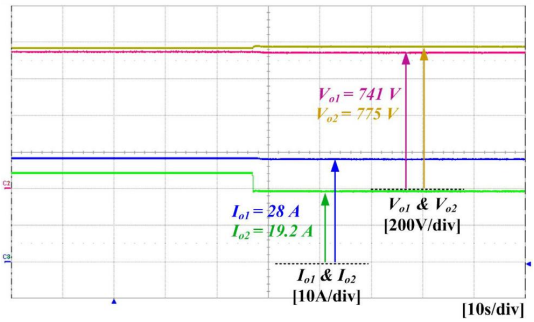


그림 6 30% 불평형 부하 조건에서의 전압 제어 파형
Fig. 6 Waveforms under 30% unbalance load condition

## 4. 결론

본 논문에서는 LVDC 배전에 적합한 NPC 정류기를 제안하고 출력 전압 불평형 현상을 해결하기 위해서 출력전압 밸런스 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 정류기 시스템 및 제어기를 검증하기 위해서 50kVA 용량의 시제품을 제작하였다. 30% 불평형 부하 조건에서 두 출력 전압의 전압 차이는 34V였으며, 이를 통해 제안하는 출력 전압 밸런스 회로의 성능을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

[1] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, Jarmo Partanen, "LVDC Distribution System Protection Solutions, Implementation and Measurements", EPE09

[2] Jih Sheng Lai, and Fang Zheng Peng, "Multilevel Converters A New Breed of Power Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 32, NO. 3, 1996