

MVDC MMC 서브모듈 커패시터 전압 밸런싱 제어 기법 비교 분석

박범수, 김철민, 김종수[†]
 대전대학교 전기공학과

Comparative Analysis of MVDC MMC Submodule Capacitor Voltage Balancing Control Technique

Beom-su Park, Cheol-Min Kim, Jong-Soo Kim[†]
 Department of Electrical Engineering, Daejin University

ABSTRACT

본 논문에서는 MVDC에서 주로 사용되는 토폴로지인 MMC의 서브 모듈 커패시터 전압을 일정하게 제어하기 위해 별도의 커패시터 전압 센싱 없이 제어가 가능한 LSPWM, PSPWM 방식을 비교하여 최적의 제어방식을 제안한다. PSIM 시뮬레이션 프로그램에서 DC 35kV, 하프브리지 구조의 서브 모듈을 가진 단상 MMC 회로를 통해 검증하였으며 LSPWM는 14.11%, PSPWM은 11.04%의 THD를 확인하였다.

1. 서론

MVDC는 1.5kV~100kV사이의 전압레벨 및 전송용량을 갖는 직류 선로를 활용한 시스템을 의미하며 MVDC 시스템 기술은 대규모 전력 수용가와 직접 연결되거나 중장거리에서 발전된 대용량 신재생 에너지를 도심 또는 수용가 부근으로 이송하기 위해 수용가에서 사용 가능한 DC 전압으로 변환이 필요하다. 이와 같이 서로 다른 전력망 사이에 전력 시스템의 유연성을 확보하기 위한 다양한 전력변환장치가 요구되며 이를 컨버터 스테이션이라고 정의하고 있다.^[1]

컨버터 스테이션에 일반적으로 사용되는 토폴로지 중 MMC(Modular Multilevel Converter)는 스위칭 소자로 구성된 Half-Bridge 형태의 서브모듈을 직렬로 연결하여 구성하고 있다. MMC의 동작에서 중요하게 다루어지는 것은 원하는 정현파 형태의 출력을 내기 위해서 각 SM의 균등한 커패시터 전압을 유지하는 것이다. 본 논문에서는 MVDC에서 MMC 서브모듈 커패시터 전압 밸런싱을 위한 제어 방식을 그림 1과 같은 단상 MMC 회로에서 적용하여 출력전압 THD 비교를 통해 분석한다.

2. MMC 서브모듈 커패시터 전압 밸런싱

2.1 MMC 서브모듈 커패시터 전압 불균형

MMC의 경우 직렬로 연결되어 있는 서브모듈 특성으로 인해 상호간에 위상차가 존재하여 같은 암 내의 서브모듈마다 서로 다른 전류가 흐른다. 이러한 상이한 전류는 커패시터 전압간의 불균형을 발생시킨다. 서브모듈의 커패시터에 인가되는 전압은 식 1과 같이 표현할 수 있다. 전류 크기의 변화가 없을 경우 시간에 따른 전압의 변화량이 일정하여 불균형의 폭은 시

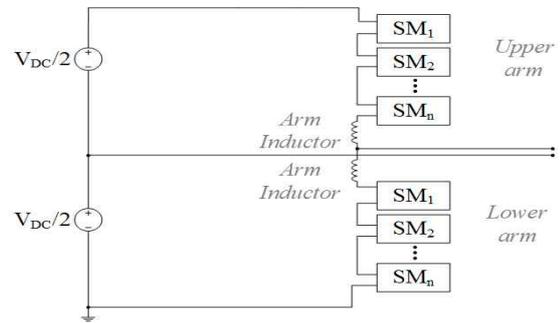


그림 1 단상 MMC 회로
 Fig. 1 Single Phase MMC Circuit

$$V_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(\tau) d\tau + V_c(0) \quad (1)$$

간에 따라 증가하게 된다. 따라서 불균형을 제거하기 위한 제어가 필수적이다.^[2]

2.2. MMC 서브모듈 커패시터 전압 제어 방식

MMC 서브모듈 커패시터 전압 제어를 위한 방식으로는 Multilevel carrier based PWM 방식 혹은 NLC(Nearest Level Control) 방식이 있다. Multilevel carrier based PWM의 경우 LSPWM(Level Shifted PWM), PSPWM(Phase Shifted PWM) 방식으로 나뉜다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 LSPWM은 셀의 Carrier마다 레벨 차이가 존재하여 전압 지령이 각 서브 모듈의 셀이 아닌 전체 셀에 적용됨으로서 전압 지령의 크기에 따라 각 셀의 스위칭 조건이 달라진다. PSPWM은 그림 2(b)처럼 각 셀의 동일한 크기와 주파수의 carrier가 일정한 위상 차이로 구성되어 있어 인버터의 출력 전압은 각 서브모듈 커패시터의 전압 크기만큼 스텝을 이루어 전압을 출력한다. 마지막으로 NLC는 그림 2(c)와 같이 기준신호에 가까운 크기의 계단 파형을 형성하여 제어하는 방식이다.

각 제어방식의 장단점으로는 LSPWM은 PSPWM과는 다르게 지령 전압과 출력 전압에 위상 차이가 존재하지 않다는 점이 있지만 전압 불균형이 초래된다는 단점이 존재한다. 본 논문에서는 각 셀 간의 동일한 전력 소모를 하는 스위칭 패턴을 위해 각 셀의 carrier 레벨을 순환시키는 형태를 통해 각 셀간의 스위칭 조건을 동일하게 구현하여 전압 불균형의 단점을

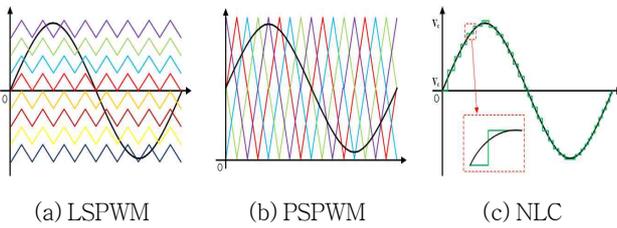


그림 2 MMC 서브모듈 커패시터 전압 제어 방식
Fig. 2 MMC Submodule Capacitor Voltage Control Method

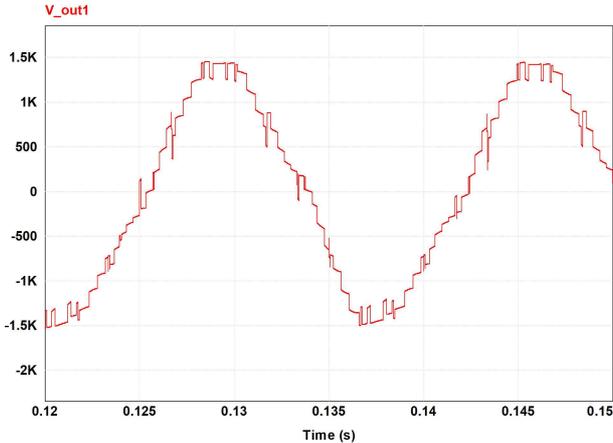


그림 3 LSPWM 출력 전압 파형
Fig. 3 LSPWM Output Voltage Waveform

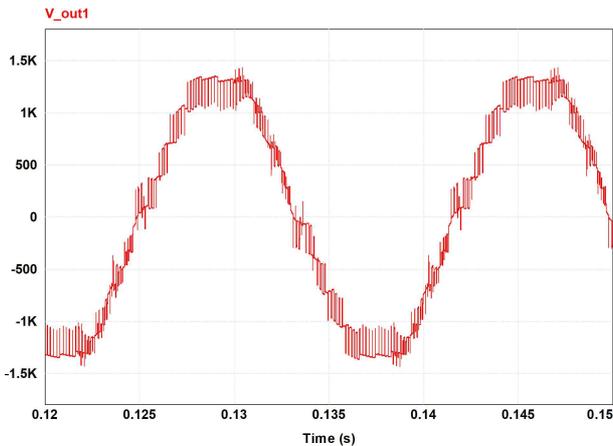


그림 4 PSPWM 출력 전압 파형
Fig. 4 PSPWM Output Voltage Waveform

개선하였다.

PSPWM은 PWM 시 사용되는 각 셀의 전압 지령과 carrier 주파수의 크기가 동일하여 셀 간의 동등한 전력 분배가 되나 위에 언급했듯이 지령전압과 출력전압의 위상차가 존재할 수 있다.^[3] NLC 방식은 스위칭 패턴의 구현이 간단하고 스위칭 주파수가 낮아 스위칭 손실이 적은 장점을 갖지만 전압 변조지수에 따라 출력전압의 동작레벨이 정해지므로 동작레벨이 낮을 경우 THD가 높은 단점이 존재한다. MVDC의 경우 서브모듈이 적게는 10개만 사용하는 경우도 존재하기에 NLC의 동작레벨이 낮아지게 된다. 또한 위의 LSPWM, PSPWM과 다르게 전압 검출 및 Sorting Algorithm을 통해 스위칭 동작을 위한 선별작업이 추가적으로 필요하다. 따라서 시뮬레이션을 통해

표 1 제어방식에 따른 THD

Table 1 THD according to control method

Modulation Technique	THD
LSPWM	14.11 [%]
PSPWM	11.04 [%]

전압 센싱 및 서브모듈 커패시터의 전압 정렬 알고리즘이 필요 없는 LSPWM과 PSPWM의 THD를 비교하였다.

2.3 제어방식에 따른 THD 비교

PSIM을 통해 DC입력 35kV 입력 조건에서 11레벨 하프 브릿지 서브모듈을 이용한 모듈형 멀티레벨 인버터를 LSPWM과 PSPWM 서브모듈 스위치 제어 방식을 통해 시뮬레이션을 진행하였다. 60[Hz]의 Sin 파형을 기준으로 Carrier 주파수는 600[Hz]로 10배의 주파수 값을 가지고 PWM 신호를 내었다.

LSPWM의 출력 전압 파형은 그림 3과 같이 나타났으며 제어 방식 특성상 그림 4의 PSPWM 보다 스위칭 횟수는 적은 것을 확인할 수 있었다. PSPWM의 출력 전압 파형은 그림 4와 같이 나타나며 LSPWM 보다 많은 스위칭 패턴이 나타나는 출력 파형을 확인할 수 있다. LSPWM의 THD는 14.11[%], PSPWM의 THD는 11.04[%]로서 LSPWM보다 3[%]정도 우수한 양상을 보였다.

3. 결론

본 논문에서는 MVDC에서 주로 사용되는 MMC 토폴로지에 서 별도의 서브모듈 커패시터 센싱 및 제어가 필요 없는 LSPWM 및 PSPWM 방식에 대해 PSIM 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 단상 MMC 회로를 통해 THD 측면에서 비교 분석하였다. LSPWM의 출력 전압 파형은 14.11 [%], PSPWM의 출력 전압 파형은 11.04 [%]로 3[%]가량 우수한 것으로 확인되었다. 추후, 정확한 검증을 위해 시뮬레이션 내용을 바탕으로 실험을 진행할 예정이다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022550000120, 특고압 직류배전용 계측진단 및 신뢰성 평가 기술개발)

참고 문헌

- [1] 김래영, "MVDC 배전망 구축 및 운용을 위한 전력기기 개발 현황". 전기의세계, 70(10), 14-18, 2021
- [2] 이의재, 김석민, 이교범. "반도체 변압기용 모듈형 멀티레벨DC-DC 컨버터의 선택적인 전압 균형 제어", 전기전자학회논문지, 23(2), 652-658.
- [3] M. Angulo, P. Lezana, S. Kouro, J. Rodriguez and B. Wu, "Level-shifted PWM for Cascaded Multilevel Inverters with Even Power Distribution," 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando, FL, USA, 2007, pp. 2373-2378