

# 평균 스위칭 절환 회수를 고려한 모듈형 멀티레벨 컨버터 HVDC의 전압 평형 알고리즘

김시환, 정홍주, 김래영\*  
한양대학교

## A Voltage Balancing Algorithm for MMC HVDC Considering Average Switching Commutation

Si Hwan Kim, Hong Ju Jung, Rae Young Kim\*  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter ; MMC) HVDC의 각 모듈 평균 스위칭 절환 회수를 고려한 커패시터 전압 평형 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 MMC HVDC 시스템에서 각 모듈을 선택적으로 운전하는 것은 모듈간 커패시터 전압 평형 유지가 가능하나, 모듈간 스위칭 절환 수의 불평형이 발생하는 단점이 있다. 본 논문에서는 각 모듈이 스위칭 절환 수의 평형을 유지하면서 직류 전압 평형을 유지하는 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션으로 유효성을 검증하였다.

### 1. 서론

전력 수요의 증가와 전력용 반도체 소자의 발전은 대전력 고전압 전력 변환 분야에서 전압형 멀티레벨 컨버터 (Multilevel Converter)에 대한 관심을 증대시키고 있으며, 최근에는 대전력 고전압형 HVDC 시스템을 위한 모듈형 멀티레벨 컨버터 (Modular Multilevel Converter; MMC) HVDC에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MMC HVDC는 원하는 출력 레벨 수만큼 모듈 (Submodule; SM)을 증가시켜 출력 전압의 레벨을 증가시킬 수 있고 SM 고장 시 여유 SM (Redundancy Submodule)을 투입함으로써 고장 사고에 대한 안전성을 높일 수 있다.<sup>[1]</sup> MMC HVDC가 정현파에 가까운 출력 전압을 형성하기 위해서는 각 SM 커패시터가 동일한 전압 값을 유지해야 한다. MMC HVDC에서는 암 전류의 방향에 따라 SM을 선택적으로 운전하는 방법으로 SM 간 커패시터 전압 평형을 유지할 수 있다. 또한 SM 간 커패시터 전압 평형을 유지하면서 스위칭 절환 수를 줄이기 위한 방법도 소개되어있다.<sup>[2]</sup> 앞서 제안된 방법은 SM 스위칭 절환 회수를 줄일 수는 있으나 SM간 스위칭 절환 회수의 불평형에 대한 고려가 되어있지 않기 때문에 SM 간 스위칭 절환 회수의 불평형이 발생하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 SM의 평균 스위칭 절환 회수를 고려한 전압 평형 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션으로 유효성을 검증한다.

### 2. MMC HVDC 전압 평형 알고리즘

#### 2.1 MMC HVDC 시스템 구성 및 동작 특성

그림 1은 MMC HVDC와 SM의 회로 구성도이다. MMC HVDC는 3 개의 상 레그 (Leg)로 구성되어 있으며 각 레그는 상/하단 암 (Arm)으로 구성된다. 각 암은  $n$  개의 SM과 하나의 인덕터가 직렬로 연결된 구조를 가지며, 통상 SM은 2개의 스위치와 2개의 다이오드, 하나의 커패시터로 구성된다.

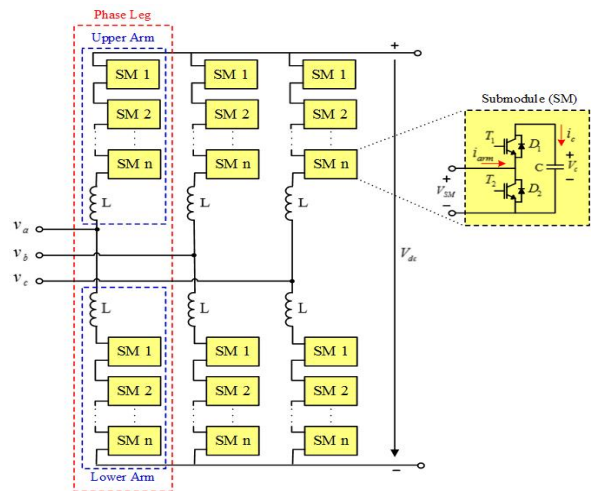


그림 1. MMC HVDC 및 Submodule 회로 구성도.  
Fig. 1. MMC HVDC and Submodule circuit configuration.

SM의 스위치  $T_1$ 과  $T_2$ 는 상보적으로 동작 하며, 표 1은 SM의 동작을 나타낸 것이다. 표 1에서 전류 방향에 관계없이 스위치  $T_1$ 이 on 상태일 때 SM 커패시터 전압 ( $V_c$ )이 SM 출력 터미널에 나타남을 알 수 있다. 또한, SM 커패시터 전류 ( $i_c$ )의 방향은 스위치  $T_1$ 에 의해 결정되며, SM 커패시터를 충/방전시키기 위해서는 암 전류 ( $i_{arm}$ )의 방향에 따라 SM 스위치  $T_1$ 의 on/off 상태를 결정해야 함을 알 수 있다.

표 1. SM 동작  
Table 1. SM operation

$i_{arm}$	$T_1$	$T_2$	$i_c$	$V_{SM}$
$> 0$	off	on	0	0
$> 0$	on	off	$> 0$	$V_c$
$< 0$	off	on	0	0
$< 0$	on	off	$< 0$	$V_c$

## 2.2. 스위칭 절환 회수를 고려한 전압 평형 알고리즘

SM 커패시터의 전압 평형을 유지하기 위해 사용되는 기본적인 방법은 주기적으로 SM 커패시터 전압과 암 전류를 측정 한 후, 암 전류가 양의 방향으로 흐르면 커패시터 전압이 가장 낮은 SM부터 스위치  $T_1$ 의 on 신호를 생성하는 것이다. 반대로 암 전류가 음의 방향으로 흐르면 커패시터 전압이 높은 SM부터 SM 스위치  $T_1$ 의 on 신호를 생성한다.<sup>[1]</sup>

일반적으로 가장 높거나 낮은 커패시터 전압을 갖는 SM을 찾기 위해 특정 주기마다 SM들을 정렬하게 되면 불필요한 스위칭 절환이 일어날 수 있다. SM 스위치의 불필요한 절환을 제한하고 SM 커패시터 간의 전압 평형 유지를 위해 SM 커패시터들의 최대 전압과 최소 전압의 차이가 미리 정의된 특정 전압 밴드  $\Delta V_{max\_ref}$  이상이 되면 SM들을 정렬한다.<sup>[2]</sup>

$$\Delta V_{max} = V_{c\_max} - V_{c\_min} > \Delta V_{max\_ref} \quad (1)$$

여기서,  $V_{c\_max}$  와  $V_{c\_min}$  은 SM 커패시터 전압의 최대값과 최소 값이다. 식 (1)의 조건을 만족하면 앞서 언급된 기본적인 전압 평형 알고리즘을 수행하게 되며, 식 (1)의 조건을 만족하지 않으면 이전의 스위치 상태를 고려하여 SM 스위치  $T_1$ 의 on/off 신호를 결정한다. 현재 시점에서 스위치  $T_1$ 을 on 시켜 줄 SM 수가 증가한다면 스위치  $T_1$ 이 off 되어 있는 SM 중 암 전류 방향에 따라  $T_1$ 의 on 신호를 생성한다. 만약 스위치  $T_1$ 을 on 시켜 줄 SM 수가 감소한다면  $T_1$ 이 on 되어 있는 SM 중 암 전류 방향에 따라  $T_1$ 의 off 신호를 생성한다.

앞서 언급된 전압 균형 알고리즘을 적용할 경우 스위칭 절환 회수를 조절하면서 SM 커패시터 전압의 평형을 유지할 수 있으나, 각 SM의 스위치 스트레스를 고르게 가져갈 수 없다. 스위칭 절환 회수를 고려하지 않을 경우 각 SM들의 스위칭 절환 회수가 불평등해지고 스위치 스트레스가 편중되어 장기적으로 MMC HVDC 동작에 문제를 야기할 수 있다.

스위칭 절환 회수를 고려하기 위해 기존의 전압 밴드  $\Delta V_{max\_ref}$ 에 새로운 전압 밴드  $\Delta V_{mean}$ 를 추가로 도입한다.

$$V_{mean\_min} = V_{c\_min} + \Delta V_{mean} \quad (2)$$

$$V_{mean\_max} = V_{c\_max} - \Delta V_{mean} \quad (3)$$

식 (1)을 만족하여 SM들을 정렬하게 될 때, 암전류가 양의 방향으로 흐르게 되면 식 (2)의  $V_{mean\_min}$  값보다 큰 전압을 갖는 SM들의 스위치  $T_1$ 은 off 신호를 생성하고  $V_{mean\_min}$  값보다 작은 전압을 갖는 SM들 중 누적 스위칭 절환 회수가 적은 SM들의 스위치  $T_1$ 에 on 신호를 생성한다. 반대로 암전류가 음의 방향으로 흐르게 되면 식 (3)의  $V_{mean\_max}$  값보다 작은 전압을 갖는 SM들의 스위치  $T_1$ 은 off 신호를 생성하고  $V_{mean\_max}$  값보다 큰 전압을 갖는 SM들 중 누적 스위칭 절환 회수가 적은 SM들의 스위치  $T_1$ 에 on 신호를 생성한다. 식 (1)을 만족하지 않을 경우, 기존의 알고리즘대로 적용한다. 제안한 알고리즘에서  $\Delta V_{mean}$  값의 크기에 따라 평균 스위칭 절환 회수의 차이는 가변될 수 있으며, 제안한 알고리즘을 적용함으로써 각 SM들의 스위칭 절환 회수의 불평형을 억제할 수 있다.

## 2.3 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 11 레벨 MMC HVDC 시스템에 대하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 직류단 전압은 1000V, SM 커패시터의 평균 전압은 100V이고 1.5mF의 커패시터를 사용하였다.

그림 2는  $\Delta V_{max\_ref} = 3V$ ,  $\Delta V_{mean} = 1.5V$  에서 시뮬레이션을 한 결과이다. 그림 2 좌측에 10 개의 상단 암 SM 커패시터 전압을 나타내었고, 우측에 최대 스위칭 절환 회수를 갖는 SM과 최소 스위칭 절환 회수를 갖는 SM의 스위칭 절환 회수 차이를 도시하였다. 그림 2(a), (b)의 커패시터 전압 파형으로부터 제안한 알고리즘이 SM 커패시터 전압 평형 유지에 악영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그림 2(a)에서 최대 스위칭 절환 회수를 갖는 SM은 최소 스위칭 절환 회수를 갖는 SM보다 약 50 회 이상 많은 스위칭 회수를 가짐을 알 수 있다. 반면, 제안한 알고리즘을 적용할 경우 최대 스위칭 절환 회수를 갖는 SM과 최소 스위칭 절환 회수를 갖는 SM의 스위칭 절환 회수의 차이가 10회 미만인 것을 확인 할 수 있다.

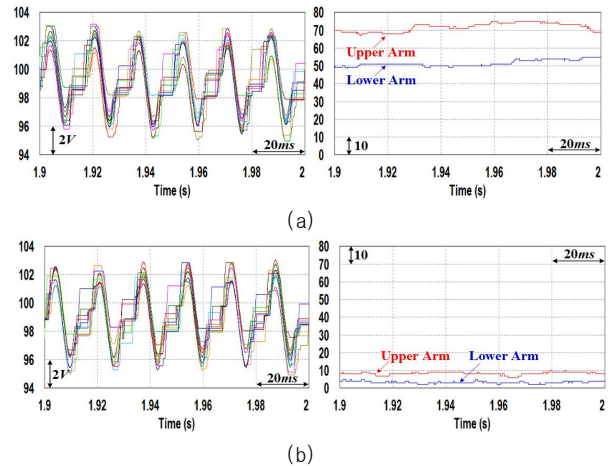


그림 2 상단 암 SM 커패시터 전압과 SM간 스위칭 절환 회수 차이 : (a) 알고리즘 미적용, (b) 알고리즘 적용

Fig. 2 Upper arm SM capacitor voltages and difference of SM switching commutation

## 3. 결론

본 논문에서는 평균 스위칭 절환 회수를 고려한 전압 평형 알고리즘을 제안하였다. MMC HVDC의 기본구성과 동작 특성을 확인하고 전압 평형 알고리즘의 기본 원리에 대하여 검토하였다. MMC HVDC의 SM 간 스위칭 절환 회수의 불평형을 억제하기 위해 누적 스위칭 절환 회수를 고려한 전압 평형 알고리즘을 제안하였다. PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] A. Lesnicar, R.Marquardt "A new modular voltage source inverter topology", Presented at the EPE, Toulouse, France, Sep. 2003.
- [2] Q. Tu, Z. Xu, "Impact of Sampling Frequency on Harmonic Distortion for Modular Multilevel Converter", IEEE Trans. Power Del., Vol. 26, No. 1, Jan. 2011.