

직접 변조 방식 MMC의 전압 맥동 제어기가 암 캐패시터 전압 자연 밸런싱에 미치는 영향 분석

정재정, 설승기
서울대학교 전기·정보공학부

Analysis of Effect of Capacitor Voltage Fluctuation Suppression Controller on Natural Arm Capacitor Voltage Balancing of a Direct Modulated MMC

Jae-Jung Jung, Seung-Ki Sul

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

직접 변조 방식(direct modulation)을 사용한 Modular Multilevel Converter(MMC)의 6개의 암 캐패시터 전압의 자연 균형화(Natural Balancing) 현상은 여러 연구 및 실험에서 관측되고 있다. 또한, 이러한 현상의 원인뿐만 아니라, 시스템 파라미터와 밸런싱 동특성사이의 관계가 수학적 분석을 통하여 검증되었다. 직접 변조 방식은 간접 변조 방식(indirect modulation)과 달리, 입/출력 AC 및 DC 측 제어기 외에 암 캐패시터 전압 밸런싱을 위한 순환전류 제어기가 존재하지 않지만, 캐패시터 맥동 저감을 위해 일반적으로 캐패시터 2 고조파 맥동 제어기를 필요로 한다. 본 논문에서는 이러한 직접 변조 방식을 사용한 MMC의 2고조파 전압 맥동 제어기가 암 캐패시터 전압 자연 밸런싱에 미치는 영향을 고찰하고 분석한다. 또한, 2 고조파 전압 맥동 제어기의 유무에 따른 전압 자연 밸런싱의 동특성에 대한 비교를 400MW MMC full-scale 시뮬레이션을 통해 살펴보도록 한다.

1. 서론

모듈형 멀티레벨 컨버터(Modular Multilevel Converter; MMC)의 제어 방식은 일반적으로 간접 변조 방식(indirect modulation)과 직접 변조 방식(direct modulation)으로 분류할 수 있다[1]. 그 중, 직접 변조 방식은 제어의 간단함으로 인해 널리 사용되는 방식 중의 하나이다. 직접 변조 방식에서는 각 암의 투입 셀의 개수를 결정하는데 있어, 각 셀 DC 단 전압을 고정된 하나의 값을 가지는 정격 DC 단 전압으로 간주하여 매순간 상단 암과 하단 암의 투입 셀의 합이 일정한 값을 가지도록 제어하는 방식을 말한다. 이러한 직접 변조 방식의 가장 큰 단점은 간접 변조 방식에서는 존재하지 않는 2 고조파 셀 전압 맥동으로 인해 순환전류의 2 고조파 성분의 존재이다. 2 고조파 순환전류의 크기를 억제하기 위해 상당한 암 인덕터를 필요로 하거나, 추가적인 2 고조파 억제 제어기가 필요하다. 직접 변조 방식을 사용한 MMC의 6개의 암 캐패시터 전압 자연 밸런싱 현상은 여러 연구 및 실험에서 다루어졌으며, 현상의 원리와 밸런싱 동특성에 대한 수학적 분석도 이루어졌다 [2]-[3]. 본 논문에서는 앞서 언급한, 셀 캐패시터 전압 맥동으로 인해 발생하는 2 고조파 순환전류 발생을 억제하기 위한 2 고조파 순환전류 억제 제어기가 암 캐패시터 전압 자연 밸런싱에 미치는 영향을 분석한다. 이러한 분석을 바탕으로 2 고조파 순환전류 억제 제어기의 유무에 따른 동특성을 400MW full-scale 시뮬레이션을 통해 살펴본다.

2. 직접 변조 방식을 이용한 MMC 제어 방법

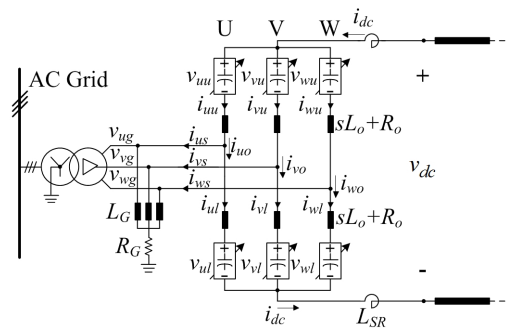


그림 1. MMC 등가 회로 구성도

그림 1은 전압형 HVDC를 위한 MMC 시스템의 등가 회로 구성을 보여준다. MMC는 세 개의 레그로 이루어지며, 각 레그는 두 개의 상/하단 암으로 구성되어 있다. 각 암은 DC단 전압 레벨에 따라 수많은 셀의 직렬연결로 이루어진다. 각 셀은 통상 두 개의 스위치와 하나의 캐패시터로 반파 인버터(half bridge inverter)의 구조를 가지며, DC단 단락 사고 등의 상황을 고려한 전파 인버터(full bridge inverter)나 그 밖의 여러 회로구조를 가지기도 한다. 각 암당 N개의 셀을 가정하였을 때, 정격 셀 캐패시터 전압 지령은 (1)과 같이 설정된다.

$$V_{cell}^* = \frac{V_{dc, rated}}{N} \tag{1}$$

직접 변조 방식에서는 x 상 상/하단 암 출력 전압 지령은 (2)와 같다. 여기서 x 는 u, v, w 상의 하나를 의미하며, v_{xs}^* 는 AC 계통 전류 제어를 위한 MMC의 AC단 출력 전압이다. 따라서 상/하단 암의 셀 투입 비(insertion ratio)는 (3)과 같다.

$$\begin{cases} v_{xu}^* = \frac{V_{dc, rated}}{2} - v_{xs}^* \\ v_{xl}^* = \frac{V_{dc, rated}}{2} + v_{xs}^* \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} n_{xu}^* = (\frac{V_{dc, rated}}{2} - v_{xs}^*) / V_{dc, rated} \\ n_{xl}^* = (\frac{V_{dc, rated}}{2} + v_{xs}^*) / V_{dc, rated} \end{cases} \tag{3}$$

근사 계단 변조(Nearest Level Modulation; NLM) 방식을 가정하였을 때, (3)의 셀 투입 비에 의해 실제 상/하단 암의 순시적인 셀의 투입 개수는 (4)와 같다. 여기서, $[\]$ 는 반올림 함수를 의미한다. 또한, (5)와 같이, 각 상의 각 레그에 투입되는 셀의 개수의 합은 항상 N개로 일정하다.

$$\begin{cases} N_{xu} = \frac{N}{2} - \left[\frac{v_{xs}^*}{V_{dc, rated}} \right] \\ N_{xl} = \frac{N}{2} + \left[\frac{v_{xs}^*}{V_{dc, rated}} \right] \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{xu} + N_{xl} = N. \quad (5)$$

정렬(sorting) 알고리즘 등의 적절한 알고리즘에 의해 각 압내의 셀 캐패시터 전압이 모두 동일하고, 순시적인 투입 압 전압이 연속적인 값으로 가정할 수 있을 만큼 각 압의 셀의 개수가 충분하며 디지털 컨트롤러의 샘플링 주파수가 충분히 크다고 가정한다면, (3)과 (4)는 같은 값을 가진다고 간주할 수 있다. 따라서, (3)에 의해 순시적인 각 압의 실제 합성 전압은 (6)과 같이 나타낼 수 있다. $v_{c,xu}^\Sigma$ 와 $v_{c,xl}^\Sigma$ 는 x -상의 각각 상/하단 압 셀 캐패시터 전압의 합이다. 식 (6)에서 보듯이 각 압의 실제 합성 전압에는 DC 및 기본파 성분 외에 작지 않은 2고조파 성분이 존재함을 알 수 있다. 상/하단 압 합성 전압의 2고조파 성분은 셀 캐패시터의 2고조파 맥동을 야기하며, 상/하단 간에 크기와 위상이 같으므로 순환전류에 2고조파 성분으로 나타난다.

$$\begin{cases} v_{xu} = n_{xu}^* v_{c,xu}^\Sigma = \left(\frac{1}{2} - \frac{v_{xs}^*}{V_{dc, rated}} \right) \times v_{c,xu}^\Sigma \\ v_{xl} = n_{xl}^* v_{c,xl}^\Sigma = \left(\frac{1}{2} + \frac{v_{xs}^*}{V_{dc, rated}} \right) \times v_{c,xl}^\Sigma \end{cases} \quad (6)$$

3. 2고조파 순환 전류 억제 제어가 압 캐패시터 전압 밸런싱에 미치는 영향 고찰

앞서 언급한 바와 같이, 직접 변조 방식을 사용한 MMC에서는 순환전류 2고조파 성분을 억제하기 위한 제어기를 필요로 한다. 순환전류 2고조파 성분 억제제어기는 동기 좌표 변환을 이용한 비례-적분 제어기(proportional and integral controller)나 비례-공진 제어기(proportional and resonant controller) 등을 이용하여 구현될 수 있다. 그림 2(a)에서는 그 일례로 비례-공진 제어기 구성을 나타낸다. 비례-공진 제어기의 입력부의 지령은 0이고, 순환전류를 궤환한다. 그림 2(b)는 그림 2(a)의 제어기에서 점선 부분을 등가적으로 다시 표시하였다. 이는 순환전류에 대하여 능동 댐핑(active damping)을 추가한 형태를 가지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 비례 제어 이득(K_p)이 능동 댐핑(R_{active}) 역할을 한다. 실제 암 등가 저항(R_O)와 함께 궤환 제어에 의해 R_{active} 를 추가함으로써 전체 암 등가 저항이 R_{active} 만큼 늘어난 효과를 만들 수 있으며 이를 통하여 시스템의 고유 특성을 변화시킬 수 있다. 즉, 비례-공진 제어기의 비례 제어 이득을 조정함으로써 암 캐패시터 전압 시스템 균형 제어에 기여하는 기본파와 순환전류에 대한 암 등가 저항 성분을 변화시켜 균형제어기의 수렴 속도와 특성을 개선시킬 수 있다.

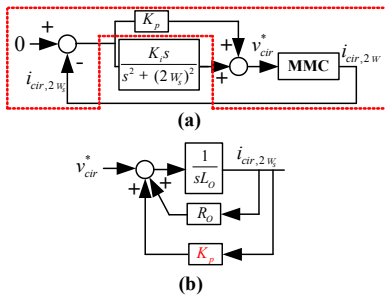


그림 2. 제어기 다이어그램: (a) 2고조파 순환전류 억제 제어기, (b) 그림2(a)의 점선 부분의 등가 회로도.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 분석하고 고찰한 원리와 동특성을 검증하기 위해 400MW full-scale MMC-HVDC 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 참고 문헌 [3]의 시스템과 시뮬레이션 구성 및 파라미터가 동일하다. 그림 3은 단상 단락 사고 시의 MMC의 AC단 계통전압, 각 레그 상/하단 암 에너지 차이, 그리고 순환전류의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 순환전류 파형에서 알 수 있듯이, 그림 3(a)는 2고조파 순환전류 제어기를 포함하지 않고 제어하는 경우이고, 그림 3(b)는 포함하는 경우의 파형이다. 단락 사고 시 2고조파 순환전류 제어기를 포함하는 경우에서 밸런싱 제어의 동특성이 훨씬 뛰어난 것을 볼 수 있으며, 따라서, 2고조파 순환전류 제어기의 비례 이득이 능동 댐핑의 역할을 하는 것을 확인할 수 있었다.

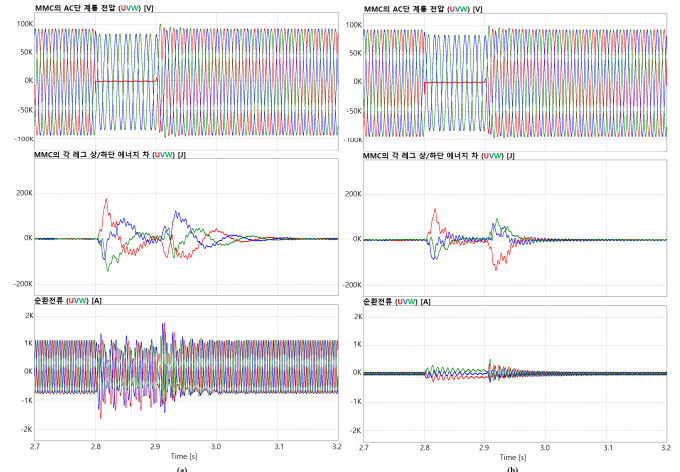


그림 3. 시뮬레이션 결과 파형:(a)2고조파 순환전류 억제 제어를 수행하지 않는 경우, (b)2고조파 순환전류 억제 제어를 수행하는 경우.

5. 결론

본 논문에서는 직접 변조 방식을 사용한 MMC-HVDC에서의 2고조파 전압 맥동 제어가 암 캐패시터 전압 자연 밸런싱에 미치는 영향을 고찰하고 분석하였다. 즉, 직접 변조 방식을 사용함으로써 발생하는 2고조파 순환전류의 발생을 억제하기 위한 2고조파 순환전류 억제제어기의 비례 이득이 암 캐패시터 전압시스템 균형제어에 기여하는 기본파와 순환전류에 대한 암 등가 저항 성분을 변화시켜 균형제어기의 수렴 속도와 특성을 개선시킬 수 있다는 점을 이론적으로 고찰하였다. 또한, 이를 검증하기 위하여 full-scale 시뮬레이션을 수행하였고, 2고조파 순환 전류 억제 제어기의 유무에 따른 암 캐패시터 전압 밸런싱 동특성에 대한 차이를 확인하였다.

참고 문헌

- [1] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," in IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 30, pp. 37-53, 2015.
- [2] L. Hamefors, A. Antonopoulos, S. Norrga, L. Angquist, H.P. Nee, "Dynamic analysis of modular multilevel converters," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 2526-2536, 2013.
- [3] S. Cui, J. J. Jung, Y. Lee and S. K. Sul, "Principles and dynamics of natural arm capacitor voltage balancing of a direct modulated modular multilevel converter," 2015 ICPE-ECCE Asia, Seoul, 2015, pp. 259-267.