

AC 계통 불평형 조건에서 출력동요 저감을 위한 MMC 내부 동적특성 분석

이상중¹, 강제식¹, 강대욱¹, 박영주¹, 정지훈²

한국전기연구원¹, 울산과학기술원²

Analysis of Internal Dynamics in Modular Multilevel Converter for Reducing Power Oscillation Under Grid Voltage Distortion

Sang-Jung Lee¹, Jaesik Kang¹, Dae-Wook Kang¹, Young-Joo Park¹, Jee-Hoon Jung²

¹Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

²Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

본 논문은 AC 계통 불평형 발생 시 출력전력의 동요를 저감시키기 위한 POD 전략을 수행하는 MMC-HVDC 시스템의 내부 동적상태를 분석하였다. POD 전략을 통해서 MMC 출력전류의 역상분을 제어하여 계통에 주입되는 유효 전력의 발진을 제거함으로써, MMC-HVDC 시스템이 연계된 인근 계통에 공급 신뢰도를 향상시킬 수 있다. POD 전략에서 유효 전력만 출력할 경우, MMC의 각 상에는 동일한 전력이 흐른다. 반면, 계통 전압 보상을 위해서 무효 전력을 동시에 공급할 경우, 각 상에 흐르는 전력은 불균형해지기 때문에 MMC의 암전류 불평형이 발생하여 스위치 소자의 정격 용량 및 열 스트레스를 증가시켜 MMC의 안정성을 저해시킨다. 본 논문은 POD 전략을 수행하기 위해서 무효 전력이 MMC 암 전류에 미치는 영향을 분석하였으며, 200 MW MMC-HVDC 모델을 바탕으로 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 툴을 이용하여 분석 결과를 검증하였다.

1. 서론

Modular Multilevel Converter(MMC)를 기반으로 한 HVDC 시스템은 대 전력을 효율적으로 전송할 수 있는 할 수 있는 유망한 솔루션이다. 계통 연계 컨버터에서와 마찬가지로 HVDC 시스템에서도 계통 고장은 발생 가능하며, 이는 계통 전압 불균형 현상을 초래한다. HVDC-MMC는 그리드 코드와 신뢰성 요건을 충족하기 위하여 계통 불균형 현상에서도 지속적인 계통 지원 운전을 수행해야 한다. 일반적인 계통 연계 컨버터와 같이 MMC-HVDC 시스템 또한 Power Oscillation Damping(POD), 또는 Balanced Positive-Sequence Control (BPSC) 전략을 바탕으로 계통 지원을 수행한다. POD 전략은 MMC 출력 전류의 역상분 성분을 제어하여 계통에 주입되는 유효 전력의 발진을 제거하는 기법으로, 계통 시스템 안정화를 위해 사용되는 전략이다. POD 전략에서 유효 전력만 출력할 경우, MMC 각 상에는 동일한 전력이 흐른다. 반면, 무효 전력을 동시에 출력할 경우, 각 상에 흐르는 전력이 불균형해지는 문제가 발생한다. 이는 특정 상의 스위치 소자의 정격 용량 및 열 스트레스를 증가시켜 MMC의 안정성을 저해한다. 본 논문은 200 MW MMC-HVDC 모델을 바탕으로, POD 전략에서 무효 전력이 MMC 암 전류에 미치는 영향을 분석하였다. 암

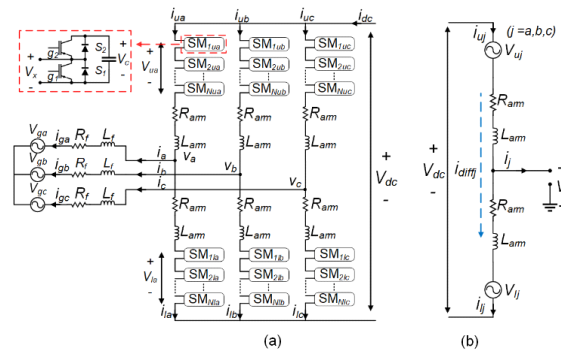


그림1 MMC 회로 기본 구조: (a) MMC 회로 다이어그램, (b) MMC 단상 등가회로.

Fig.1 Basic structure of MMC: (a) Circuit diagram of the MMC (b) Single-line equivalent circuit of the three-phase MMC..

전류 분석 결과는 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 툴을 이용하여 검증하였다.

2. 계통 불균형 상황에서 MMC POD 제어전략

그림 1은 MMC 회로 구조를 나타내고 있다. 각 암은 N 개의 서브 모듈이 직렬로 연결되는 구조를 가지며, 상의 전압의 크기 및 위상을 조절하여 전력 흐름을 제어한다. [1]에서는 계통 불균형 상황에서 단일 계수 k_{pq} 를 이용하여, BPSC 또는 POD 전략을 수행할 수 있는 제어기법을 제안하였다. k_{pq} 계수는 $[-1, 1]$ 사이 값을 가지며, k_{pq} 가 -1 인 경우 POD 전략을 수행 그리고 0 인 경우 BPSC를 수행한다. k_{pq} 를 이용한 유효 전류 (i_p) 및 무효 전류(i_q) 지령 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$i_{pq} = \frac{S \cos \phi}{\|v^+\|^2 + k_{pq} \|v^-\|^2} (v^+ + k_{pq} v^-) + \frac{S \sin \phi}{\|v^+\|^2 - k_{pq} \|v^-\|^2} (v^+ - k_{pq} v^-) \quad (1)$$

여기서 v^+ 는 계통 전압의 정상분을 나타내며, v^- 는 역상분을 나타낸다. v^+ 는 v^+ 비해 90° 뒤쳐지지만, 역상분의 회전 방향은 정상분과 반대이므로 v^- 는 v^- 비해 90° 앞선다.

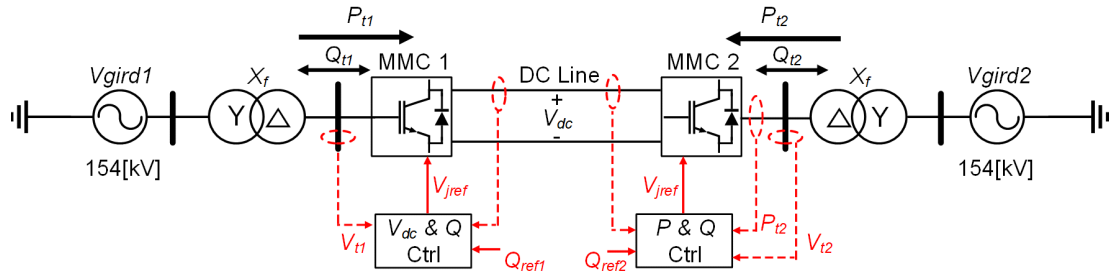


그림2 200 MW Poin-to-Point(PTP) MMC-VSC 시스템 블록다이어그램.
Fig.2 Block diagram of a 200 MW Point-to-Point MMC-VSC System.

3. POD 제어전략에서 무효전력이 암 전류에 미치는 영향

POD 전략에서 (1)을 기준으로 전류 성분을 정상분 그리고 역상분으로 분리할 수 있으며, 이를 고정좌표계 기준으로 수식 (2)-(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{i}_p^+ = \vec{i}_{(\alpha)p}^+ + \vec{i}_{(\beta)p}^+ = \frac{P_{ref}}{\|v^+\|^2 - \|v^-\|^2} (v_{\alpha}^+ - v_{\beta}^+) \quad (2)$$

$$\vec{i}_p^- = \vec{i}_{(\alpha)p}^- + \vec{i}_{(\beta)p}^- = \frac{P_{ref}}{\|v^+\|^2 - \|v^-\|^2} (v_{\alpha}^- - v_{\beta}^-) \quad (3)$$

$$\vec{i}_q^+ = \vec{i}_{(\alpha)q}^+ + \vec{i}_{(\beta)q}^+ = \frac{Q_{ref}}{\|v^+\|^2 + \|v^-\|^2} (v_{\alpha\perp}^+ + v_{\beta\perp}^+) \quad (4)$$

$$\vec{i}_q^- = \vec{i}_{(\alpha)q}^- + \vec{i}_{(\beta)q}^- = \frac{Q_{ref}}{\|v^+\|^2 + \|v^-\|^2} (v_{\alpha\perp}^- + v_{\beta\perp}^-) \quad (5)$$

무효전력 지령치가 0인 경우, 오직 유효 전류 성분의 정상분과 역상분에 의해 POD 전략을 위한 전류 지령치가 결정된다. 이 경우에는 각 상에는 동일한 전류가 흐른다. 하지만 무효전력을 함께 공급할 경우, 무효 전류 성분의 정상분과 역상분 성분에 의해 각 상에 흐르는 전류가 불균형해진다. 그림 2는 200 MW PTP MMC 시스템의 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 계통 고장 조건은 Grid 1 Phase A-to-ground 고장으로 가정하였다. 1.2 [s]에 계통 고장이 발생하며, Phase A상 전압 강하는 약 75%이다.

그림 3은 PSCAD/EMTDC 툴을 이용하여, POD 전략 하에 무효전력 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 무효전력 지령치가 0일 경우, 각 상에 흐르는 전류는 동일하다. 하지만, 1.45 [s]에 무효 전력(50 MVAR)이 공급되는 순간, 무효전력에 해당하는 전류 성분에 의해 각 상에 흐르는 전류가 불균형해진다. 계통으로 공급되는 무효전력이 증가할수록 전류 불균형 현상은 더욱더 심해진다. 이 현상은 특정 상 스위치 소자의 정격 용량 및 열 스트레스를 증가시켜 MMC의 안정성을 저해시킨다. 따라서 POD 전략에서 무효전력 지령치는 MMC의 안정성을 저해시키지 않는 범위 내에서 선택되어야 한다.

3. 결론

본 논문은 MMC-HVDC 시스템이 접속된 AC 계통 불평형 상황에서 POD 및 계통 전압 보상을 위해서 MMC의 내부 동적 상태를 분석하였다. POD 전략에서 유효 전력과 무효 전력이 동시에 공급될 때, 무효 전력에 대응하는 전류 성분은 각 상에 흐르는 전력을 불균형하게 만든다. 이 현상은 특정 상의 스위치 정격을 증가시키는 문제를 일으켜, MMC의 안정성을 저해시킨다. 따라서 POD 전략과 전압 보상을 안정적으로 수행하기 위해서는 추가적인 제어전략이 요구되며 정격용량을 초과하지 않는 범위 내에서 운영되어야 한다.

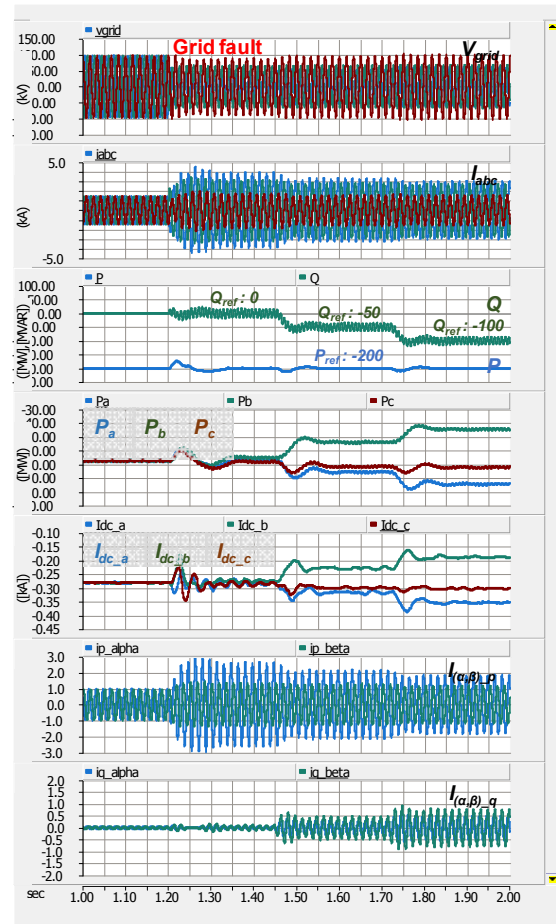


그림 3 무효전력 변화에 따른 각 상의 DC 전류 및 유효전력.

Fig. 3 DC current and active power of each phase according to reactive power change.

이 연구는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업임(No. 20A01051)

참고 문헌

- [1] F.Wang, J. L. Duarte, and M. A. M. Hendrix, "Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 5, pp. 1511?1521, May 2011.