

순환전류방식용 $\pm 35\text{kV}$ MVDC 실증망의 정상상태 운용특성에 관한 연구

이후동*, 한병길*, 강성현*, 이성두*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: lhd714@koreatech.ac.kr

A Study on Normal Operation Characteristics of $\pm 35\text{kV}$ MVDC Demonstration System Considering Inner Loop Circuit

Hu-Dong Lee*, Byeong-Gill Han*, Seong-Hyun Kang**, Seong-Doo Lee**, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**New Energy Technology Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

요 약

최근, 신재생에너지전원의 급격한 도입으로 인해 발생하고 있는 계통접속 지연 문제를 해소하기 위하여, MVDC 배전 기술에 대한 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다. MVDC는 기존의 AC 배전기자재를 활용하여 선로용량을 AC 대비 2~3배 이상 증대시킬 수 있는 기술로 평가되고 있으며, 이를 통해 선로 인프라 구축비용을 획기적으로 절감할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그러나, 현재 국책사업으로 진행되고 있는 MVDC 실증 프로젝트에서는 대용량 신재생에너지전원이 연계되어 있는 선로에 MVDC 스테이션을 접속하여 정상상태 운전시험을 수행하고 있지만, 해당 배전선로의 용량이 MVDC 스테이션의 용량보다 작으므로 실증시험이 어려운 실정이다. 이에 따라, MVDC 스테이션 내부에 순환선로를 설치하여 전력계통 설비에 대한 영향을 최소화하면서, 정격운전 및 실증시험이 가능하도록 설계 변경을 추진하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 내부순환선로의 설치를 고려하여 MVDC 실증망 운전에 대한 정상상태 운용 및 계통영향을 평가하기 위하여, 전력계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 기반으로 배전용변전소, 컨버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 $\pm 35\text{kV}$ MVDC 실증망의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, MVDC 스테이션을 정격용량으로 운용하는 경우, 대부분의 순환전류가 내부선로로 흐르게 되어 계통측에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있고, 연계선로의 용량초과 문제없이 안정적으로 MVDC 실증이 가능함을 확인하였다.

1. 서 론

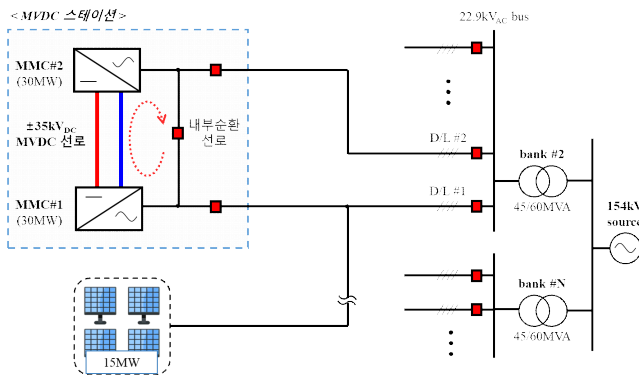
최근, 정부의 2050 탄소중립 정책에 따라 신재생에너지전원이 배전계통에 활발하게 도입되고 있지만, 친환경 자원이 풍부한 특정 지역에 집중되고 있는 신재생에너지전원의 계통 접속 지연 문제가 계속해서 발생하고 있다. 이를 해결하기 위한 방안 중 하나로, MVDC 배전기술에 대한 실증 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 기술은 배전망의 조류를 능동적으로 제어할 수 있어 선로 및 설비의 이용률을 높일 수 있고, 동일한 선로를 활용하여 기존의 AC 배전망 대비 더욱 많은 용량을 공급할 수 있어 변전소 증설과 같은 불필요한 투자를 회피할 수 있다. 그러나, 현재 국책사업으로 진행되고 있는 MVDC 실증 프로젝트에서는 실제 대용량의 신재생에너지전원이 연계되어 있는 선로에 MVDC 스테이션을 접속하여 DC 전력전송 시험을 진행하려고 계획하고 있지만, MVDC 스테이션의 용량이 해당 배전선로 용량 보다 크므로 정격운전시험이 어려운 실정이다. 이에 따라, MVDC 스테이션 내부에 순환선로를 설치하여 한전측 설비에 대한 영향을 최소화하면

서 최대 정격운전 및 실증시험이 가능하도록 설계의 변경이 진행되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 내부순환선로의 설치를 고려하여 MVDC 실증망 운전에 대한 계통영향을 평가하기 위하여, 상용 계통해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 기반으로 배전용변전소, 컨버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 $\pm 35\text{kV}$ MVDC 실증망의 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 정상상태 운용특성을 제시한다. 실증망 모델링을 바탕으로 내부순환선로를 고려하여 시뮬레이션을 수행한 결과, MVDC 스테이션을 최대정격(30[MW])으로 운용하는 경우, 대부분의 전력이 내부선로로 순환되어 계통측에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있고, 연계선로의 용량초과 없이 안정적으로 MVDC 실증이 가능함을 확인하였다. 또한, MVDC 스테이션의 기동운전 시에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과, 서브모듈의 커패시터에 의해 변전소측에서 순간적으로 약 3.5[MW]의 초기 충전전력이 발생하지만, 계통측에 나타나는 전압변동은 1% 이내로 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

2. 내부순환선로가 고려된 $\pm 35\text{kV}$ MVDC 실증망의 구성

최근, 국책연구 사업으로 기존의 AC 22.9[kV] 선로를 DC $\pm 35\text{kV}$ 선로로 변환하여, 30[MW] 용량을 전송하는 MVDC 배전망의 실증을 진행하고 있다. 그림 1과 같이, $\pm 35\text{kV}$ MVDC 배전망 실증연구를 위해 구축중인 MVDC 실증망은 태양광전원, AC 배전선로, 컨버터스테이션, DC 배전선로, 배전용변전소 등으로 구성된다. 이 그림에서와 같이, 태양광전원에서 생산된 전력은 MVDC 스테이션 운용 시 AC-DC-AC의 변환 단계를 거쳐 배전용 변전소로 공급된다. 그러나, 태양광전원이 연계되어 있는 선로(D/L #1)의 용량은 15[MVA]로 MVDC 스테이션의 용량인 30[MW]보다 적어 정격운전시험이 어려운 실정이다. 이에 따라, MVDC 스테이션 내부에 순환선로를 설치하여 최대 정격운전시험이 가능하도록 실증망의 구성이 변경되고 있다. 또한, 내부순환선로와 D/L #1 및 D/L #2가 전기적으로 연결되어 있기 때문에, MVDC 스테이션의 운전시 의도치않게 내부선로로 순환하지 않고 조류가 D/L #1 또는 D/L #2로 분산되어 선로용량을 초과하는 문제가 발생할 수 있으므로, 이에 대한 정상상태 특성 해석이 요구된다.

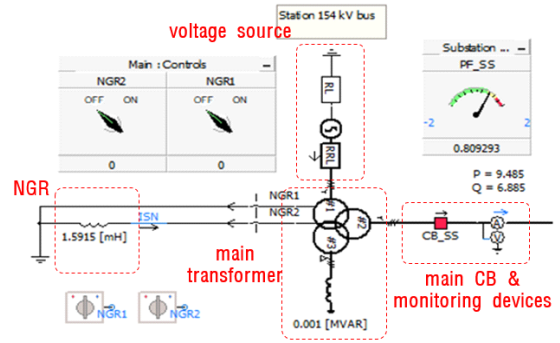


[그림 1] 내부순환선로가 고려된 $\pm 35\text{kV}$ MVDC 실증망의 구성도

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 $\pm 35\text{kV}$ MVDC 실증망의 모델링

3.1 배전용변전소 모델링

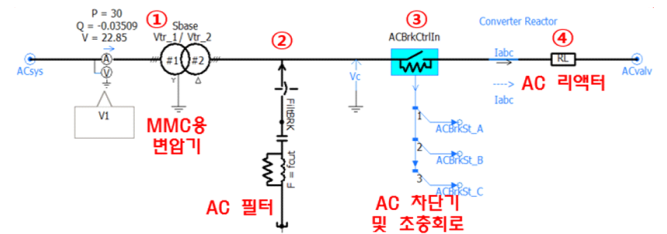
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg- Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 적용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR(neutral grounding reactor)가 포함된다.



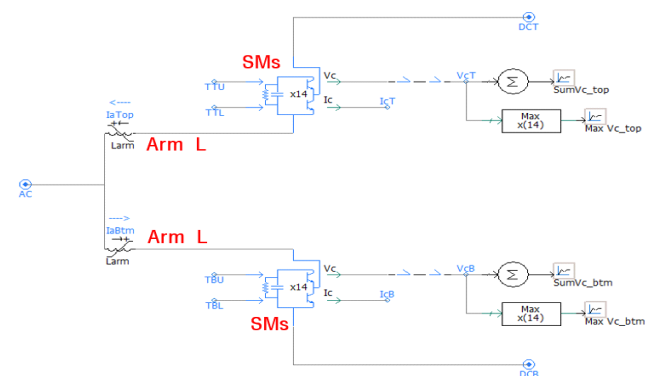
[그림 2] 배전용변전소의 모델링

3.2 컨버터스테이션 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 회로부와 서브모듈부로 구성된 Half-bridge 서브모듈 기반 MMC(modular multi-level converter)를 모델링하면, 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3(a)는 MMC의 AC 회로부 모델링을 나타낸 것이며, MMC용 변압기(①), AC 필터(②), 차단기 및 조중회로(③), AC 리액터(④)로 구성된다. 또한, 그림 3(b)는 C/S 내부 MMC의 서브모듈부를 나타낸 것으로, 제어신호를 받아 AC 22.9[kV]를 DC $\pm 35\text{kV}$ 로 변환하며, 각 상별로 상단과 하단측의 서브모듈에 연결된 Arm 리액터는 서브모듈의 스위칭으로 인한 고조파를 필터링한다.



(a) AC 회로부



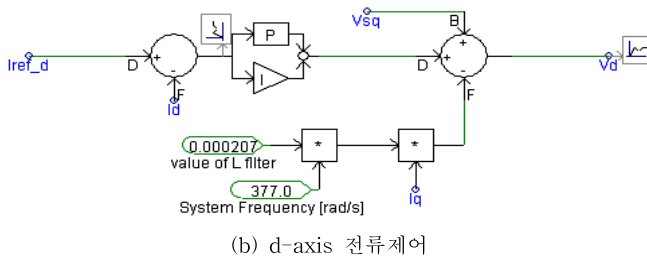
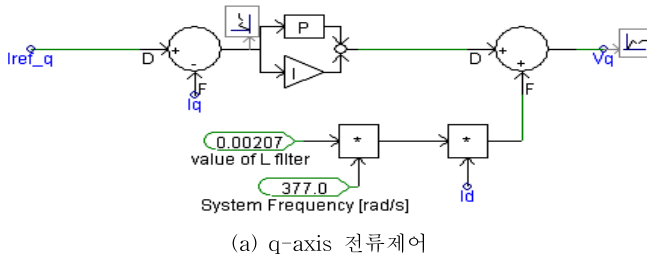
(b) 서브모듈부

[그림 3] 컨버터스테이션 모델링

3.3 태양광전원 모델링

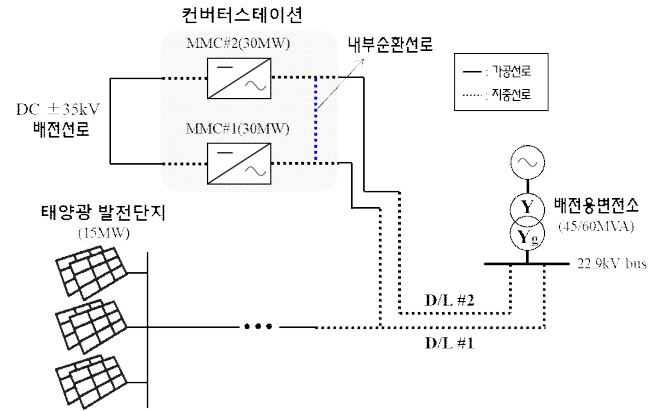
태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위한 제어기를 모델링하면 그

림 4와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



[그림 4] 태양광전원의 전류제어기 모델링

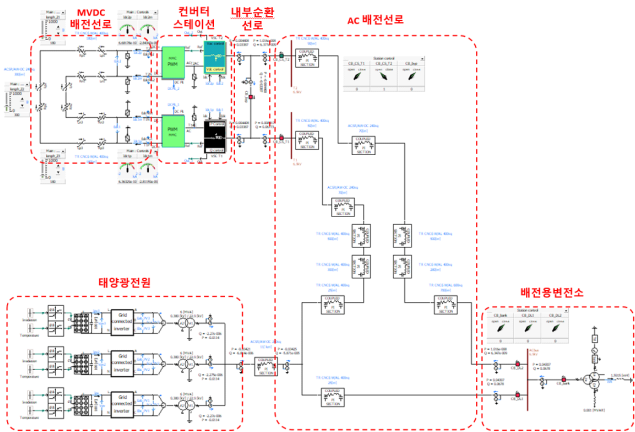
22.9[kV]로 변환하여 D/L #2를 통하여 배전용 변전소로 공급한다. 또한, 동일 bank의 타 선로인 D/L #1에서는 15[MW]의 태양광전원이 운용되며, 11[km] 지점에서 연계되는 것으로 상정한다. 또한, MVDC 스테이션을 구성하는 MMC와 인터페이스 변압기에 대한 상세 내역은 표 1과 같다.



[그림 6] MVDC 실증망 단선회로도

3.4 MVDC 실증망 모델링

상기의 ± 35 [kV] MVDC 실증망의 구성을 바탕으로, 배전용 변전소, AC 배전선로, 컨버터스테이션, DC 선로 그리고 태양광전원으로 구성된 전체 MVDC 실증망을 나타내면 그림 5과 같다.



[그림 5] MVDC 실증망 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시된 ± 35 [kV] MVDC 실증망의 정상상태 운용특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, MMC #1은 태양광전원측의 AC 22.9[kV]의 출력을 DC ± 35 [kV]로 변환하여, MVDC 선로로 DC ± 35 [kV]를 공급하고, MMC #2는 DC ± 35 [kV]를 AC

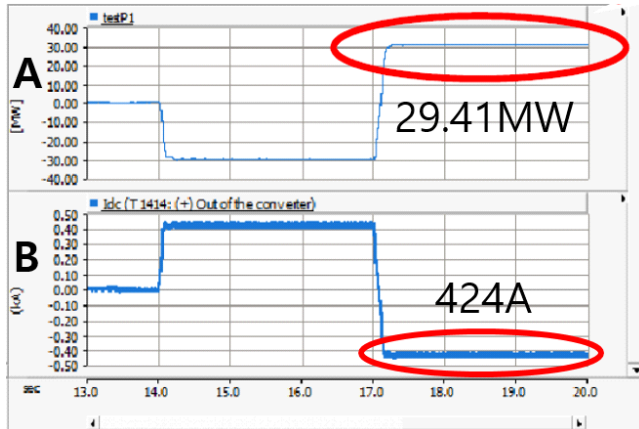
[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목		내 역
MMC	DC공급방식	symetric monopole 방식
	서브모듈 타입	half-bridge type
	정격용량	30[MW]
	정격전압 및 전류	AC 22.9[kV], 756[A]
		DC ± 35 [kV], 429[A]
	밸브 레벨 수	28-level
	서브모듈의 DC링크 커패시터	3.2[mF]
인터페이스 변압기	압 리액터	18[mH]
	결선방식	Yg-Δ
	전압비	22.9/28.92[kV]
태양광전원	용량	34.2[MVA]
	%임피던스	8[%]
	발전 용량	15[MW]
연계지점		D/L#1 - 11[km]

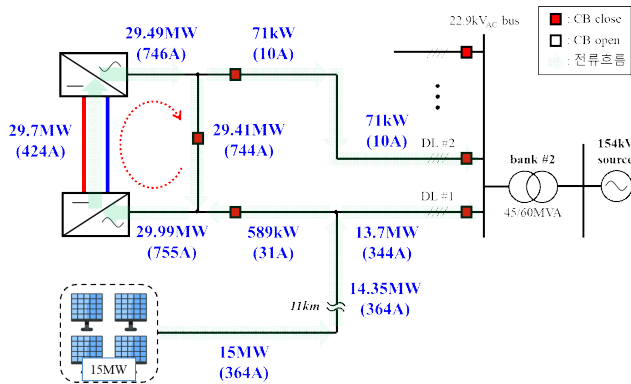
4.2 내부순환선로를 고려한 실증망 정상상태 특성

그림 6 및 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라, 내부순환선로의 설치를 고려한 MVDC 실증망의 정상상태 운용특성을 나타내면 그림 7 및 그림 8과 같다. 여기서, 그림 7은 내부순환선로측 전력(A) 및 MVDC 선로측 전류(B) 공급특성을 나타낸 것으로, MVDC 스테이션의 정격운전(30[MW]) 시, 29.41[MW](98%)의 전력이 내부순환선로를 통해 조류가 형성됨을 알 수 있고, MMC의 제어에 따라 (+)와 (-) 양방향으

로 공급할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 8은 MVDC 실증망 정상상태 운용특성을 나타낸 것으로, D/L #1에서 MVDC 스테이션측으로 공급되는 전력은 589[kW]이고, D/L #2로 나가는 출력은 71[kW]로, 선로용량인 15[MVA]의 4% 미만이므로, 30MW의 정격운전 시 배전선로 용량초과 문제가 발생하지 않고, 변전소측에 미치는 악영향이 적음을 알 수 있다.



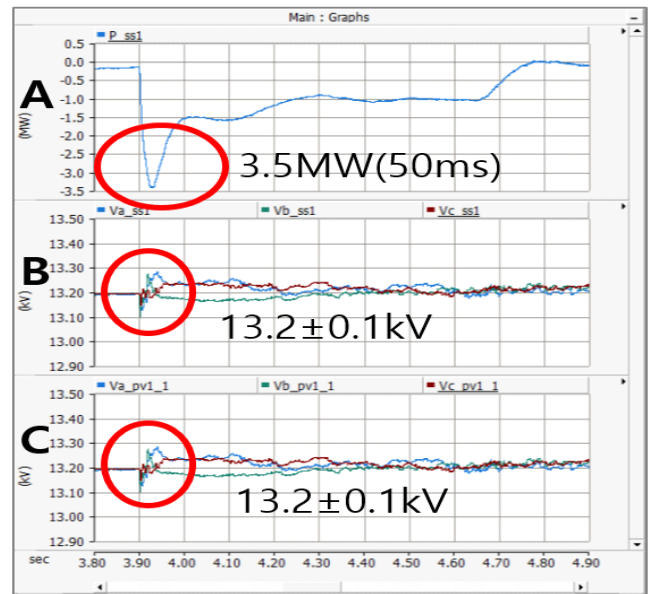
[그림 7] 내부순환선로측 전력 및 MVDC 선로측 전류 공급특성



[그림 8] MVDC 실증망 정상상태 운용특성

4.3 MVDC 스테이션 초기 기동시 계통영향 특성

MVDC 스테이션은 수 십개의 서브모듈들로 구성되는데, 서브모듈 안에는 DC전압의 형성을 위한 커패시터가 설치되어 있다. 이에 따라, MVDC 스테이션을 기동하기 위하여 스위치를 투입할 경우, 초기에 큰 돌입전류가 발생할 수 있다. 본 절에서는 상기의 모델링을 바탕으로 MVDC 실증망의 초기 기동에 의한 계통영향 특성을 제시하며, 시뮬레이션 결과를 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, A는 변전소측에서 공급되는 전력특성이며, B와 C는 각각 변전소측과 태양광전원측의 AC RMS 전압을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, MVDC 스테이션의 기동을 위해 연계스위치 투입 시, 변전소측에서 순간적으로 약 3.5[MW]의 초기 충전전력이 발생하게 되지만, 계통측과 태양광전원 측에서 나타나는 전압변동은 1% 이내로 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.



[그림 9] MVDC 실증망의 초기 기동에 의한 계통영향 특성

5. 결 론

본 논문에서는 내부순환선로를 고려한 MVDC 실증망 운전에 대한 정상상태운용 및 계통영향을 평가하기 위하여, 상용 계통해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 기반으로 배전용변전소, 컨버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 ± 35 [kV] MVDC 실증망의 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 내부순환선로를 고려한 운용특성과 기동 시의 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저, MVDC 스테이션을 정격용량(30[MW])으로 운용하는 경우, 29.41[MW]의 전력이 내부선로로 순환되어 계통측에 미치는 영향이 적어, 연계선로의 용량초과 없이 안정적으로 MVDC 실증이 가능함을 알 수 있었다. 또한, MVDC 스테이션의 기동운전 시 서브모듈의 커패시터에 의해 변전소측에서 순간적으로 약 3.5[MW]의 초기 충전전력이 발생하지만, 계통측에 나타나는 전압변동은 1% 이내로 큰 영향이 없음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이후동, 태동현, 노대석, 김주용, “20kV급 방사형 MVDC 배전계통의 보호협조 운용알고리즘에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.69, no.6, pp.869~880, 2020.
- [2] 강성현, 이후동, 이성두, 노대석, “PSCAD/EMTDC를 이용한 ± 35 kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 사고해석에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.70, no.8, pp.1117~1128, 2021.