

±35kV급 MVDC 실증 배전망의 상정사고별 계통영향성 평가에 관한 연구

한병길*, 김지명*, 이후동*, 강성현**, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

**한국전력공사 전력연구원

e-mail: bghan@koreatech.ac.kr

Impact Evaluation on 35kV-scale MVDC Distribution System for Demonstration with the Fault Scenarios

Byeong-Gill Han*, Ji-Myung Kim*, Hu-Dong Lee*, Seong-Hyun Kang**, Dae-Seok Rho*

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

**KEPCO Research Institute

요약

±35kV급 DC 전압은 기존 AC 배전망의 공급전압 보다 높아 MVDC 배전망에서의 전체 사고전류를 크게 증가시킬 수 있으므로, 선로 및 주요설비들을 보호하기 위하여 정확한 사고특성의 해석이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 MVDC 배전기술의 실증을 위한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망을 바탕으로, 선로사고 발생 시 MVDC 배전용 설비와 타 선로의 수용가에 미치는 영향을 분석하기 위한 상정사고 시나리오 및 계통영향성 평가 모델링을 제시한다. 또한, 본 논문에서는 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전계통의 모델링을 제안한다. 한편, 상정사고별 계통영향성 평가 모델링을 바탕으로 MVDC 배전계통에서의 사고해석을 수행한 결과, MVDC 배전선로에서 사고가 발생하는 경우, 사고의 종류와 무관하게 컨버터 스테이션의 DC link 커패시터 방전에 의해 순간적으로 큰 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 또한, AC 배전선로에서 지락사고가 발생하는 경우에는 비접지 시스템의 MVDC 배전망에 의해 분류효과가 발생하지 않음을 알 수 있다.

1. 서론

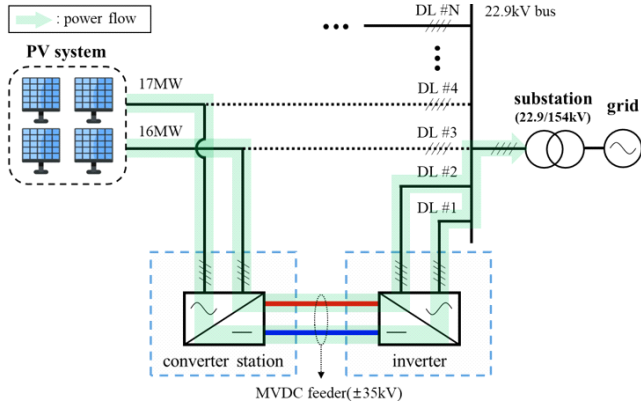
최근, 신재생에너지전원의 급격한 도입으로 인한 계통접속 지연 문제를 해결하기 위한 방안으로, MVDC 배전기술에 대한 실증연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 기존의 AC 배전선로를 활용하여 선로용량을 증대시키기 위한 MVDC 배전전압으로 DC ±35kV의 전압이 적절한 것으로 평가되고 있다[1-2]. 그러나, 이 전압은 기존 AC 배전망의 공급전압 보다 높아 MVDC 배전망에서의 전체 사고전류를 크게 증가시킬 수 있으므로, 선로 및 주요설비들을 보호하기 위하여 정확한 사고특성의 해석이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전계통의 모델링을 제시하여 사고해석을 수행한다. 상정사고별 계통영향성 평가 모델링을 바탕으로 MVDC 하이브리드 배전계통에서의 사고해석을 수행한 결과, MVDC 배전선로에서 사고가 발생하는 경우, 사고의 종류와 무관하게 컨버터 스테이션의 DC link 커패시터 방전에 의해 순간적인 큰 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있고, 변전소측 AC 22.9kV bus에 저전압 현상

이 나타나, 동일 bank 타 선로의 수용가에게 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, AC 배전선로에서 지락사고가 발생하는 경우에는 비접지 시스템의 MVDC 배전망에 의해 분류효과가 발생하지 않으며, AC 22.9kV bus와 MVDC 배전선로의 전압 또한 안정적으로 유지되므로, 타 선로 측 수용가에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

2. ±35kV급 MVDC 실증 배전망의 구성

본 논문에서는 한전의 ±35kV급 MVDC 배전망 실증연구를 위해 구축중인 실증 사이트를 대상으로 상정사고 해석을 수행하고자 하며, 배전망의 구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 대상 계통은 PV 발전단지, AC 배전선로, 컨버터스테이션(C/S), DC 배전선로, 배전용변전소 등으로 구성된다. 이 그림에서와 같이, PV 발전단지에서 생산된 전력은 C/S를 통과하여 왕곡 변전소로 향하는 방향으로 흐르게 되며, C/S에 의해 AC-DC-AC의 변환 단계를 거치게 된다. 이러한 구성의 MVDC 실증 사이트에서 어느 지점에 사고가 발생할 경우, 사고전류는 PV 발전단지와 왕곡 변전소로부터 양 방향으로 공급될 수 있으며, 특히 DC ±35kV 선로의 경우 일

반적인 AC 배전전압인 22.9kV 보다 높아, 양측 컨버터로부터 유입되는 사고전류는 기존의 경우보다 상당히 높게 발생할 수 있어, 이에 대한 정확한 사고해석이 요구된다.

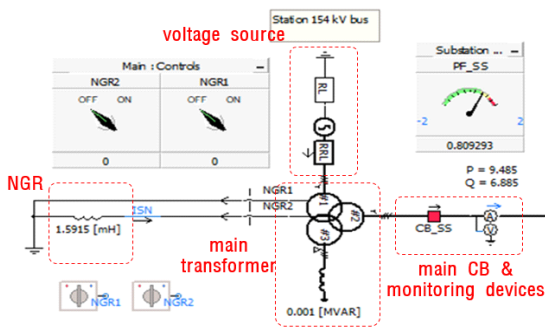


[그림 1] ±35kV MVDC 실증용 배전망의 구성도

3. PSCAD/EMTDC에 의한 ±35kV급 MVDC 실증 배전망 모델링

3.1 배전용변전소 모델링

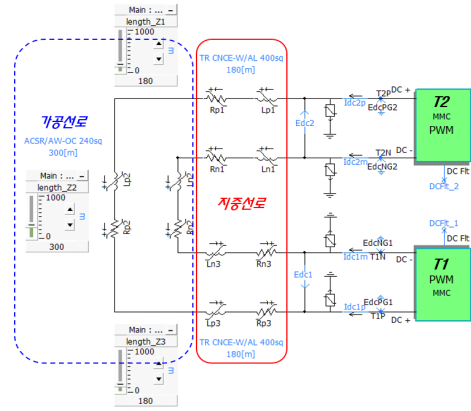
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 적용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR(neutral grounding reactor)가 포함된다.



[그림 2] 배전용변전소의 모델링

3.2 실증용 배전선로 모델링

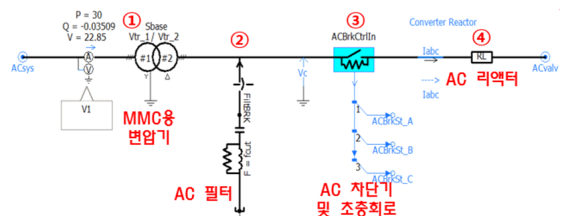
PSCAD/EMTDC를 이용하여 DC 배전선로를 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, DC 배전선로는 C/S 내부에서 외부로 인출되는 지중선로와 T1측 MMC에서 T2측 MMC로 연결되는 가공선로로 구성되며, 선로 공장은 각각 180[m], 300[m]이다.



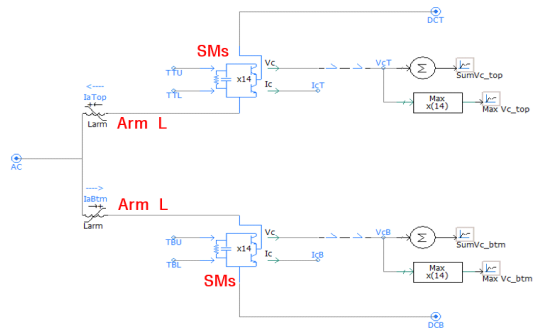
[그림 3] DC 배전선로 모델링

3.3 컨버터 스테이션 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 회로부와 서브모듈별로 구성된 Half-bridge SM 기반 MMC를 모델링하면, 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 4(a)는 MMC의 AC 회로부 모델링을 나타낸 것이며, MMC용 변압기(①), AC 필터(②), 차단기 및 초충회로(③), AC 리액터(④)로 구성된다. 또한, 그림 4(b)는 C/S 내부 MMC의 서브모듈부를 나타낸 것으로, 제어신호를 받아 AC 22.9kV를 DC ±35kV로 변환하며, 각 상별로 상단과 하단측의 서브모듈에 연결된 Arm 리액터는 서브모듈의 스위칭으로 인한 고조파를 필터링한다.



(a) AC 회로부



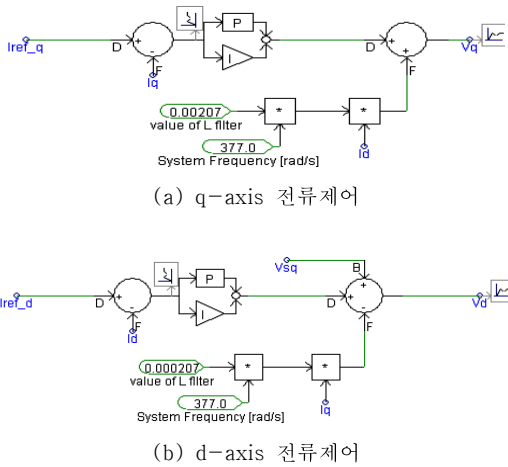
(b) 서브모듈부

[그림 4] 컨버터스테이션 모델링

3.4 태양광전원 모델링

태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위한 제어기를 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문

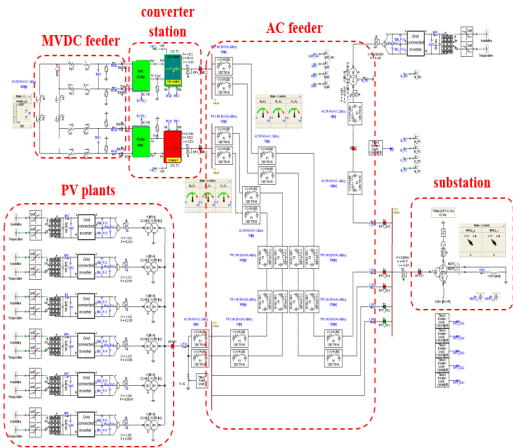
에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



[그림 5] 태양광전원의 전류제어기 모델링

3.5 전체 계통 모델링

상기의 ±35kV급 MVDC 배전계통의 구성을 바탕으로, 배전용변전소, AC 배전선로, 컨버터 스테이션, DC 선로 그리고 PV 발전단지 구성된 전체 MVDC 배전계통을 나타내면 그림 6과 같다.



[그림 6] 전체 MVDC 배전계통 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

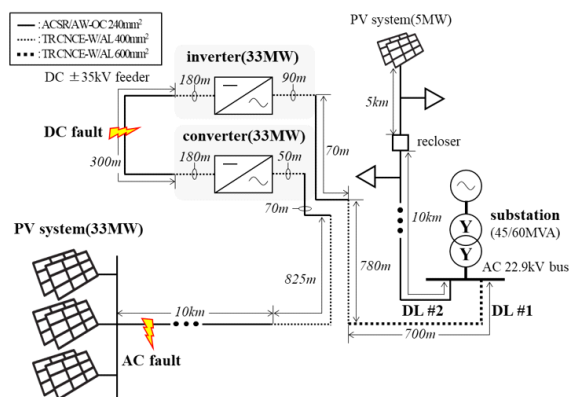
4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 상정사고별 계통영향성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 태양광전원의 수전용 컨버터 스테이션은 그림 7과 같이 태양광전원의 AC 22.9kV의 출력을 DC ±35kV로 변환하여, MVDC 선로로 DC ±35kV를 공급하고, 계통공급용 인버터는 DC ±35kV를 AC 22.9kV로 변환하여 DL #1을 통하여 배전용 변전소로 공급한다. 또한, 동일 bank의 타 선로인 DL #2에서는 일반 수용가 부하와 태양광전원을

연계하여 운영하는 것으로 가정하며, 전체 선로 공장은 15km이며, 리클로저는 10km 지점에 설치하는 것으로 상정한다. 한편, MVDC 하이브리드 배전망의 사고 시나리오는 태양광전원과 컨버터를 연결하는 AC 배전선로에서 지락 및 3상 단락사고가 발생하는 경우와 ±35kV MVDC 배전선로에서 P-G 및 P-P 사고가 발생하는 경우로 상정한다. 또한, 사고해석을 위한 컨버터 및 인버터, MVDC, AC 선로의 상세 내역은 표 1과 같다.

[표 1] 상정사고별 시뮬레이션 조건

items		contents	
DL #1	primary feeder	overhead	ACSR/AW-OC 240mm ²
		underground	TR CNCE-W/AL 400mm ² TR CNCE-W/AL 600mm ²
		total length	13.25[km]
PV system	capacity	33[MW]	
	PCC	13.25[km]	
DL #2	primary feeder	type	ACSR/AW-OC 240mm ²
		total length	15[km]
	PV system	capacity	5[MW]
PCC		15[km]	
location of recloser		10[km]	

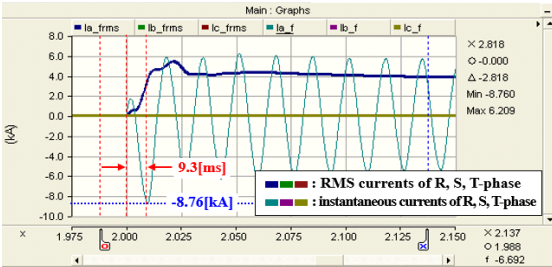


[그림 7] 대상 계통의 단선도

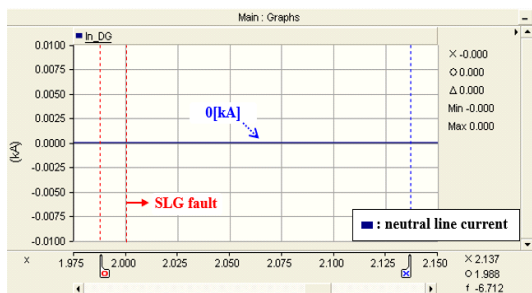
4.2 AC 배전선로 사고 시 계통영향 평가

AC 배전선로에서 1선 지락사고가 발생하는 경우에 대하여, MVDC 하이브리드 배전계통의 사고전류 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8(a)는 MVDC 배전선로의 사고전류 특성을 나타낸 것이며, 그림 8(b)는 동일 bank의 타 선로에 연계되어 있는 태양광전원용 연계변압기의 중성선측 사고전류 특성을 나타낸 것이다. 먼저, 그림 8(a)와 같이 사고지점에서는 -8.76[kA]의 전류가 발생함을 알 수 있다. 이때, 태양광전원과 컨버터 스테이션에서는 변압기 중성선을 통해 지락전류가 유입되어, 각 상 전류의 크기와 위상이 틀어져 다른 건전 상에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 8(b)

와 같이 지락사고 시 타 선로의 중성선에 사고전류가 흐르지 않아, 타 선로측 수용가에 미치는 영향이 없음을 알 수 있다. 즉, 비접지 방식의 MVDC 배전망이 영상분 회로를 차단하여, 사고전류의 분류효과를 억제할 수 있음을 알 수 있다.



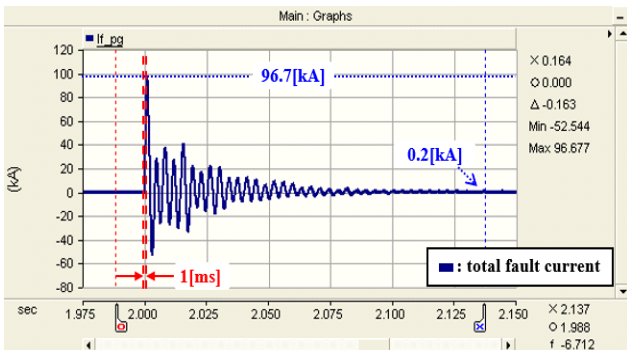
(a) 사고지점에서의 사고전류 특성



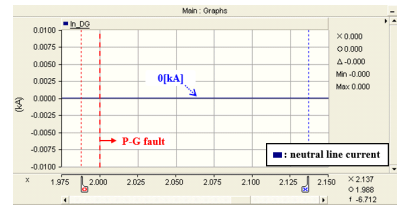
(b) 타 선로 연계용변압기의 중성선측 사고전류 특성
[그림 8] AC 선로측 1선 지락사고 시의 사고전류 특성

4.3 DC 배전선로 사고 시 계통영향 평가

MVDC 배전선로에서 P-G 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 특성은 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9(a)는 사고지점에 흐르는 전체 사고전류를 나타낸다. 또한, 그림 9(b)는 동일 bank의 타 선로에 연계되어 있는 태양광전원용 연계변압기의 중성선측 전류특성을 나타낸다. 즉, 그림 9(a)와 같이 사고지점으로 최대 96.7[kA]의 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있으며, 사고가 발생하지 않은 MVDC 선로에도 최대 9.7[kA]의 사고전류가 발생하여, 컨버터 스테이션과 인버터에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 9(b)와 같이 타 선로의 중성선에는 사고전류가 흐르지 않아, 타 선로측 수용가에 영향이 없음을 알 수 있다.



(a) 사고지점에서의 사고전류 특성



(b) 타 선로 연계용변압기의 중성선측 사고전류 특성
[그림 9] MVDC 선로측 P-G 사고 시의 사고전류 특성

5. 결 론

본 논문에서는 MVDC 하이브리드 배전망의 선로 사고 시 타 선로의 수용가와 MVDC 배전용 설비에 대한 영향을 분석하기 위한 상정사고 시나리오와 계통영향성 평가 모델링을 제안하고, PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터 스테이션, 태양광전원으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전계통의 모델링을 제시하여 사고해석을 수행하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) AC 배전선로에서 1선 지락사고 시, 태양광전원과 컨버터 스테이션 양측에서 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있었고, 컨버터의 변압기 중성선을 통해 지락전류가 유입되어, 다른 건전 상에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(2) ±35kV MVDC 배전선로에서 P-G 사고 시, 서브모듈의 DC 링크 커패시터 방전에 의하여 컨버터 스테이션과 인버터에서 매우 큰 사고전류가 발생함을 알 수 있었고, 사고가 발생하지 않은 MVDC 선로에도 사고전류가 흘러 컨버터 스테이션과 인버터에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20191210301940)로서, 관계부처에 감사드립니다. 본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임. [S2854105]

참고문헌

- [1] 이후동, 태동현, 노대석, 김주용, “20kV급 방사형 MVDC 배전계통의 보호협조 운용알고리즘에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.69, no.6, pp.869-880, 2020.
- [2] 이후동, 김기영, 김미성, 노대석, “태양광전원 수용을 위한 MVDC 배전망의 경제성평가 모델링에 관한 연구”, 산학기술학회 논문지, vol.22, no.3, pp.1-12, 2021.
- [3] 조성준, 이교범, “직류배전용 전력변환장치의 구성과 제어 기술”, 전력전자학회지, vol.23, no.5, pp.32-38, 2018.