

태양광전원이 연계된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전계통의 사고특성에 관한 연구

한병길, 김지명, 이나경, 이세연, 노대석
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail: bghan@koreatech.ac.kr

A Study on Fault Current Characteristics of $\pm 35\text{kV}$ MVDC Distribution System with PV System

Byeong-Gill Han, Ji-Myung Kim, Na-Kyung Lee, Se-Yeon Lee, Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

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 $\pm 35\text{kV}$ 의 전압이 적절한 것으로 평가되고 있다. 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, 컨버터 및 인버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전계통의 모델링을 제시한다. 여기서, 태양광전원은 태양광전원용 인버터와 컨버터를 통하여 각각 AC 및 MVDC 선로에 의하여 배전용변전소 측으로 공급된다. 한편, 제시한 모델링과 다양한 상정사고 조건을 바탕으로 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전계통에서의 사고지점에 따른 특성 분석한 결과, P-P 단락 사고발생 시 컨버터 및 인버터스테이션의 커패시터의 순간적인 방전으로 매우 큰 사고전류가 발생하여, 이를 고려한 MVDC 배전계통에서의 적절한 보호기기 운용방안이 요구됨을 알 수 있었다.

1. 서론

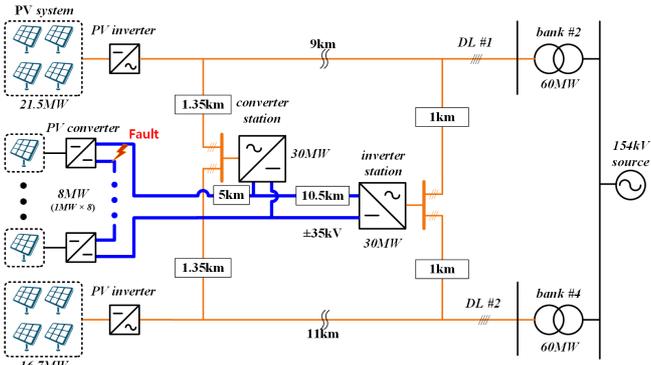
최근, 신재생에너지전원의 급격한 도입으로 인한 계통접속 지연 문제를 해결하기 위한 방안으로, MVDC 배전기술에 대한 실증연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 기존의 AC 배전선로를 활용하여 선로용량을 증대시키기 위한 MVDC 배전전압으로 DC $\pm 35\text{kV}$ 의 전압이 적절한 것으로 평가되고 있다[1-3]. 그러나, 이 전압은 기존 AC 배전망의 공급전압 보다 높아 MVDC 배전망에서의 전체 사고전류를 크게 증가시킬 수 있으므로, 선로 및 주요설비들을 보호하기 위하여 정확한 사고특성의 해석이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터 및 인버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전계통의 모델링을 제시한다. 여기서, 태양광전원은 태양광전원용 인버터와 컨버터를 통하여 각각 AC 및 MVDC 선로에 연계되어, 생산된 전력을 변전소 측으로 공급한다. 한편, 제시한 모델링과 다양한 상정사고 조건을 바탕으로 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전

계통에서의 사고지점에 따른 특성 분석한 결과, F1 지점 사고 시 컨버터스테이션(C/S) 측에서 공급되는 사고전류는 2.8[kA], 인버터스테이션(I/S)측에서 공급되는 사고전류는 1.89[kA], 태양광전원으로부터 공급되는 사고전류는 0.91[kA] 만큼 유입됨을 알 수 있다. 따라서, MVDC 선로에 사고가 발생하는 경우, 컨버터스테이션이 탈락되거나 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있어, 이를 고려한 MVDC 배전계통에서의 적절한 보호기기 운용방안이 필요함을 알 수 있었다.

2. 태양광전원이 연계된 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전계통의 구성

본 논문에서는 $\pm 35\text{kV}$ 급 MVDC 배전망의 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, AC선로에 연계된 PV 발전단지에서 생산된 전력은 AC 선로와 C/S에 의해 MVDC선로를 통하여 변전소

측으로 분배되어 흐른다. 또한, MVDC 선로에 연계된 PV 발전단지에서 생산된 전력은 MVDC 선로와 인버터스테이션을 통하여 변전소 측으로 흐른다. 이러한 구성의 MVDC 실증 사이트에서 MVDC 선로에 사고가 발생할 경우, 사고전류는 PV 발전단지와 왕곡 변전소로부터 양방향으로 공급될 수 있으며, 특히 DC $\pm 35\text{kV}$ 선로의 경우 일반적인 AC 배전전압인 22.9kV 보다 높아, 양측 컨버터로부터 유입되는 사고전류는 기존의 경우보다 상당히 높게 발생할 수 있어, 이에 대한 정확한 사고해석이 요구된다.

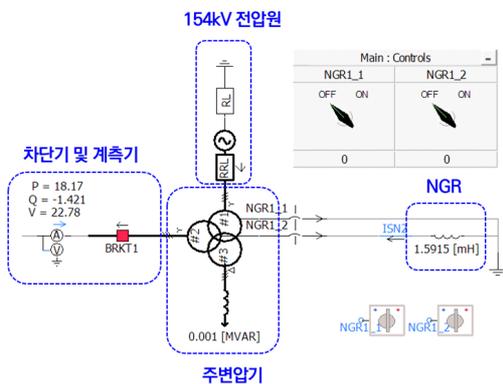


[그림 1] 태양광전원이 연계된 $\pm 35\text{kV}$ MVDC 배전시스템의 구성도

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

3.1 배전용변전소 모델링

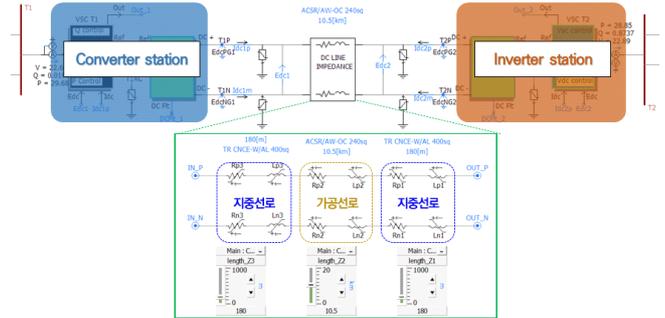
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg- Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 적용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전시스템의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR(neutral grounding reactor)가 포함된다.



[그림 2] 배전용변전소의 모델링

3.2 MVDC 배전선로 모델링

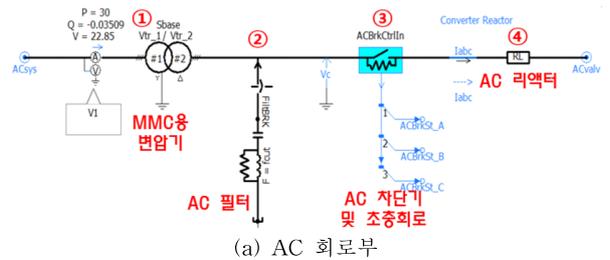
PSCAD/EMTDC를 이용하여 MVDC 배전선로를 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, MVDC 배전선로는 I/S과 C/S 내부에서 외부로 인출되는 지중선로와 가공선로로 구성되며, 선로 길이는 각각 0.18[km], 10.5[km]이다.



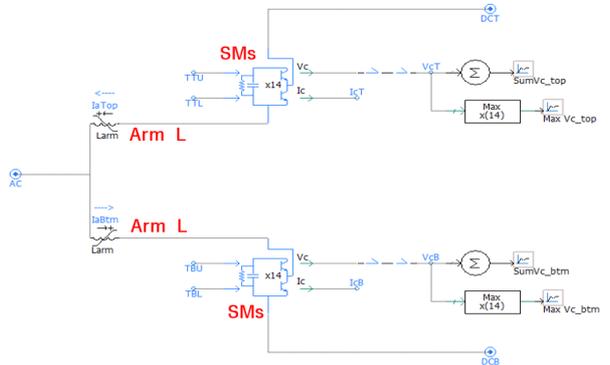
[그림 3] MVDC 배전선로 모델링

3.3 컨버터 및 인버터스테이션 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 $\pm 35\text{kV}$ 로 변환하며, 각 상별로 상단과 하단측의 서브모듈에 연결된 Arm 리액터는 서브모듈의 스위칭으로 인한 고조파를 필터링한다.



(a) AC 회로부

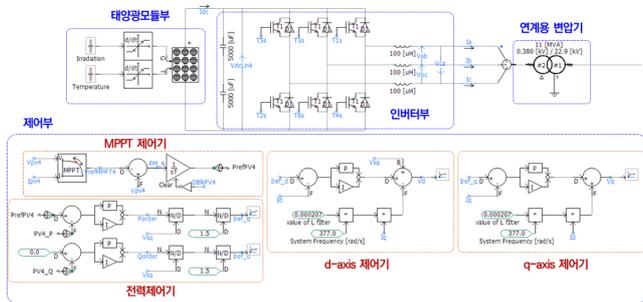


(b) 서브모듈부

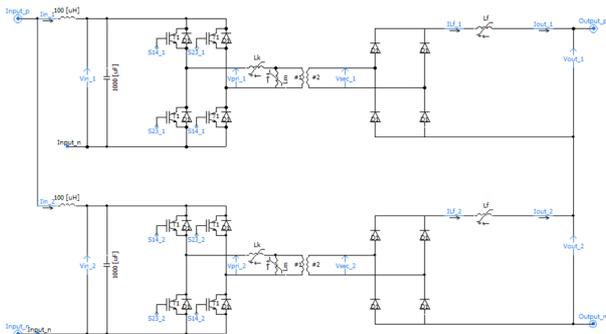
[그림 4] 컨버터스테이션 모델링

3.4 태양광전원 모델링

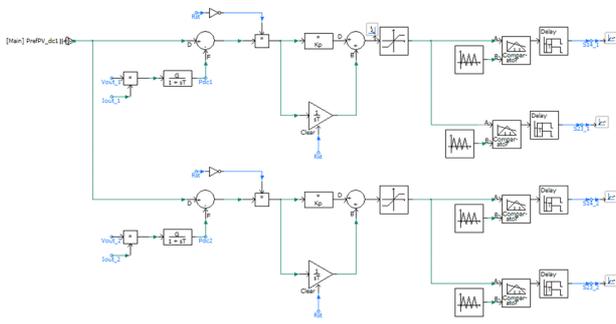
AC 선로에 연계되는 태양광전원은 그림 5와 같이 연계용 변압기, 태양광 모듈부, 인버터부, 제어부로 구성된다. 여기서, 제어부는 태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 MPPT 제어를 통하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력의 지령치 만들고, 전류제어기의 d축 및 q축제어기를 통하여 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어한다. 한편, MVDC 선로에 연계되는 태양광전원은 DC/DC 컨버터부, 제어부, 태양광모듈부로 구성된다. 여기서, DC/DC 컨버터부는 그림 6(a)와 같이 절연형 타입인 Full-bridge를 채택하여 직렬로 구성하고, 제어부는 그림 6(b)와 같이 태양광전원용 DC/DC 컨버터에 대하여 MPPT 제어를 통하여 목표로 하는 전력의 지령치 만들고, PI제어를 이용하여 전류제어를 수행한다.



[그림 5] AC 선로 연계용 태양광전원 모델링



(b) 태양광용 DC/DC 컨버터부

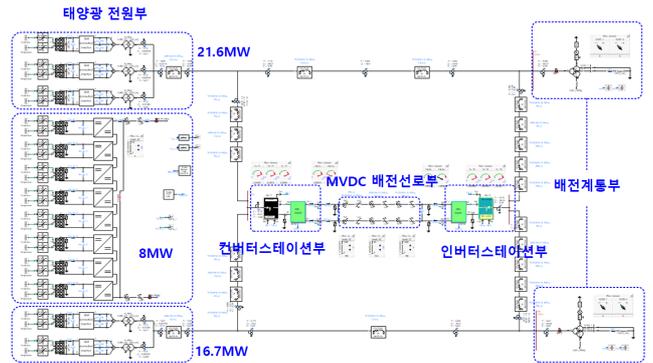


(b) 태양광용 DC/DC 컨버터 제어부

[그림 6] MVDC 선로 연계용 태양광전원 모델링

3.5 전체 시스템 모델링

전체 시스템은 그림 7과 같이 배전계통부, MVDC 배전선로부, 컨버터스테이션부, 인버터스테이션부, 태양광전원부로 구성된다. 여기서, AC선로는 일부 구간을 제외하고 대부분 가공선로로 구성되고, MVDC 배전선로는 대부분 가공선로로 구성된다.



[그림 7] 전체 MVDC 배전계통 모델링

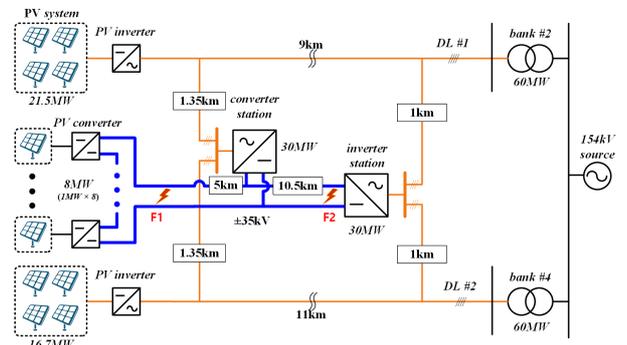
4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

$\pm 35kV$ 급 MVDC 배전계통에서의 사고해석을 수행하기 위하여, 사고지점 및 종류를 고려한 상정사고 모의 조건은 표 1과 같다. 여기서, 사고의 발생지점은 태양광전원용 DC/DC 컨버터가 MVDC 선로에 연계되는 지점(F1), 인버터 스테이션의 MVDC 선로가 지중선로에서 가공선로로 인출되는 지점으로 상정하며, 사고의 종류는 P-P 사고를 고려한다. 상기의 상정사고 지점을 단선도로 나타내면 그림 8과 같다.

[표 1] 상정사고별 시뮬레이션 조건

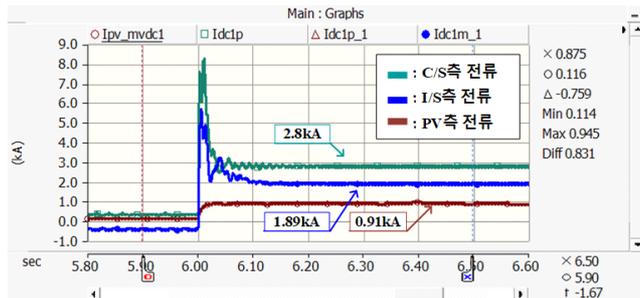
사고지점	사고종류
F1: 태양광전원용 DC/DC 컨버터가 MVDC 선로에 연계되는 지점	P(+)-P(-) fault
F2: 인버터 스테이션의 MVDC측 지중선로에서 가공선로로 인출되는 지점	P(+)-P(-) fault



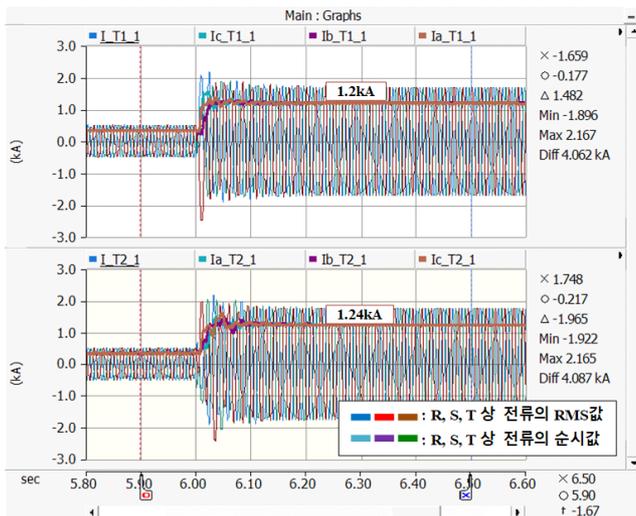
[그림 8] 대상 계통의 단선도

4.2 P-P 단락사고 특성

상기의 상정사고 모의 조건을 바탕으로, F1 지점에서 P-P 단락사고가 발생하는 경우에 대한 사고전류 특성은 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 9(a)는 MVDC측 사고전류이고, 그림 9(b)는 컨버터스테이션의 AC측 사고전류이다. 이 그림에서와 같이, F1 지점 사고 시 컨버터스테이션(C/S)측에서 공급되는 사고전류는 2.8[kA], 인버터스테이션(I/S)측에서 공급되는 사고전류는 1.89[kA], 태양광전원으로부터 공급되는 사고전류는 0.91[kA]만큼 유입됨을 알 수 있다. 이때, 컨버터스테이션의 AC측 사고전류는 DL #1과 DL#2로 부터 각각 1.2[kA], 1.24[kA]가 흐르는 것을 알 수 있다. 한편, MVDC 선로에서 사고발생 직후, 하단 및 상단 MMC에 충전되어 있는 Cell 커패시터의 방전으로 인하여, 그림 9(a)와 같이 컨버터스테이션측과 인버터스테이션의 사고전류는 순간적으로 각각 8.2[kA], 5.5[kA]로 상승함을 알 수 있었다. 따라서, MVDC 선로에 사고가 발생하는 경우, 컨버터스테이션이 탈락되거나 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.



(a) MVDC측 사고전류



(b) AC측 사고전류

[그림 9] F1지점 사고 시 MVDC 및 AC측 사고전류 특성

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터 및 인버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 ±35kV급 MVDC 배전계통의 모델링을 제시하였다. MVDC 선로에서 사고발생 직후, 하단 및 상단 MMC에 충전되어 있는 Cell 커패시터의 방전으로 인하여, 그림 9(a)와 같이 컨버터스테이션측과 인버터스테이션의 사고전류는 순간적으로 각각 8.2[kA], 5.5[kA]로 상승함을 알 수 있었다. 따라서, MVDC 선로에 사고가 발생하는 경우, 컨버터스테이션이 탈락되거나 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20191210301940)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] 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.