PSCAD/EMTDC에 의한 70kV급 MVDC 배전계통의 모델링 및 단락 사고특성에 관한 연구

이후동, 태동현, 김지명, 황승욱, 노대석
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail:lhd714@koreatech.ac.kr

Modeling and Fault Current Characteristics of 35kV MVDC Distribution System Based on PSCAD/EMTDC

Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Ji-Myung Kim, Seung-Wook Hwang, Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

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 적정한 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 MVDC 배전망의 실증을 위해 구축 중에 있는 ±35kV급 MVDC 배전계통을 대상으로 사고특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소, AC 및 DC 배전선로, 컨버터스테이션(C/S), 태양광전원으로 구성된 ±35kV급 MVDC 배전계통의 모델링을 제시한다. 이 모델링과 다양한 상정사고 조건을 바탕으로, ±35kV급 MVDC 배전계통에서의 사고지점 및 종류에 따른 사고특성을 정확하게 해석할 수 있어, 본 논문에서 제시한 모델링이 MVDC 배전계통의 사고해석에 유용함을 확인하였다.

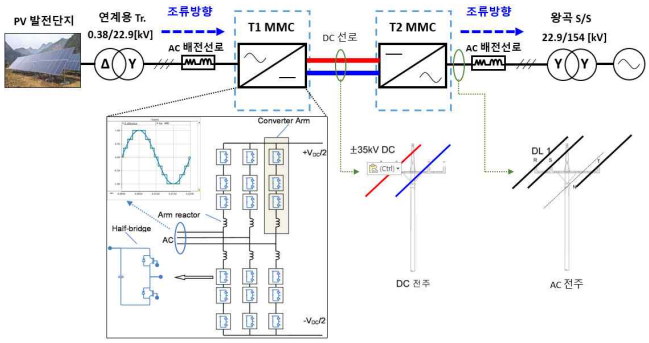
1. 서 론

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 적정한 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 MVDC 배전망의 실증을 위해 구축 중에 있는 ±35kV급 MVDC 배전계통을 대상으로 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, AC 및 DC 배전선로, 컨버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 MVDC 배전계통의 모델링을 제시한다. 이 모델링과 다양한 상정사고 조건을 바탕으로 MVDC 배전계통에서의 사고해석을 수행한 결과, DC 선로측 사고 시에 발생하는 사고전류는 태양광전원과 배전용변전소 양측에서 사고지점으로 흐르며, 사고 직후 컨버터의 필터용 커패시터의 방전으로 인하여 순간적으로 매우 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한, pole(+) to pole(-) 단락에 의한 사고전류는 총 6.38~8.4[kA] 정도로 태양광전원과 배전용변전소 양측에서 공급되며, pole(+) to ground 사고 시에는 사고전류의 크기가 매우 작아 검출이 어려움을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 모델링이 MVDC 배전계통의 사고해석에 유용함을 확인하였다.

2. 태양광전원이 연계된 70kV급 MVDC 배전계통의 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 발

생할 경우, 사고전류는 PV 발전단지와 왕곡 변전소로부터 양방향으로 공급될 수 있으며, 특히 DC ±35kV 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.

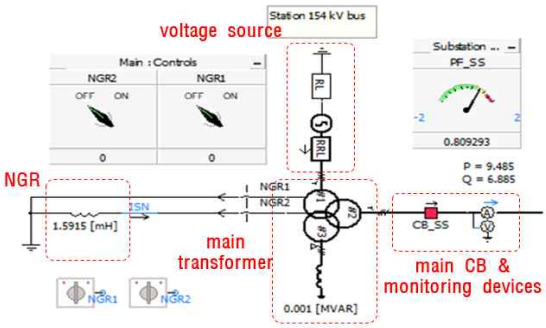


[그림 1] ±35kV MVDC 실증용 배전망의 구성도

3. PSCAD/EMTDC에 의한 70kV급 MVDC 배전계통의 모델링

3.1 배전용변전소 모델링

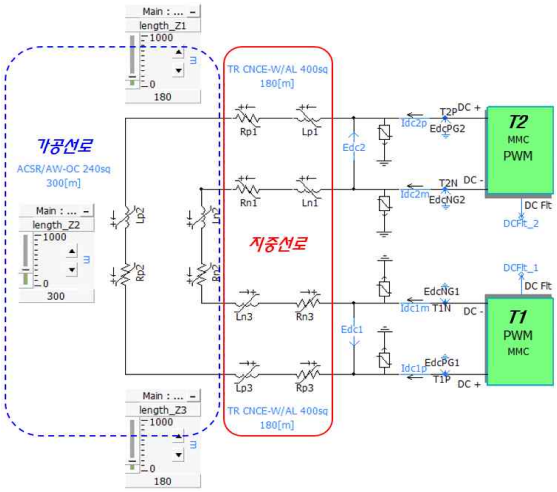
PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-△ 결선방식이며, 3차 권선은 제3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 적용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR(neutral grounding reactor)가 포함된다.



[그림 2] 배전용변전소의 모델링

3.2 DC 배전선로 모델링

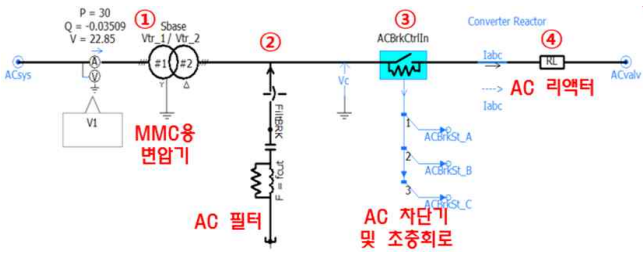
PSCAD/EMTDC를 이용하여 DC 배전선로를 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, DC 배전선로는 C/S 내부에서 외부로 인출되는 지중선로와 T1측 MMC에서 T2측 MMC로 연결되는 가공선로로 구성되며, 선로 긍장은 각각 180[m], 300[m]이다.



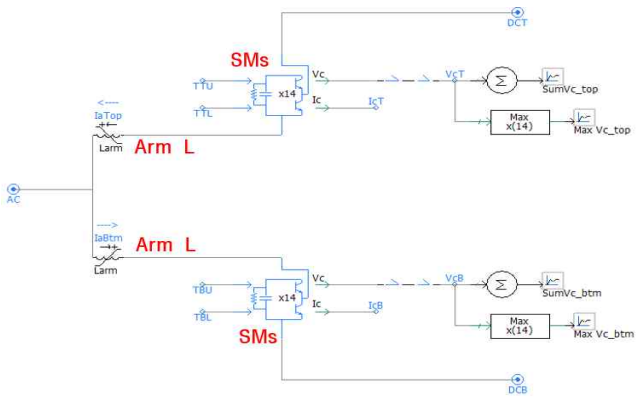
[그림 3] DC 배전선로 모델링

3.3 컨버터 스테이션 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 회로부와 서브모듈브로 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



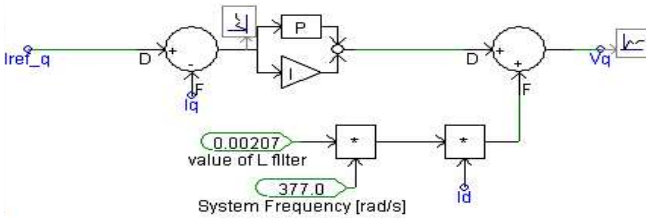
(b) 서브모듈부

[그림 4] 컨버터스테이션 모델링

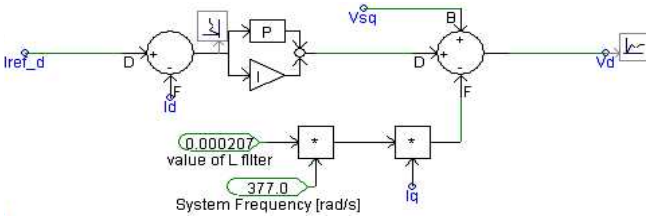
3.4 태양광전원 및 AC 배전선로 모델링

3.4.1 태양광전원

태양광전원용 계통연계형 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위한 제어기를 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, 전류 제어부는 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.



(a) q-axis 전류제어

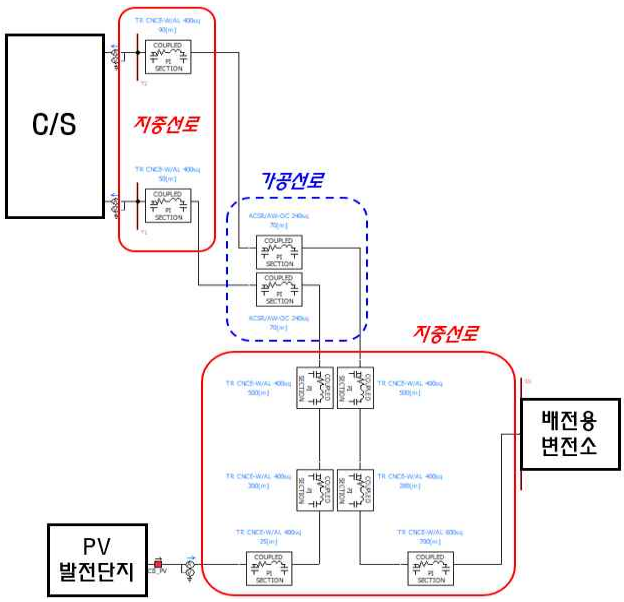


(b) d-axis 전류제어

[그림 5] 태양광전원의 전류제어기 모델링

3.4.2 AC 배전선로

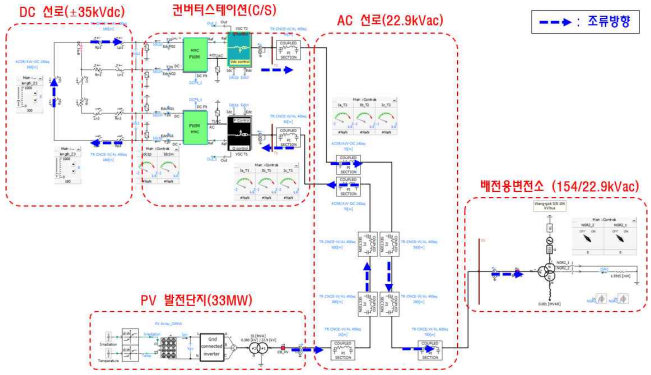
AC 배전선로는 그림 6과 같이 일부구간을 제외하고 대부분 지중선로로 구성되며, PV 발전단지에서 컨버터스테이션으로 연결되는 선로의 긍장은 945[m]이고, C/S에서 배전용변전소까지의 긍장은 1,650[m]이다.



[그림 6] AC 배전선로 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 7과 같다.



[그림 7] 전체 MVDC 배전계통 모델링

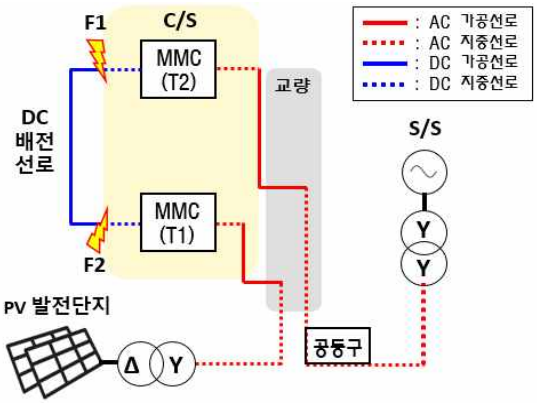
4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

±35kV급 MVDC 배전계통에서의 사고해석을 수행하기 위하여, 사고지점 및 종류를 고려한 상정사고 모의 조건은 표 1과 같다. 여기서, 사고의 발생지점은 MMC(T2)의 DC측 지중선로에서 가공선로로 인출되는 지점(F1)과 MMC(T1)의 DC측 지중선로에서 가공선로로 인출되는 지점(F2)으로 상정하며, 사고의 종류는 P-P 사고와 P-G 사고를 고려한다. 상기의 상정사고 지점을 단선도로 나타내면 그림 8과 같다.

[표 1] 상정사고별 시뮬레이션 조건

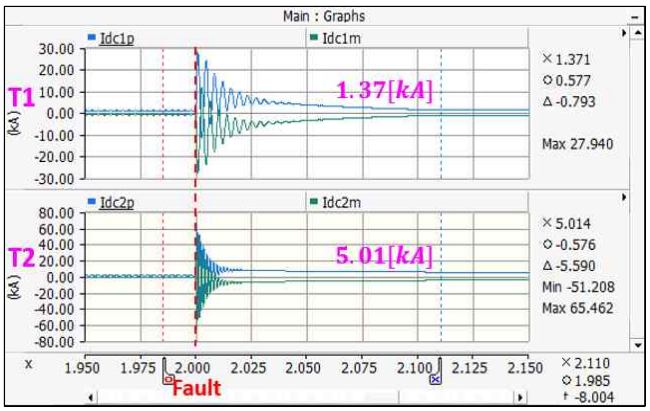
사고지점	사고종류
F1: MMC(T2)의 DC측 지중선로에서 가공선로로 인출되는 지점	P(+)-G, P(+)-P(-) fault
F2: MMC(T1)의 DC측 지중선로에서 가공선로로 인출되는 지점	P(+)-G, P(+)-P(-) fault



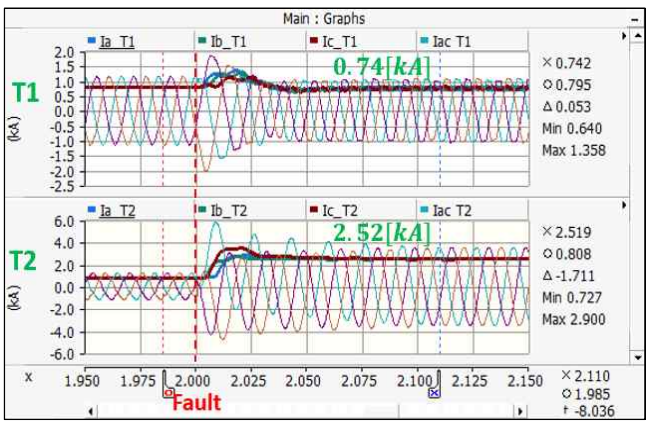
[그림 8] 대상 계통의 단선도

4.2 상정사고별 사고전류 특성

상기의 상정사고 모의 조건을 바탕으로, F1 지점에서 P-P 단락사고가 발생하는 경우에 대한 사고전류 특성은 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, F1 지점 사고 시 T1 MMC 측에서 공급되는 AC측 사고전류는 태양광전원으로부터 연계용변압기를 통해 0.74[kA] 만큼 유입되며, 하단 MMC(T1)를 거쳐 1.37[kA]의 사고전류가 DC배전선로를 통해 F1 지점으로 흐르는 것을 알 수 있다. 또한, T2 MMC 측에서 공급되는 AC측 사고전류는 배전용변압기를 통해 2.52[kA] 만큼 유입되며, 상단 MMC(T2)를 거쳐 5.01[kA]의 DC 사고전류가 F1 지점으로 흐르게 됨을 알 수 있다. 한편, DC 선로에서 사고발생 직후, 하단 및 상단 MMC에 충전되어 있는 Cell 커패시터의 순간적인 방전으로 인하여, 그림 9(a)와 같이 하단 및 상단 MMC에서 각각 최대 27.9[kA], 65.5[kA]의 DC 사고전류가 발생함을 알 수 있다.



(a) DC측 사고전류



(b) AC측 사고전류

[그림 9] F1지점 사고 시 DC 및 AC측 사고전류 특성

한편, 상정사고 조건별로 MVDC 배전선로에서의 사고전류 특성을 비교하여 나타내면 표 2와 같다. 이 표에서와 같이, P-P 사고가 발생하는 경우, 변전소측에 근접한 지점일수록 전체 사고전류가 크게 발생하며, 총 사고전류는 약 6.38~8.4[kA] 정도임을 알 수 있다. 또한, P-G 사고의 경우에는 사고지점과 관계없이 매우 적은 사고전류가 흐르게 되며, 그 크기가 매우 작아 검출이 어려움을 알 수 있다.

[표 2] 상정사고별 사고전류 특성

사고 지점	사고종류	공급전류의 크기[kA]				
		T1 MMC측		T2 MMC측		총 사고 전류 ($I_{f,\max}$)
		DC	AC	DC	AC	
F1	P-P fault	1.37	0.74	5.01	2.52	6.38(85.7)
	P-G fault	0.85	0.79	0.85	0.79	0.02
F2	P-P fault	3.53	0.73	4.87	2.47	8.4(86.3)
	P-G fault	0.85	0.79	0.85	0.79	0.02

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, AC 및 DC 배전선로, 컨버터스테이션, 태양광전원으로 구성된 ±35kV급 MVDC 배전계통의 모델링을 제시하였다. 다양한 상정사고 조건을 바탕으로 MVDC 배전계통에서의 사고해석을 수행한 결과, DC 선로측 사고 시의 전류는 발생 직후 컨버터의 필터용 커패시터의 방전으로 인하여 순간적으로 매우 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한, P-P 단락에 의한 사고전류는 총 6.38~8.4[kA] 정도로 나타났으며, P-G 사고 시에는 전류의 크기가 매우 작아 검출이 어려움을 알 수 있었다.

감사의 글

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.