

±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 보호협조 운용방안에 관한 연구

김지명, 한병길, 이후동, 조성덕 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Protection Coordination Operation Method of ±35kV Hybrid MVDC Distribution System

Ji-Myung Kim, Byeong-Gill Han, Hu-Dong Lee, Sung-Duck Cho, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 신재생에너지전원의 급격한 도입으로 인한 계통접속 지연 문제를 해결하기 위한 방안으로, 컨버터스테이션을 통해 22.9kVAC를 ±35kVDC로 변환하여, 기존의 배전망과 연계하여 신재생에너지전원을 수용하는 MVDC 하이브리드 배전망의 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망에 대하여, AC 배전선로 및 MVDC 선로에서 사고가 발생할 경우 하이브리드 배전망의 안정적인 운용을 위한 상정사고 시나리오별 보호협조 운용방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터스테이션, 인버터스테이션, 태양광 발전단지 등으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 모델링을 수행한다. 상기의 운용방안과 모델링을 바탕으로 상정사고 시나리오별 사고특성을 분석한 결과, 1선 지락시의 사고전류 특성은 약 47% 정도 감소하며, 단락 사고전류는 최대 18.5kA까지 급격하게 증가한다. 따라서, MVDC 하이브리드 배전망을 안정적으로 운용하기 위하여, AC 배전선로의 보호기기 정정치를 변압기의 접지와 NGR의 유무에 따라 검토해야 함을 알 수 있으며, 본 논문에서 제안한 보호협조 운용방안과 모델링이 MVDC 하이브리드 배전망의 안정적인 운용에 유용함을 알 수 있었다.

Abstract Recently, demonstration projects of hybrid MVDC distribution technology have been actively conducted in connection with existing distribution systems, which convert 22.9kVAC into ±35kVDC through a converter station and accept renewable energy sources. This is done as a counter-measure to solve the hosting capacity problem caused by the rapid introduction of renewable energy sources. This paper proposes a protection coordination operation method for each fault scenario for stable operation of a ±35-kV hybrid MVDC distribution system in fault points on an AC distribution feeder and MVDC distribution feeder. We modeled a ±35-kV hybrid MVDC distribution system using PSCAD/EMTDC, which is composed of a distribution substation, MVDC distribution feeder, converter station, inverter station, and PV system. A simulation of fault analysis in the hybrid MVDC distribution system was done based on the modeling for a fault scenario. The results confirmed that the fault current characteristics of a single ground fault is reduced by about 47% according to the simulation condition, and the short circuit current is rapidly increased up to 18.5kA. The protection device setting values of the AC distribution feeder were determined by considering the grounding of the transformer in a converter and inverter station and the NGR in the main transformer in order to stably operate the hybrid MVDC distribution system.

Keywords : Hybrid Distribution System, MVDC Grid, AC Grid, Protection Coordination Operation Method, Fault Analysis

본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No. CPS22131-100)의 지원과 2022년 한국 기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received January 18, 2023

Revised February 13, 2023

Accepted March 3, 2023

Published March 31, 2023

1. 서론

최근, 신재생에너지전원의 급격한 도입으로 인한 계통 접속 지연 문제를 해결하기 위한 방안으로, 컨버터스테이션을 통해 22.9kV_{AC}를 ±35kV_{DC}로 변환하여, 기존의 배전망과 연계하여 신재생에너지전원을 수용하는 MVDC 하이브리드 배전망의 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-5]. 그러나, MVDC 하이브리드 배전망은 기존 AC 배전망의 공급용량보다 높고 사고전류가 유입되는 경로에 따라 전체 사고전류를 크게 증가시킬 수 있으므로, 선로 및 주요설비들을 보호하기 위한 보호협조 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 배전용 변전소, MVDC 배전선로, 컨버터스테이션, 인버터스테이션, 태양광 발전단지 등으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 모델링을 제시하고, AC 배전선로 및 MVDC 선로에서 사고가 발생하는 경우에 대하여, 시나리오별 보호협조 운용방안을 제안한다. 여기서, 사고 조건은 컨버터스테이션과 인버터스테이션의 내부 변압기 측 접지와 배전용변전소의 NGR(neutral grounding reactor)의 설치 유무에 따른 AC 배전선로의 1선 지락 사고와 3상 단락사고 및 MVDC 선로 중간의 단락사고로 상정한다.

상기의 모델링을 바탕으로 상정 시나리오별 사고해석을 수행한 결과, AC 배전선로에서 1선 지락 사고가 발생하는 경우, 사고전류는 상정 사고에 따라 방향과 크기가 변동되므로 AC배전선로의 R/C에 설치되는 OCGR은 변압기의 접지와 NGR의 유무에 따라 보호기기의 정정치를 산정해야 함을 알 수 있다. 또한, AC 배전선로에서 3상 단락사고가 발생하는 경우, 사고전류는 거의 동일한 크기가 발생하므로, 접지와 NGR의 유무에 관계없이 보호기기의 정정치를 산정할 수 있음을 알 수 있다. 한편, MVDC 선로 중간에서 단락 사고가 발생하는 경우, 상정 사고 시나리오별 하이브리드 배전망의 사고전류는 거의 동일하게 증가하며, 사고구간이 분리된 후, AC 배전선로에 흐르는 사고전류가 증가하여 R/C의 오동작을 발생시켜 수용가의 정전 등 문제점이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다.

2. ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 보호협조 운용방안

2.1 하이브리드 배전망의 구성

컨버터스테이션을 통해 22.9kV_{AC}를 ±35kV_{DC}로 변환하여, 기존의 배전망과 연계하여 신재생에너지전원을 수용하는 MVDC 하이브리드 배전망의 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다. 여기서, MVDC 하이브리드 배전망의 구성은 Fig. 1과 같으며, 태양광 발전단지(PV 1, PV 2), 22.9kV AC배전선로, 컨버터스테이션 및 인버터스테이션, ±35kV MVDC 배전선로, 배전용변전소(154/22.9kV) 등으로 구성된다. 따라서, 상기의 하이브리드 배전망은 기존의 AC 배전망과 다르게 사고전류의 흐름이 다양하게 나타남으로 이를 고려하여 보호협조를 설계할 필요가 있다.

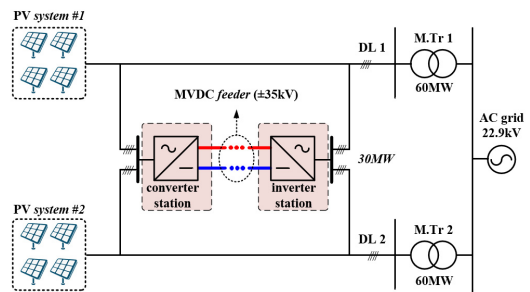


Fig. 1. Configuration of hybrid MVDC distribution system

2.2 하이브리드 배전망의 보호협조 운용방안

2.2.1 AC 배전선로에서 사고가 발생할 경우

MVDC 하이브리드 배전망의 AC 배전선로에서 지락 사고가 발생할 경우, 사고전류는 Fig. 2와 같이, 컨버터스테이션과 인버터스테이션을 통하여 두 개의 배전선로(DL 1, DL 2)에 연계된 태양광 발전단지와 배전용변전소로부터 공급될 수 있으며, 특히 사고전류는 컨버터스테이션과 인버터스테이션의 내부 변압기의 접지 방식과 배전용변전소의 NGR의 설치 유무에 따라 크기와 방향이 변동될 수 있다. 즉, 사고전류는 1번 태양광 발전단지에서 유입되는 전류(①)와 2번 태양광 발전단지에서 유입되는 전류(②), 1번 주변압기에서 유입되는 전류(③), 2번 주변압기에서 유입되는 전류(④), 컨버터스테이션을 통해 유입되는 전류(⑤), 인버터스테이션을 통해 유입되는 전류(⑥), 분류효과에 의해 컨버터스테이션 및 인버터스테이션의 내부 변압기 접지를 통해 유입되는 전류(⑦)로 구성된다. 여기서, 각 사고전류는 선로 임피던스의 값에 의하여 크기가 다양하게 나타나며, 특히, 변압기의 접지 및 NGR의 설치 유무에 따라 분류효과에 의해 유입되는 사

고전류(⑦)는 컨버터스테이션의 역방향으로 흐를 가능성이 있다. 따라서, 기존에 설정된 보호기기 정정치에 의해 보호협조가 수행될 경우, 다양한 시나리오별 사고전류의 크기와 방향에 의해 보호협조가 정상적으로 이루어질 수 없으므로 안정적인 MVDC 하이브리드 배전망의 운용을 위하여 보호협조를 위한 사고특성 해석이 요구되고 있다.

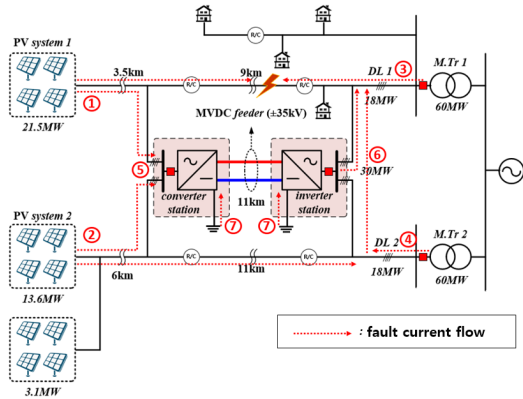


Fig. 2. Fault current flow with AC distribution feeder fault

2.2.2 MVDC 선로에서 사고가 발생할 경우

MVDC 하이브리드 배전망의 MVDC 선로에서 단락 사고가 발생할 경우, 사고전류는 Fig. 3과 같이, 1번 태양광 발전단지에서 유입되는 전류(①)와 2번 태양광 발전단지에서 유입되는 전류(②), 1번 주변압기에서 유입되는 전류(③), 2번 주변압기에서 유입되는 전류(④), 컨버터스테이션을 통해 유입되는 전류(⑤), 인버터스테이션을 통해 유입되는 전류(⑥)로 구성된다. 여기서, 컨버터스테이션 및 인버터스테이션을 통해 사고지점으로 유입되는 전류는 두 개의 태양광 발전단지와 두 개의 주변압기로부터 유입되며, 서브모듈의 DC 링크 커패시터의 방전에 의하여 매우 높은 초기 전류가 발생할 가능성이 있다. 즉, 컨버터스테이션 및 인버터스테이션은 사고 발생 후 빠르게 정지될 수 있으며, 태양광 발전단지에서 발전된 전력은 AC 배전선로를 통해 공급하게 된다. 따라서, 기존의 전류만을 고려하여 설정된 AC 배전선로의 R/C는 컨버터스테이션과 인버터스테이션의 정지로 인해 높은 전류가 유입되어 오동작할 가능성이 있어, 안정적인 MVDC 하이브리드 배전망의 운용을 위하여 보호협조를 위한 사고특성 해석이 요구되고 있다.

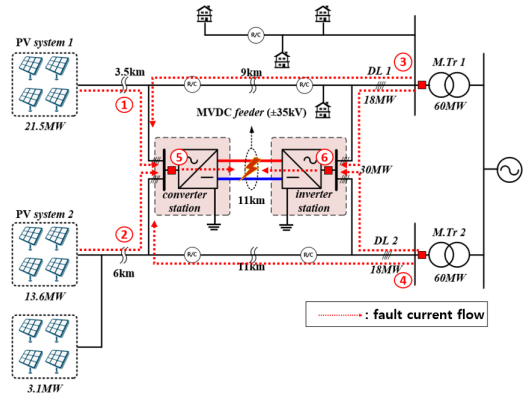


Fig. 3. Fault current flow with MVDC distribution feeder fault

3. PSCAD/EMTDC에 의한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 모델링

3.1 배전용변전소부

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소부의 모델링을 수행하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제 3고조파를 제거하기 위하여 델타 결선 방식을 채용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR이 설치되는 것으로 상정한다[6].

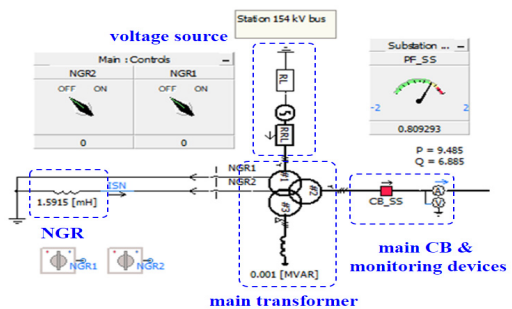


Fig. 4. Modeling of distribution substation

3.2 컨버터 및 인버터스테이션부

Half-bridge SM(sub-module)을 기반으로한 컨버터 및 인버터 스테이션부는 Fig. 5와 같이, AC 회로부와 서브모듈부, 서브모듈로 구성된다. 여기서, Fig. 5(a)는 MMC의 AC 회로 모델링이며, MMC용 변압기(①), AC

필터(②), 차단기 및 초충회로(③), AC 리액터(④)로 구성된다. 또한, Fig. 5(b)는 MMC의 서브모듈부를 나타낸 것으로, 제어신호를 받아 AC 22.9kV를 DC ±35kV로 변환되며, 서브모듈의 스위칭으로 인한 고조파는 각 상별로 상단과 하단측의 서브모듈에 연결된 Arm 리액터에 의해 필터링 된다[7-9]. 한편, Fig. 5(c)는 서브모듈의 제어부로서, Fig. 5(c)의 ①, ② 부분은 각각 d축 제어와 q축 제어를 나타낸다. 먼저, d축 제어는 운용모드에 따라 유효전력(P)을 조절하고 DC 전압을 유지하도록 설정하며, PI 제어기를 통해 목표 값을 현재의 값과 비교하여 구해진 편차로부터 d축 전류(i_d)가 산정된다. 또한, q축 제어부분은 운용모드에 따라 무효전력(Q)과 AC 전압을 제어할 수 있으며, PI 제어기를 통해 산정된 q축 전류(i_q) 값에 의해 제어된다.

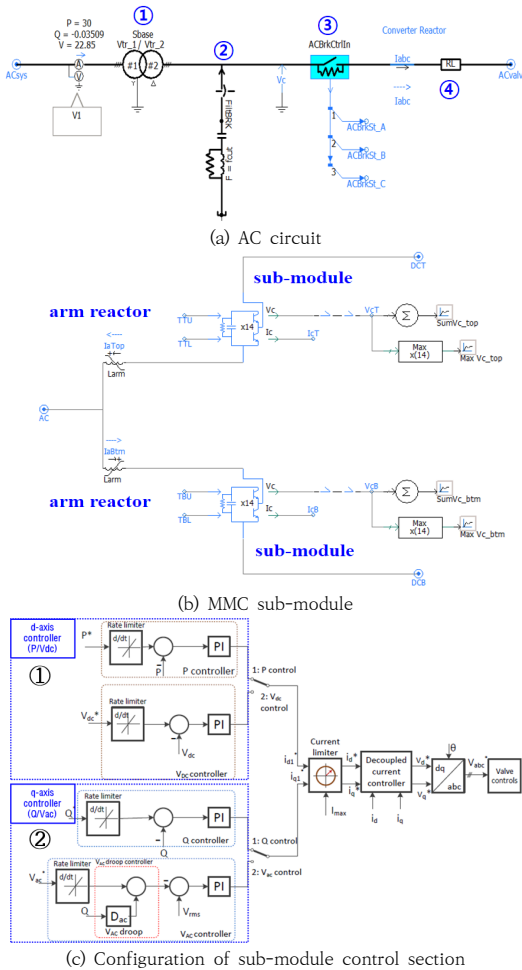


Fig. 5. Modeling of converter and inverter station

3.3 태양광 발전단지부

3.3.1 태양광모듈

태양광모듈의 등가회로는 Fig. 6과 같이 전류원, 다이오드, 병렬 저항 및 직렬 저항으로 구성된다[10]. 여기서, I_{sc} 는 태양광모듈의 단락전류, I_d 는 다이오드로 흐르는 전류, R_{pal} 는 병렬 저항, R_{sr} 은 직렬 저항, I 는 태양광모듈의 출력 전류, V 는 출력 전압을 나타낸다.

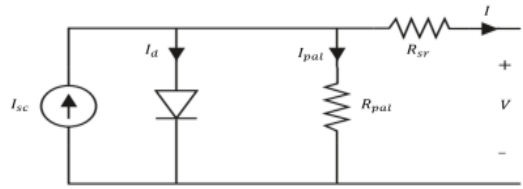


Fig. 6. Equivalent circuit of PV module

구체적으로, 태양광모듈의 출력 전류 I 는 단락전류인 I_{sc} 에서 다이오드로 흐르는 전류 I_d 와 병렬저항으로 흐르는 전류 I_{pal} 을 뺀 값이며, 여기서 태양광모듈의 단락전류인 I_{sc} 는 단락전류의 최대값인 I_{scR} 에서 최대 전류가 나올 수 있는 기준 일사량과 온도에서 현재 일사량과 온도를 고려하여 산정되며 이를 수식으로 나타내면 Eq. (1), Eq. (2)와 같다.

$$I = I_{sc} - I_d - I_{pal} \quad (1)$$

$$I_{sc} = I_{scR} \times \frac{G}{G_R} [1 + a_T (T_c - T_{cR})] \quad (2)$$

where, I : output current[A], I_{sc} : short circuit current[A], I_d : diode current[A], I_{pal} : parallel current[A], I_{scR} : maximum short circuit current[A], G : measured radiation(W/m^2), G_R : reference radiation(W/m^2), a_T : temperature coefficient, T_c : measured temperature[°C], T_{cR} : reference temperature[°C]

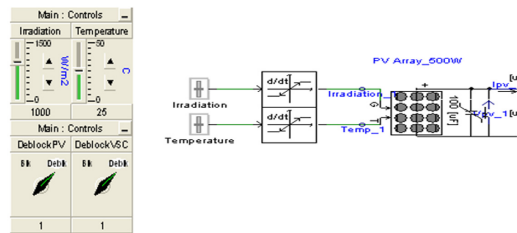


Fig. 7. Modeling of PV module section

한편, 태양광모듈을 모델링하면 Fig. 7과 같다. 여기서, Fig. 7은 태양광모듈의 모델링을 나타내며, 일사량과 온도에 의해 태양광모듈의 출력을 제어한다.

3.3.2 태양광전원용 DC/DC 컨버터

태양광전원용 DC/DC 컨버터는 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 8(a)는 최대 전력점 추종제어 회로로, 태양광모듈의 출력 전압과 전류를 이용해 최대 전력점을 추종하며, Fig. 8(b)는 DC/DC 컨버터의 주회로를 나타낸다. 또한, Fig. 8(c)는 정전력 제어기로, outer loop는 추종된 최대 전력점을 바탕으로 현재의 출력전력과 이전 출력전력의 오차값에 대해 PI제어를 수행한다. 또한, inner loop는 outer loop의 PI 제어기 출력 값과 센싱된 전류의 오차 값에 대해 PI 제어를 수행하며, 제어기 출력 값은 삼각파와 비교를 통해 IGBT의 듀티비를 조절한다.

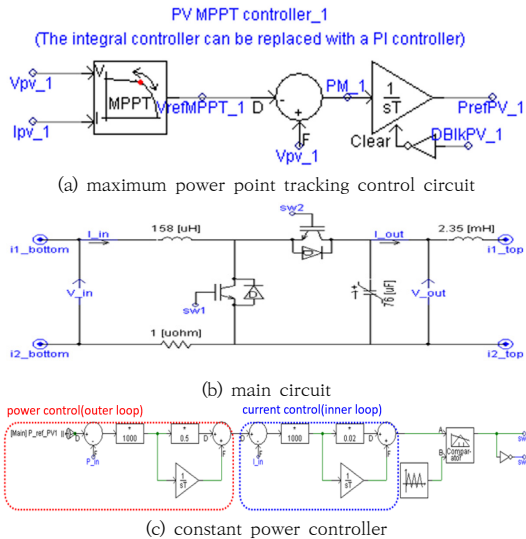


Fig. 8. Modeling of DC/DC converter for PV system

3.4 전체 계통

상기의 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 전체 시스템 구성은 Fig. 9와 같이, 배전용변전소(A), 컨버터 및 인버터스테이션(B), 태양광 발전단지부(C), AC 배전선로부(D), MVDC 선로부(E) 등과 같이 나타낼 수 있다.

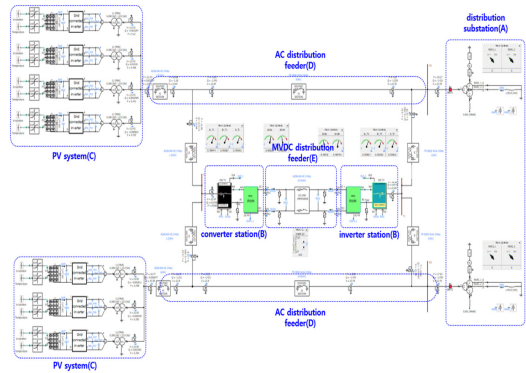


Fig. 9. Modeling of entire hybrid MVDC distribution system

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

상기의 모델링을 바탕으로 ±35kV MVDC 하이브리드 배전망의 사고해석을 위한 대상 모델 계통은 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 컨버터스테이션은 태양광 발전단지부의 AC 22.9kV의 출력을 DC ±35kV로 변환하여, MVDC 선로로 DC ±35kV를 공급하고, 인버터스테이션은 DC ±35kV를 AC 22.9kV로 변환하여 1번 DL과 2번 DL을 통하여 전력을 배전용변전소로 공급한다. 또한, 1번 DL과 2번 DL의 전체 AC 배전선로 공장은 각각 12.5km, 17km이며, 각 AC 배전선로로부터 컨버터 및 인버터스테이션까지 선로 공장은 1km이고, MVDC 선로 공장은 11km로 상정한다. 또한, 사고해석을 위한 컨버터 및 인버터 스테이션, MVDC, AC 배전선로 등의 상세 내역은 Table 1과 같다. 한편, MVDC 하

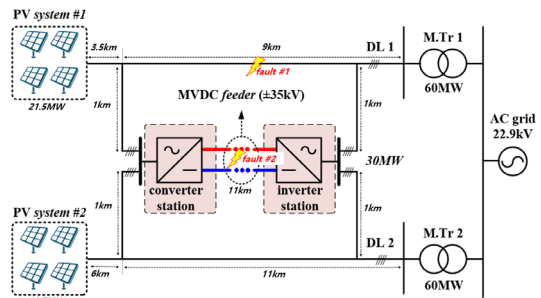


Fig. 10. Configuration of hybrid MVDC distribution system

이브리드 배전망의 사고 시나리오는 Table 2와 같이, 컨버터스테이션 및 인버터스테이션의 내부 변압기의 접지와 배전용변전소 NGR의 설치 유무를 고려하여 1번 DL의 선로 중간에 1선 지락과 3상 단락사고가 발생하는 경우(fault #1)와 MVDC 선로 중간에 단락사고가 발생하는 경우(fault #2)로 상정한다.

Table 1. Sumulatuoin conditions

items		contents	
converter station, inverter station	type	modular multi-level converter (sub-module: half-bridge type)	
	rated capacity	33[MVA]	
	rated voltage and current	AC	22.9[kV], 833[A]
		DC	±35[kV], 472[A]
	number of multi-level	28	
	capacitor of sub-module	1000[μF]	
	arm reactor	15[mH]	
	transformer	connection	Yg-Δ
		voltage ratio	22.9/53[kV]
		capacity	35[MVA]
operation mode	Vdc-Q control mode(inverter) Vdc-Vac control mode(converter)		
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	21.5[MW]	
DL 2	primary feeder	overhead	ACSR/AW-OC 240mm ²
		underground	TR CNCE-W/AL 400mm ² TR CNCE-W/AL 600mm ²
		total length	17[km]
PV system	capacity	19.7[MW]	

Table 2. Contengency fault conditions

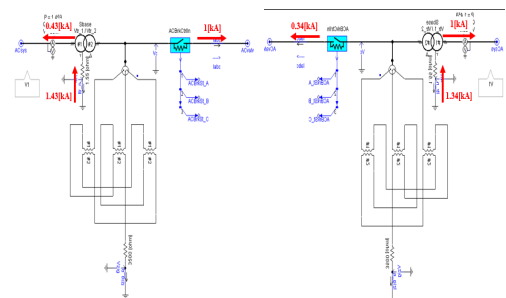
items	grounding of transformer in converter and inverter station	NGR in main transformer
Case I	O	X
Case II	O	O
Case III	X	X
Case IV	X	O

4.2 AC 배전선로 사고시, 사고 특성(Case I)

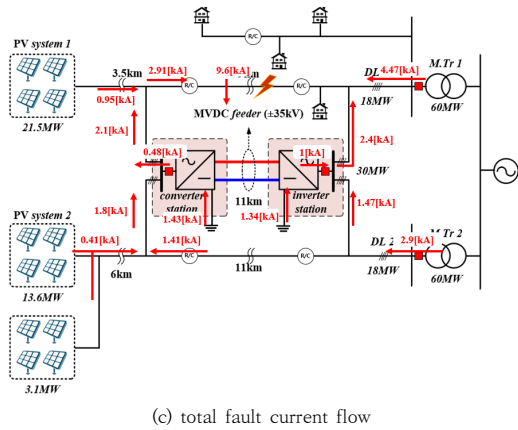
4.2.1 1선 지락 사고

컨버터스테이션과 인버터스테이션 내부 변압기에 접지가 되어있고, NGR이 설치되지 않은 Case I에 대한 1선 지락사고 특성을 나타내면 Fig. 11과 같다. 여기서, Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 컨버터스테이션과 인버터스테이션의 내부변압기에서 발생하는 사고전류의 흐름이며, Fig. 11(c)는 전체 사고전류의 흐름을 나타낸다. 먼저, 컨버터스테이션측 내부변압기에 설치된 접지를 통하여 유입되는 전류는 Fig. 11(a)과 같이, 분류효과에 의하여 1.43kA의 전류가 유입되며, 컨버터스테이션은 정상상태의 전류의 흐름과 다르게 역방향으로 사고지점에 0.48kA의 전류를 공급함을 알 수 있다. 또한, 인버터스테이션측 내부변압기에 설치된 접지를 통하여 유입되는 전류는 Fig. 11(b)과 같이, 분류효과에 의하여 1.34kA의 전류가 유입되며, 사고지점에 1kA의 전류를 공급함을 알 수 있다.

한편, 전체 사고전류의 크기는 Fig. 11(c)와 같이 9.6kA이며, 사고지점에서 가까운 1번 주변압기에서 4.47kA, 사고지점에서 떨어진 2번 주변압기에서 2.9kA, 두 개의 태양광 발전단지로부터 각각 0.95, 0.41kA의 사고전류가 유입된다. 여기서, MVDC 하이브리드 배전망은 1번 DL과 2번 DL이 컨버터스테이션과 인버터스테이션을 통해 연결되어 있기 때문에 1번 DL에서 발생한 사고에도 2번 DL에 연계된 태양광 발전단지와 2번 주변압기에서 사고전류가 유입됨을 알 수 있다. 따라서, MVDC 하이브리드 배전망의 사고전류는 기존의 AC배전선로에서 사고가 발생하는 경우보다 유입되는 경로가 복잡하기 때문에, 안정적으로 하이브리드 배전망을 운용하기 위해서는 이를 고려하여 보호협조를 수행해야함을 알 수 있다.



(a) internal transformer in converter station (b) internal transformer in inverter station



(c) total fault current flow

Fig. 11. Characteristics of fault current with single ground fault

4.2.2 3상 단락 사고

컨버터스테이션과 인버터스테이션 내부 변압기에 접지가 되어있고, NGR이 설치되지 않은 Case I에 대한 3상 단락사고 특성을 나타내면 Fig. 12와 같다. 여기서, 전체 사고전류의 크기는 8.57kA이며, 1번 주변압기에서 5.2kA, 2번 주변압기에서 3.5kA, 태양광 발전단지로부터 각각 0.63, 0.47kA의 사고전류가 유입된다. 즉, MVDC 하이브리드 배전망은 1번 DL과 2번 DL이 컨버터스테이션과 인버터스테이션을 통해 연결되어 있기 때문에 1번 DL에서 발생한 사고에도 2번 DL에 연계된 태양광 발전단지와 2번 주변압기에서 사고전류가 유입됨을 알 수 있다. 하지만, 3상 단락사고는 1선 지락사고와 다르게 분류효과가 발생하지 않아 컨버터스테이션이 정상적으로 운용되고 있음을 알 수 있다.

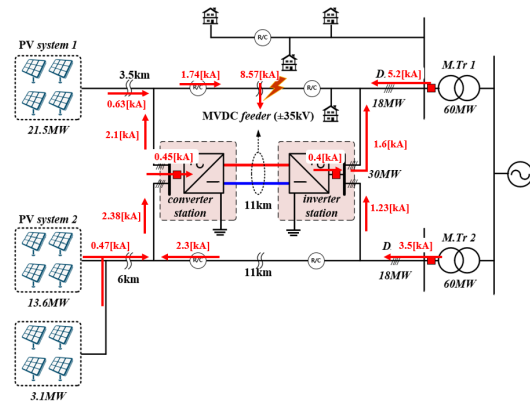


Fig. 12. Characteristics of fault current with the 3-phase short circuit fault

4.2.3 종합 분석

Table 3. Characteristics of single line ground fault

	fault current[kA]				
	PV system	converter station	inverter station	distribution substation	total
Case I	PV 1 : 0.95	0.48 (reverse)	1 (forward)	bank #2 : 4.47	9.6
	PV 2 : 0.41			bank #4 : 2.9	
Case II	PV 1 : 1	0.63 (reverse)	1.73 (forward)	bank #2 : 2.63	7.6
	PV 2 : 0.54			bank #4 : 1.61	
Case III	PV 1 : 1.5	0.5 (forward)	0.87 (forward)	bank #2 : 4.53	9.6
	PV 2 : 0.41			bank #4 : 3	
Case IV	PV 1 : 1.38	0.65 (forward)	0.7 (forward)	bank #2 : 1.66	5.01
	PV 2 : 0.8			bank #4 : 1.02	

Table 4. Characteristics of 3-phase short circuit fault

	fault current[kA]				
	PV system	converter station	inverter station	distribution substation	total
Case I	PV 1 : 0.63	0.44 (forward)	0.4 (forward)	bank #2 : 5.2	8.57
	PV 2 : 0.47			bank #4 : 3.5	
Case II	PV 1 : 0.63	0.7 (forward)	0.46 (forward)	bank #2 : 5.24	8.57
	PV 2 : 0.47			bank #4 : 3.5	
Case III	PV 1 : 0.55	0.7 (forward)	0.46 (forward)	bank #2 : 5.24	8.57
	PV 2 : 0.47			bank #4 : 3.5	
Case IV	PV 1 : 0.55	0.7 (forward)	0.46 (forward)	bank #2 : 5.24	8.57
	PV 2 : 0.47			bank #4 : 3.5	

상기와 같은 방식으로 다른 상정 조건에 대하여 AC 배전선로에서 1선 지락과 3상 단락 사고의 사고전류 특성을 종합적으로 나타내면 각각 Table 3, Table 4와 같다. 여기서, Table 3과 같이, 가장 큰 1선 지락시의 사고전류는 Case I의 9.6kA이고, 가장 작은 사고전류는 Case IV의 5.01kA가 발생함을 알 수 있다. 즉, 1선 지락 시, Case IV의 사고전류는 접지를 통하여 순환되는 전류의 크기가 감소됨에 따라 Case I보다 약 47% 정도 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 향후 MVDC 하이브리드 배전망을 안정적으로 운용하기 위하여, AC배전선

로의 R/C에 설치되는 OCGR은 변압기의 접지와 NGR의 유무에 따라 보호기기의 정정치를 주의하여 산정해야 함을 알 수 있다. 한편, 3상 단락사고 시, 하이브리드 배전망의 사고특성은 Table 4와 같다. 여기서, 사고전류는 Case I ~ Case IV에 대하여 거의 동일한 값(8.57kA)이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 접지와 NGR의 유무에 관계없이 보호기기의 정정치를 산정할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 MVDC 선로 사고시, 사고전류 특성

MVDC 선로 중간에서 단락 사고가 발생할 경우, 사고전류 특성을 나타내면 Fig. 13과 같다. 여기서, 사고전류 ($I_{f,max}$)는 Fig. 13(a)와 같이, Case I에서 Case IV까지 동일하게 최대 18.5kA까지 급격하게 증가하며, 컨버터스테이션과 인버터스테이션은 높고 빠른 DC측 사고전류로 인하여 사고 발생 후 10ms 이후에 정지하게 된다. 또한, AC 배전선로의 전류 특성은 Fig. 13(b)와 같이, 컨버터스테이션과 인버터스테이션이 정상적으로 동작할 때 80A가 배전용변전소로 흘러가지만, 사고 이후 배전용변전소에서 사고지점으로 약 1.1kA의 사고전류를 공급한다. 여기서, 사고구간이 분리된 후에는 470A의 전류가 태양광 발전단지로부터 배전용변전소측으로 공급되며, 이로 인하여 R/C의 오동작이 발생하여 수용가의 정전 등 문제가 발생할 가능성이 있다.

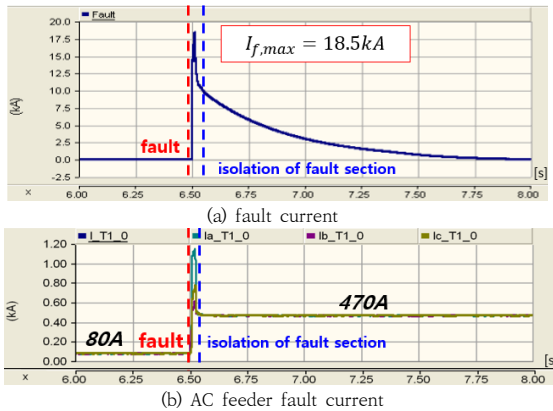


Fig. 13. Fault current characteristics with short circuit in MVDC feeder

5. 결론

본 논문에서는 신재생에너지전원의 급격한 도입으로 인한 계통접속 지연 문제를 해결하기 위하여 활발하게

연구 중인 MVDC 하이브리드 배전망의 보호협조 운용방안을 제시하며, PSCAD/EMTDC를 이용해 하이브리드 배전망의 전체 시스템을 모델링하고 시나리오별 사고전류 특성 해석을 수행한다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) AC 배전선로에서 1선 지락 사고가 발생하는 경우, Case IV의 사고전류는 접지를 통하여 순환되는 전류의 크기가 감소됨에 따라 Case I보다 약 47% 정도 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 향후 MVDC 하이브리드 배전망을 안정적으로 운용하기 위하여, AC배전선로의 R/C에 설치되는 OCGR은 변압기의 접지와 NGR의 유무에 따라 보호기기의 정정치를 주의하여 산정해야 함을 알 수 있다.
- (2) AC 배전선로에서 3상 단락사고가 발생하는 경우, 하이브리드 배전망의 사고전류는 Case I ~ Case IV에 대하여 거의 동일한 값(8.57kA)이 발생하여, 접지와 NGR의 유무에 관계없이 보호기기의 정정치를 산정할 수 있음을 알 수 있다.
- (3) MVDC 선로 중간에서 단락 사고가 발생하는 경우, 하이브리드 배전망의 사고전류는 Case I에서 Case IV까지 동일하게 최대 18.5kA까지 급격하게 증가하며, 사고구간이 분리된 후, AC 배전선로에 흐르는 전류는 470A의 전류가 태양광 발전단지로부터 배전용변전소측으로 공급되며, 이로 인하여 AC 배전선로에 설치된 R/C에 오동작을 일으켜, 수용가의 정전 등 문제점이 발생할 가능성이 있다.

References

- [1] H. D. Lee, K. Y. Kim, M. S. Kim, D. S. Rho, "A Study on Economic Evaluation Modeling of MVDC Distribution System for Hosting Capacity of PV System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 22, No. 3, pp. 1-12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.3.1>
- [2] J. S. Kim, H. S. Hong, S. K. Jang, K. I. Kim, "The Simulator Deployment of Analyzing the Power Grid Stability for Prosumer Energy Transaction", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 177-178, 2019.
- [3] B. G. Han, H. D. Lee, J. M. Kim, S. M. Choi, D. S. Rho. (2022). Modeling and Fault Current Characteristics of ± 35 kV MVDC Distribution System Based on

PSCAD/EMTDC. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 23(4), 1-9.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.4.1>

- [4] H. O. Lim, H. J. Kim, J. B. Sim, S. S. Cho, "An Analysis Study on the Proposal for Increasing Hosting Capacity in Distribution Feeders", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 69, No. 3, pp. 516-522, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.3.516>
- [5] C. H. Han, H. S. Lee, and G. S. Jang, "MVDC (Medium-Voltage Direct Current) Technology Trends," The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 68, no. 1, pp. 17-21, 2019.
- [6] J. M. Kim, D. H. Tae, I. M. Lee, G. P. Lim, D. S. Rho, "A Study on Modeling of Leakage Current in ESS Using PSCAD/EMTDC", Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 22, No. 2, pp. 810-818, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.2.810>
- [7] J. M. Kim, H. D. Lee, D. H. Tae, D. S. Rho, "A Study on Fault Analysis Modeling of 5W MV-LVDC Off-grid Micro Grid System", Journal of Electric Engineering and Technology, vol. 22, no. 9, pp. 745~753, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.9.745>
- [8] B. G. Han, H. D. Lee, D. H. Tae, D. S. Rho, "Operation Characteristics and Implementation of Fault Current Clamping Device in Radial-type MVDC Distribution System," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 70, no. 8, pp. 1146-1155, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.8.1146>
- [9] U. N. Gnanarathna, A. Gole, R. Jayasinghe, "Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, pp. 316-324, 2011.
DOI: <http://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2060737>
- [10] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, vol. 32, no. 6, pp.91-99, 2018.12.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.091>

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

한 병 길(Byeong-Gill Han)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 전자계어공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 ~ 2020년 4월 : 한국화학융합시험연구원 연구원

- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력변환기, ESS, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 후 동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 보호협조, 신재생에너지, 마이크로그리드

조 성 덕(Sung-Duck Cho)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 전남대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

ESS, 전기설비안전, 재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석