

# ±35kV급 MVDC 실증 배전망의 보호협조기기 운용알고리즘에 관한 연구

이후동<sup>1,2</sup>, 한병길<sup>1</sup>, 김지명<sup>1</sup>, 김윤호<sup>1</sup>, 노대석<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국기술교육대학교 전기공학과, <sup>2</sup>한국전력공사 전력연구원

## A Study on Operation Algorithm of Protection Devices in ±35kV MVDC Distribution System

Hu-Dong Lee<sup>1,2</sup>, Byeong-Gill Han<sup>1</sup>, Ji-Myung Kim<sup>1</sup>, Yun-Ho Kim<sup>1</sup>, Dae-Seok Rho<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education  
<sup>2</sup>KEPCO Research Institute

**요약** 최근, 기존 AC 배전선로의 선로용량을 증대시키기 위하여 MVDC 배전망에 대한 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나, 전력변환 핵심 설비인 MVDC 배전 스테이션에 대한 구체적인 운용 기준이 마련되어 있지 않아, 보호기기 정정 등의 운영방안이 요구되고 있다. 특히, MVDC 배전 스테이션 연계 시 배전계통측 보호기기와의 협조를 고려하지 않고 운용하는 경우, 사고발생 시 고장 구간이 파급되어 동일선로의 타 고객에게 악영향을 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 ±35kV MVDC 실증 배전망 대상으로 계통측 보호기기와의 원활한 보호협조 수행을 위하여, MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기에 대한 사고유형 및 시나리오별 운용알고리즘을 제안한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 스테이션 등으로 구성된 ±35kV MVDC 실증 배전망의 모델링을 수행한다. 제안한 보호협조기기 운용알고리즘과 다양한 상정사고를 바탕으로 MVDC 실증 배전망의 보호협조 운용특성을 평가한 결과, 리클로저 정정 방식을 이용하여 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기를 운용하면, 최소 38.7cycles 이상의 협조시간차가 확보되어 보호협조 기준치인 17 cycles을 만족하므로, 본 논문에서 제안한 보호협조기기의 운용알고리즘이 MVDC 실증 배전망의 보호협조에 유용함을 확인하였다.

**Abstract** Recently, demonstration projects on an MVDC distribution network have been actively carried out to increase the capacity of an existing AC distribution system. However, since there are no specific protection guidelines for an MVDC station, which is a key facility for power conversion, operation methods of protection devices are required. In particular, if an MVDC station is operated without considering the coordination of protection devices in a distribution substation, customers in the same distribution line may be adversely affected by a fault section expanding when a fault occurs. Therefore, this paper proposes an operation algorithm for protection coordination of protection devices in an MVDC station by taking into account fault types and scenarios in order to properly operate protection devices in a ±35-kV MVDC distribution system. We also modeled a ±35-kV MVDC demonstration system by using PSCAD/EMTDC S/W. It was composed of a distribution substation, MVDC station, and protection devices. The evaluation results of operation characteristics for protection devices based on the proposed algorithm and various fault scenarios confirmed that the proposed algorithm is a useful method to operate protection devices in an MVDC station because 38.7 cycles of the coordination time interval is satisfied by securing 17 cycles as technical guide.

**Keywords** : ±35kV MVDC Distribution System, Contingency Fault Analysis, PSCAD/EMTDC, Operation Algorithm, Protection Devices, Off-DAS, Protection Coordination

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원(20213030160080, 에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 선형 융합연구사업(No. CPS22131-100)의 지원을 받아 수행되었음.

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

Received March 8, 2023

Revised March 29, 2023

Accepted May 12, 2023

Published May 31, 2023

## 1. 서론

최근, 신재생에너지전원의 급격한 도입으로 인해 발생하고 있는 계통접속 지연 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로, 기존의 AC 22.9kV 배전선로에 70kV(±35kV)급 MVDC를 적용하여 선로용량을 증대시키기 위한 실증 연구가 진행되고 있다[1,2]. 그러나, AC에서 DC로 전력을 변환하기 위한 주요설비인 MVDC 스테이션은 운용 시 계통연계가 필수적이지만, 현재 보호협조에 대한 운용기준이 마련되어 있지 않아, 보호기기 정정에 대한 운영방안이 요구되고 있다[3]. 특히, MVDC 배전망의 보호협조에 대한 연구는 주로 일반적인 방사형 계통 구조에 초점을 두어, DC 간선에 설치된 구간차단기를 통해 해당 고장구간만을 분리하거나[4], 분기선 저압측 사고가 MVDC 간선측까지 파급되지 않도록 사고전류 클램핑 장치를 사용하는 방안[5] 등이 제시되고 있다. 그러나, 변전소측 보호기기와의 협조를 고려하지 않고 MVDC 스테이션을 운용하는 경우, 사고 시 변전소측 보호기기가 먼저 동작하여, 정전구간이 확대되어 주변 수용가 또는 민간 발전사업자에게 설비 손상이나 재산적 피해를 줄 가능성이 있다[4,6].

따라서, 본 논문에서는 ±35kV MVDC 실증 배전망을 대상으로 배전계통측 보호기기와 MVDC 배전 스테이션측 보호기기 간의 안정적인 보호협조 운용을 위하여, MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기에 대한 3가지 정정 시나리오를 바탕으로 적정성을 평가하는 알고리즘을 제안한다. 여기서, 첫 번째 정정 시나리오는 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기의 세팅을 배전용변전소 계전기 정정 방식과 동일하게 적용하는 경우이며, 두 번째는 리클로저 정정 방식을 적용하고, 세 번째는 고객계전기 정정 방식을 적용한다. 제안한 방식의 검증은 위해 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 배전 스테이션, 보호기기 등으로 구성된 ±35kV MVDC 실증 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 다양한 조건의 상정사고 해석을 통해 MVDC 실증 배전망의 보호협조기기의 동작특성을 분석한 결과, 첫 번째와 세 번째 정정 시나리오에서는 배전용변전소측 보호기기가 먼저 동작하므로 불완전 보호협조가 됨을 알 수 있다. 한편, 두 번째 정정 시나리오에서는 다양한 사고 발생 조건에서도 38.7cycles 이상의 협조시간차가 확보되어 가장 적합한 방식임을 확인하여, MVDC 스테이션용 보호협조기기에 대한 적절한 운용방식임을 알 수 있었다.

## 2. ±35kV MVDC 실증 배전망 구성

최근, 국책연구 사업을 통해 MVDC 배전 스테이션을 이용하여 기존의 AC 22.9kV 선로에 DC ±35kV를 가압하여, 30MW의 전력을 전송하는 MVDC 시스템에 대한 실증 연구 프로젝트가 진행되고 있다[3]. 현재 구축된 ±35kV MVDC 실증 시스템은 Fig. 1과 같이 태양광전원, AC 배전선로, MVDC 스테이션, 실증용 MVDC 선로, 배전용변전소, 보호기기 등으로 구성되며, 배전용변전소의 변압기로부터 인출된 2개의 D/L에 MVDC 배전 스테이션의 입력단과 출력단이 각각 연결되어 있다. 또한, 태양광전원이 연계되어 있는 선로(D/L #1)의 허용용량은 15[MW]로 MVDC 스테이션의 용량인 30[MW]보다 작기 때문에, 정격운전시험을 위해 MVDC 스테이션 내부에 순환선로를 설치하여, 30[MW]의 최대 정격운전 시험이 가능하도록 구성된다. 이러한 MVDC 실증 배전망에서 MVDC 스테이션 내부에 사고가 발생할 경우, 변전소측 보호기기가 먼저 동작하게 되면 고장 구간이 파급되어 동일선로의 타 고객에게 악영향을 줄 수 있으므로, MVDC 배전 스테이션과 배전용변전소와의 보호협조에 대한 운용 방안이 요구된다. 그러나, MVDC 스테이션에 대한 구체적인 보호협조 운용기준이 마련되어 있지 않아, 본 논문에서는 세 가지 정정 시나리오를 바탕으로 MVDC 스테이션용 보호협조기기에 대한 운용 방식을 평가하고자 한다.

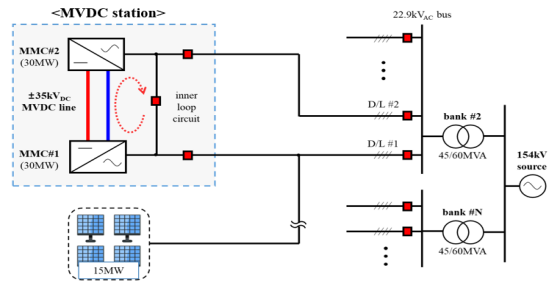


Fig. 1. Configuration of ±35kV MVDC demonstration system

## 3. MVDC 실증 배전망 보호협조기기 운용알고리즘

### 3.1 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기 정정 방식

#### 3.1.1 변전소계전기 정정 방식을 적용하는 경우(Case I)

변전소계전기의 OCR(Over Current Relay)과 OCGR (Over Current Grounding Relay)은 한전의 보호 협조 정정지침에 따라 동작시간이 결정되는데, CT 비, 순시 탭, 한시탭에 의하여 정정치가 산정된다[7]. 먼저, 변전소 계전기의 CT비는 선로용량에 대한 정격전류에 1.5배를 하여 계산할 수 있는데, 이를 나타내면 Eq. (1)과 같다.

$$CT\ ratio = \frac{P_{station}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times 1.5 \quad (1)$$

Where,  $P_{station}$  : rated capacity of MVDC station

또한, 상과 지락에 대한 순시탭은 전위 보호기기(리클로저) 설치점의 3상 단락전류의 1.5배 또는 1선 지락 전류의 1.4배 이상으로 산정되며, 이를 나타내면 Eq. (2)와 같다.

$$Instantaneous\ tap = I_F \times K \times CT\ ratio \quad (2)$$

Where,  $I_F$  : fault current(3 Phase short circuit, single line to ground fault),  $K$  : constant value of instantaneous tap by fault types(short circuit: 1.5, single line to ground: 1.4)

한편, 상과 지락에 대한 한시탭은 회선당 운전전류의 1.5배 및 0.3배를 기준으로 산정하며, 이를 나타내면 Eq. (3)과 같다.

$$Time\ delay\ tap = \frac{P_{station}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times X \times CT\ ratio \quad (3)$$

Where,  $X$  : constant value of time delay tap by fault types(short circuit: 1.5, single line to ground: 1.4)

### 3.1.2 리클로저 정정 방식을 적용하는 경우(Case II)

순시동작과 지연동작 특성을 가지는 리클로저의 단락 시 최소동작전류는 Eq. (4)와 같이 최대부하전류의 2.8 배 이상 4.0배 이하로 산정된다. 또한, 지락에 대한 최소 동작전류는 Eq. (5)와 같이 최대부하전류의 0.3배로 산정되지만, 선로의 부하 불평형 전류를 고려하여 정정치를 산정하고 있다. 한편, 리클로저의 순시와 한시곡선은 일반적으로 IEC-VI #1~#7 특성곡선을 사용한다.

$$I_{OP}(P) = 2.8 \times I_{MAX} \leq I_{OP} \leq 4 \times I_{MAX} \quad (4)$$

$$I_{OP}(G) = I_{MAX} \times 0.3 \quad (5)$$

Where,  $I_{OP}$  : minimum operation current of protection device,  $I_{MAX}$  : maximum current

### 3.1.3 고객계전기 정정 방식을 적용하는 경우(Case III)

고객계전기의 정정은 단락과 지락에 대한 순시탭 및 한시탭을 산정해야 한다. 먼저, 고객계전기의 CT비는 Eq. (6)과 같이 계약전력을 기준으로 정격전류의 1.5배로 산정할 수 있다. 또한, 단락에 대한 순시탭은 Eq. (7)과 같이 수전변압기 2차측 3상 단락전류의 1.5배로 산정할 수 있고, 지락에 대한 순시탭은 보통 최소탭(10A)을 적용한다. 한편, 단락과 지락에 대한 한시탭은 최대부하 전류의 1.5배 및 0.3배를 기준으로 정정하며, 이를 나타내면 Eq. (8)과 같다.

$$CT\ ratio = \frac{P_{station}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times 1.5 \quad (6)$$

$$Instantaneous\ tap = I_{3S} \times 1.5 \times CT\ ratio \quad (7)$$

$$Time\ delay\ tap = \frac{P_{station}}{\sqrt{3} \times 22.9kV} \times X' \times CT\ ratio \quad (8)$$

Where,  $I_{3S}$  : 3-phase short circuit current in secondary side of station transformer,  $X'$  : constant value of time delay tap in station transformer (short circuit: 1.5, single line to ground: 0.3)

## 3.2 보호협조기기 운용알고리즘

상기에서 제시한 보호협조기기 정정 방법을 바탕으로 MVDC 실증 배전망의 보호협조를 위한 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기 운용알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 배전계통에 설치 및 운용되고 있는 D/L GIS, 리클로저, 다회로차단기 등의 보호협조기기에 대하여, 회선용량, CT비, 순시 Tap, 한시 Tap, Lever, 최소동작전류, 동작특성곡선 등의 운용데이터를 입력하고, MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기에 대한 연계위치 및 정격용량 등의 운용데이터를 상정한다.

[Step 2] MVDC 실증 배전망의 사고 발생 시 보호협조기기의 동작특성을 분석하기 위하여, 계통 해석 프로그램을 이용하여 배전용변전소, 배전선로, MVDC 스테이션, 분산전원 등으로 구성된 실증 MVDC 배전망의 모델링을 수행한다.

[Step 3] 배전용변전소측 보호협조기기와 보호협조 운용특성을 평가하기 위하여, MVDC 스테이션용 보호협조기기에 대한 정정 시나리오 (Case N)를 다음과 같이 산정한다.

- Case I : 배전용변전소 보호계전기 정정 방식
- Case II : 리클로저 정정 방식
- Case III : 고객계전기 정정 방식

[Step 4] MVDC 실증 배전망에서 발생할 수 있는 다양한 사고에 대한 보호협조기기의 동작특성을 분석하기 위하여, 다음과 같이 사고 종류 ( $fault\ k$ )를 상정한다.

- fault 1 : MVDC 배전선로 P-G 사고
- fault 2 : MVDC 배전선로 P-P 사고
- fault 3 : AC 배전선로 1선 지락 사고
- fault 4 : AC 배전선로 3상 단락 사고
- fault 5 : 스테이션 내부 AC측 1선 지락 사고
- fault 6 : 스테이션 내부 AC측 3상 단락 사고
- fault 7 : 스테이션 내부 벨브측 Arm 단락 사고

[Step 5] [Step 2]의 모델링을 바탕으로 사고종류별 ( $fault\ k$ )로 배전계통측 보호협조기기( $d_{dl, p}$ )와 MVDC 스테이션용 보호협조기기( $d_{mvd, q}$ )에서 나타나는 사고전류( $I_{k, p}$ ,  $I_{k, q}$ )를 각각 분석한다.

[Step 6] 각 보호협조기기( $d_{dl, p}$ ,  $d_{mvd, q}$ )를 통과하는 사고전류( $I_{k, p}$ ,  $I_{k, q}$ )가 설정된 최소동작전류 보다 큰 경우, 해당 사고에 대하여 Eq. (9)와 같이 배전계통측 보호협조기기 동작시간( $T_p^{n, k}$ )과 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기 동작시간( $T_q^{m, k}$ )의 차를 구하여 협조시간차 ( $T_{p, q}^{n, k}$ )를 산정하고, 이 값이 기준값과 비교하여 보호협조 운용의 적정성을 평가한다.

$$T_{p, q}^{n, k} = T_p^{n, k} - T_q^{m, k} \tag{9}$$

[Step 7] [Step 5]에서 어떤 상정사고( $fault\ k$ )에서도 협조시간차가 기준값을 만족하지 않는 경우, 해당 시나리오(Case N)는 보호협조 운용이 불가능한 것으로 평가한다.

[Step 8] 다른 정정 시나리오(Case N)에 대해서도 [Step 4]~[Step 6]에 의하여 보호협조 운용 적정성을 평가하여, 협조시간차가 가장 큰 시나리오를 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기의 최적 정정방식으로 선정한다.

따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

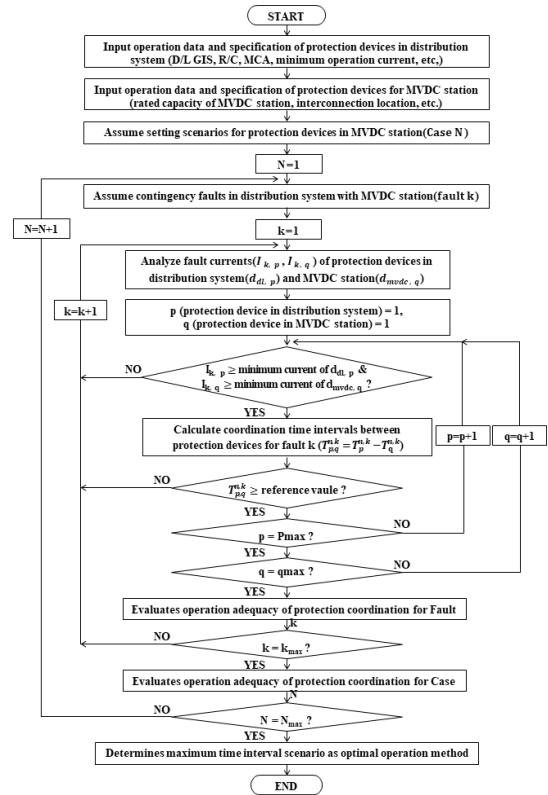


Fig. 2. Operation algorithm of protection devices in MVDC station

#### 4. PSCAD/EMTDC에 의한 ±35kV MVDC 실증 배전망 모델링

### 4.1 배전용변전소 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소의 모델링을 수행하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-Δ 결선방식이며, 3차 권선은 제 3고조파를 제거하기 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 또한, 주변압기 2차측의 중성점에 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR (neutral grounding reactor)이 설치되는 것으로 상정한다[8,9].

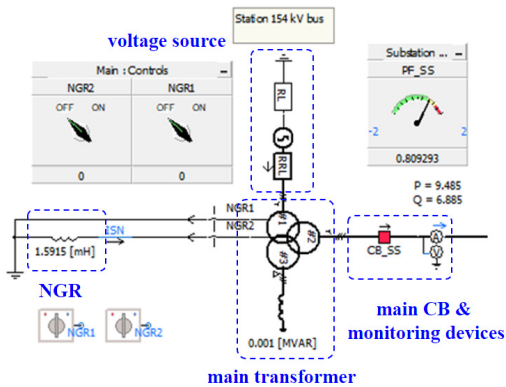
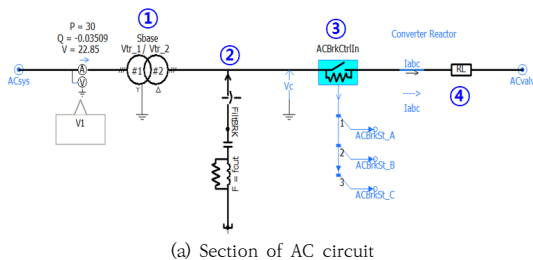


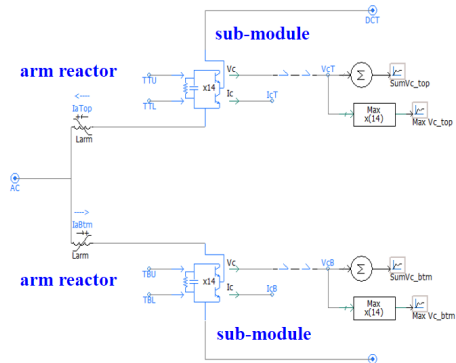
Fig. 3. Modeling of distribution substation

### 4.2 MVDC 배전 스테이션 모델링

AC 회로부와 서브모듈부로 구성된 Half-bridge SM(sub-module) 기반 MMC(modular multi-level converter)를 모델링하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다 [8]. 여기서, Fig. 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, Fig. 4(b)는 MVDC 스테이션 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 필터링 하게된다.



(a) Section of AC circuit



(b) Section of sub-module

Fig. 4. Modeling of MVDC station

### 4.3 전체 계통 모델링

상기의 ±35kV급 MVDC 실증 배전망의 구성을 바탕으로, 배전용변전소(①), AC 22.9kV 배전선로(②), MVDC 스테이션(③), ±35kV MVDC 배전선로(④) 그리고 태양광전원(⑤), 보호기기 등으로 구성된 전체 MVDC 배전계통을 나타내면 Fig. 5와 같다.

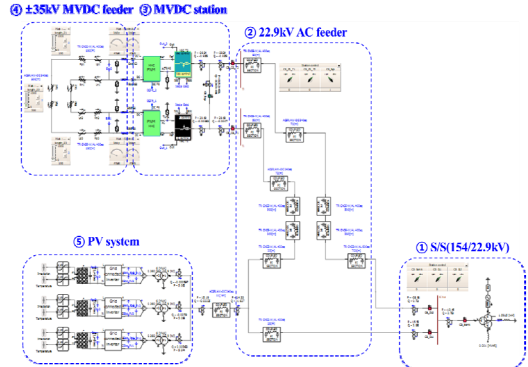


Fig. 5. Entire modeling of MVDC demonstration system

## 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 5.1 시뮬레이션 조건

±35kV MVDC 실증 배전망의 보호협조기기 운용특성을 평가하기 위한 30MW의 MVDC 스테이션 및 15MW의 D/L 회선용량, D/L GIS 및 MMC CB에 대한 상정조건은 Table 1과 같다. 또한, 사고 발생 조건으로는 Fig. 6과 같이 실증 배전망에서 사고 시 가장 큰 영향을 줄 수 있는 Pole to pole(P-P) 단락과 MVDC 배전

스테이션 내부 Arm 단락 및 내부 변압기 2차측 3상 단락 사고를 상정한다. 상기에서 제시한 다른 사고 조건에 대해서는 보호협조기기가 동작하기 위한 최소동작 요구치를 상회하지 않기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않는다.

Table 1. Simulation conditions

items		contents	
MVDC station	type	modular multi-level converter	
	rated capacity	30[MW]	
	rated current and voltage	AC input	22.9[kV], 756[A]
		DC output	±35[kV], 429[A]
	number of multi-levels	28-level	
protection devices	MMC CB #1, MMC CB #2		
distribution substation	rated capacity	45/60[MVA]	
	voltage ratio	154/22.9[kV]	
	winding connection	Y-Δ-Yg	
	capacity of distribution line	15[MW]	
	protection devices	D/L GIS #1, D/L GIS #2	

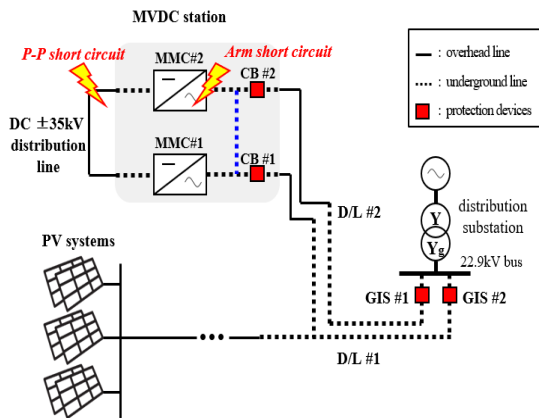


Fig. 6. Fault conditions in MVDC demonstration system

### 5.2 보호협조기기의 정정치 산정

±35kV MVDC 실증 배전망의 보호협조기기 간 운용 특성을 평가하기 위하여, 상기의 시뮬레이션 조건과 정정치 계산 식에 따라, 배전용변전소의 보호협조기기(D/L GIS #1, #2)와 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기(CB #1, #2)의 OCR 및 OCGR에 대한 정정치를 산정하면 Table 2과 같다.

Table 2. Setting values for protection devices with operation scenarios

items	CT ratio	OCR			OCGR		
		time delay tap	instantaneous tap	lever	time delay tap	instantaneous tap	lever
D/L GIS	600/5	4.7	46	3.7	0.9	30.8	4.5
Case I	1,200/5	4.7	23	2.3	0.9	15.4	4.4
Case II	1,000/5	10.6	15.1	F: 0.24 D: 0.26	1.2	-	F: 0.24 D: 0.26
Case III	1,200/5	4.7	27.8	1.4	0.9	9.5	1.7

### 5.3 PSCAD/EMTDC에 의한 사고전류 특성

MVDC 실증 배전망의 상정사고 모의조건을 바탕으로 PSCAD/EMTDC에 의한 사고특성을 나타내면 Table 3과 같다. 먼저, MVDC 배전선로측에서 P-P 사고가 발생할 경우, 배전용변전소와 MVDC 스테이션의 전압이 40.9% ~ 53.0% 까지 큰 폭으로 감소하여, 동일뱅크 타선로의 수용가에게 저전압의 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 이때, 사고가 발생된 MVDC 배전선로의 전압은 0%까지 감소하며, 사고전류는 정격의 약 35배 정도인 최대 ±14.92[kA]가 발생하여, 사고전류를 제한하는 한류기 또는 충분한 단락용량을 가지는 보호기기가 필요함을 알 수 있다. 한편, MVDC 스테이션 내부에서 3상 단락사고가 발생하는 경우, 배전용변전소측의 공급 전압이 최대 65.6%까지 감소하며, MVDC 스테이션측은 최대 80.2%의 전압강하와 정격의 약 4배인 2.95[kA]의 사고전류가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 또한, MVDC

Table 3. Fault current characteristics with fault scenarios

fault type	measurement point	voltage[kV]	fault current[kA]
pole to pole short circuit in MVDC line (A)	D/L #1	6.99	2.05
	D/L #2	7.00	1.54
	MMC #1	6.68	1.91
	MMC #2	5.41	1.54
	MVDC line	±0.69	±14.92
3-phase short circuit in converter station transformer (B)	PV system	6.96	0.44
	D/L #1	4.56	3.12
	D/L #2	4.53	1.89
	MMC #1	4.09	2.95
	MMC #2	2.61	1.88
Arm short circuit in MVDC station valves (C)	MVDC line	±34.38	±0.27
	PV system	4.48	0.46
	D/L #1	8.26	1.68
	D/L #2	8.17	1.32
	MMC #1	7.90	1.63
	MMC #2	6.84	1.31
	MVDC line	+1.04/-35.21	±0.53
	PV system	8.16	0.43

스테이션 내부에서 Arm 단락사고가 발생할 경우, 배전용변전소측의 공급전압이 최대 48.2%까지 감소되어 동일뱅크 타선로의 수용가에게 저전압의 영향을 줄 수 있으며, 배전용변전소측에서 공급되는 사고전류는 정격의 약 2.2배인 1.63[kA]가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 이때, MVDC 배전선로에서는 사고가 발생한 극의 전압이 거의 0%까지 감소하여 안정적인 전력공급이 어려움을 알 수 있다.

5.4 Off-DAS에 의한 보호협조 특성(Case I)

본 논문에서는 상기의 상정사고별 사고특성 해석결과를 바탕으로 한전의 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS를 이용하여, 해당 사고에 대한 보호협조주기 동작특성을 평가한다. Case I 정정 시나리오에 대하여, MVDC 배전선로측에서 P-P 사고가 발생하는 경우, 배전용변전소측과 MVDC 배전 스테이션용 보호협조주기 동작특성을 나타내면 Fig. 7과 Fig. 8과 같다. 여기서, Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 각각 D/L #1과 D/L #2의 차단기(CB) 동작특성이며, Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 MMC #1과 MMC #2의 차단기(CB) 동작특성을 나타낸 것이다. Fig. 7에서와 같이, D/L #1 차단기에서는 2.07[kA]의 사고전류가 발생하여, 100.3 사이클의 동작시간이 산정되고, D/L #2 차단기에서는 1.54[kA]의 사고전류에 의하여, 168.9 사이클의 동작시간이 산정됨을 알 수 있다. 한편, Fig. 8에서와 같이, MMC #1 차단기에서는 1.92[kA]의 사고전류에 의하여 315.9 사이클의 동작시간이 산정되고, MMC #2 차단기에서는 1.54[kA]의 사고전류에 의하여 670.6 사이클의 동작시간이 산정됨을 알 수 있다. 따라서, Case I의 정정 시나리오에서는 MVDC 배전선로에서 P-P 사고 시, 배전용변전소측 D/L 차단기가 MVDC 배전 스테이션용 보호협조주기 보다 빠르게 동작하여 정전구간이 확대될 가능성이 있음을 알 수 있다.

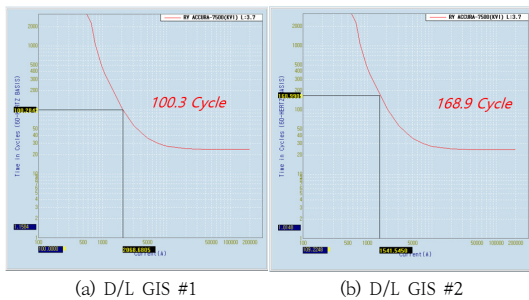


Fig. 7. Operation characteristics of protection devices in distribution substation

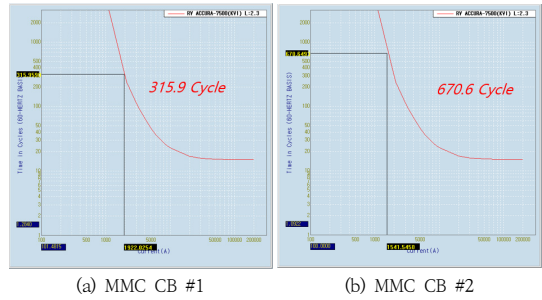


Fig. 8. Operation characteristics of protection devices in MVDC station

5.5 종합 분석

상기와 동일한 방법으로 나머지 정정 시나리오(Case II ~ III)에 대한 보호협조 운용특성을 종합하여 나타내면 Table 4와 같다. 이 표에서와 같이, Case II의 경우 순시동작(F)과 지연동작(D) 곡선을 모두 고려하여 비교분석 한 결과, 모든 상정사고에 대하여 보호협조 시간차가 38.7 cycles 이상이 확보되므로, 보호협조 기준치인 17 cycles를 만족하여, D/L GIS - MMC CB간 보호협조에 문제가 없음을 알 수 있다. 그러나, 리클로저 정정방식을 채택할 경우, OCR 최소동작전류(2.6[kA])가 높게 산정되어, MVDC 스테이션용 보호협조주기(MMC CB #1, MMC CB #2)가 사고시에도 동작하지 않을 수 있어 최소동작전류 정정에 주의해야 한다. 한편, Case III의 경우, Case I의 방법보다 MVDC 배전 스테이션용 보호협조주기가 상대적으로 빠르게 동작하지만, 여전히 배전용변전소측 보호기기(D/L GIS #1, D/L GIS #2)보다 늦게 동작하여, 불완전 보호협조가 될 수 있음을 알 수 있다. 따라서, Case II의 정정 시나리오에 의한 협조시간차가 충분히 확보되어, 사고 파급효과가 적고 안정적으로 실증 배전망을 운용할 수 있음을 알 수 있다.

Table 4. Operation characteristics of protection devices with operation scenarios

items		operation time of protection devices (cycles)			
		D/L GIS #1	D/L GIS #2	MMC CB #1	MMC CB #2
Case I	A type	100.3	168.9	315.9	670.6
	B type	56.7	116.1	115.1	329.7
	C type	143.0	228.2	532.7	1626.4
Case II	A type	100.3	168.9	F: 24.3 D: 29.1	F: 31.4 D: 37.8
	B type	56.7	116.1	F: 15.1 D: 18.0	F: 24.7 D: 29.6
	C type	143.0	228.2	F: 29.3 D: 35.2	F: 38.1 D: 46.1
Case III	A type	100.3	168.9	192.3	384.3
	B type	56.7	116.1	70.0	200.7
	C type	143.0	228.2	324.2	989.9

## 6. 결론

본 논문에서는  $\pm 35\text{kV}$  MVDC 실증 배전망을 바탕으로 보호협조 운용을 평가하기 위하여, MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기의 정정 시나리오에 대한 운용알고리즘을 제시하였다. 또한, MVDC 실증 배전망의 모델링과 다양한 상정사고 조건을 바탕으로 배전용변전소와 MVDC 배전 스테이션 간 보호협조 운용에 대한 특성을 분석하였다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 변전소계전기 정정 방식을 적용하는 경우(Case I), 배전용변전소측 보호협조기기와 MVDC 스테이션측 보호협조기기(D/L GIS #1 - MMC CB #1, D/L GIS #2 - MMC CB #2) 간 협조시간차를 분석한 결과, D/L GIS가 MVDC 스테이션용 보호협조기기 보다 먼저 동작하므로 불안전 보호협조가 됨을 확인하였다.
- (2) 리클로저 정정 방식을 적용한 경우(Case II), 모든 상정사고 조건에 대하여, 38.7 cycles 이상의 협조시간차가 확보되어, MVDC 실증 배전망의 보호협조 운용이 적정함을 확인하였다.
- (3) 고객계전기 정정 방식을 적용하는 경우(Case III), Case I의 경우와 동일하게 배전용변전소측 보호협조기기가 먼저 동작하여 불안전 보호협조가 됨을 알 수 있었다.
- (4) 따라서, 리클로저 정정방식(Case II)을 적용하여 MVDC 배전 스테이션을 운용하면, 충분한 협조시간차(17cycle 이상, OCR/OCGR-OCR/OCGR)가 확보되어 안정적으로 실증 배전망을 운용할 수 있음을 알 수 있었다.

## References

- [1] S. H. Kang, B. S. Park, "Implementation and Demonstration Plan of  $\pm 35\text{kV}$  MVDC System", KIPE MAGAZINE, vol.27, no.5, pp.44-49, 2022.  
URL: <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11149600>
- [2] H. J. Jung, "Hyosung's MVDC R&D Status", KIPE MAGAZINE, vol.27, no.5, pp.28-32, 2022.  
URL: <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11149597>
- [3] S. H. Kang, H. D. Lee, S. D. Lee, D. S. Rho, "A Study

on Fault Analysis of  $\pm 35\text{kV}$  MVDC Hybrid Distribution System Using PSCAD/EMTDC", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.70, no.8, pp.1117-1128, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.8.1117>

- [4] H. D. Lee, D. H. Tae, D. S. Rho, J. Y. Kim, "A Study on Operation Algorithm for Protection Coordination in 20kV MVDC Radial Distribution System", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.69, no.6, pp.869-880, 2020.  
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.6.869>
- [5] B. G. Han, H. D. Lee, D. H. Tae, D. S. Rho.(2021). Operation Characteristics and Implementation of Fault Current Clamping Device in Radial-type MVDC Distribution System.The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers,70(8),1146-1155.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.8.1146>
- [6] J. M. Kim, H. D. Lee, B. G. Han, D. S. Rho, "A Study on Operation Method of Protection Coordination in 5kV MV-LVDC Off-grid Micro-grid System", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol.71, no.1, pp.45-54, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.1.045>
- [7] S. H. Kwon, H. D. Lee, Y. H. Nam, D. S. Rho, "Optimal Operation Algorithm of Protection Devices in Distribution Systems With PV System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.19, no.5, pp.17-26, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.5.17>
- [8] B. G. Han, H. D. Lee, J. M. Kim, S. M. Choi, D. S. Rho, "Modeling and Fault Current Characteristics of  $\pm 35\text{kV}$  MVDC Distribution System Based on PSCAD/EMTDC", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.23, no.4, pp.1-9, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.4.1>
- [9] M. K. Kang, H. D. Lee, D. H. Tae, D. S. Rho, "A Study on Protection Coordination Algorithm for Separating Fault Section in LVDC Distribution System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.22, no.1, pp.768-776, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.768>



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

김 윤 호(Yun-Ho Kim)

[준회원]



- 2022년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 9월 ~ 현재 : 동대학원 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 보호협조, 신재생에너지, 마이크로그리드

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

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 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원

- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석

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