

±35kV MVDC 스테이션용 보호협조기기 운용알고리즘에 관한 연구

이후동***, 강성현**, 김용학**, 김지명*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

**한국전력공사 전력연구원

e-mail:lhd714@koreatech.ac.kr

A Study on Operation Algorithm of Protection Devices in ±35kV MVDC Station

Hu-Dong Lee***, Seong-Hyun Kang**, Yong-Hak Kim**, Ji-Myeong Kim*, Dae-Seok Rho*

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

**New Energy Technology Laboratory, Korea Electric Power 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 과급되어 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 적정 운용방안을 평가할 수 있는 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 운용 특성을 평가한 결과, 리클로저 정정 방식을 이용하여 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기를 운용하면, 최소 38.7cycles 이상의 협조시간차가 확보되어, 본 논문에서 제안한 보호협조기기의 운용알고리즘이 MVDC 실증 배전망의 보호협조에 유용함을 확인하였다.

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. 그러나, AC에서 DC로 전력을 변환하기 위한 주요설비인 MVDC 배전 스테이션은 운용 시 계통연계가 필수적이지만, 현재 보호협조에 대한 운용기준이 마련되어 있지 않아, 보호기기 정정에 대한 운영방안이 요구되고 있다. 특히, 배전계통측 보호기기와의 협조를 고려하지 않고 운용하는 경우, 사고 발생 시 MVDC 배전 스테이션측 보호기기 보다 배전용변전소측 보호기기가 먼저 동작하여, 정전구간이 확대되어 주변 수용가 또는 민간 발전사업자에게 설비 손상이나 재산적 피해를 줄 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 ±35kV MVDC 실증 배전망을 대상으로 배전계통측 보호기기와 MVDC 배전 스테이션측 보호기기 간의 안정적인 보호협조 운용을 위하여, MVDC 스테이션용 보호협조기기에 대한 3가지 정정 시나리오를 바탕으로 적정성을 평가하는 알고리즘을 제안한다. 제안

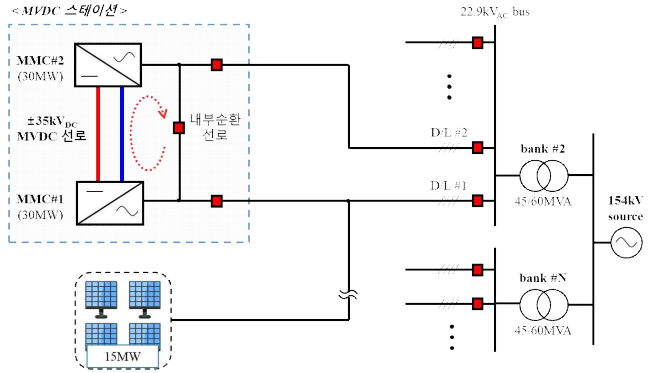
한 방식의 검증을 위해 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 배전 스테이션, 보호기기 등으로 구성된 ±35kV MVDC 실증 배전망의 모델링을 수행한다. 다양한 조건의 상정사고 해석을 통해 MVDC 실증 배전망의 보호협조기기의 동작특성을 분석한 결과, 첫 번째와 세 번째 정정 시나리오에서는 배전용변전소측 보호기기가 먼저 동작하므로 불완전 보호협조가 됨을 알 수 있다. 한편, 두 번째 정정 시나리오에서는 다양한 사고 발생 조건에서도 38.7cycles 이상의 협조시간차가 확보되어 가장 적합한 방식을 확인하여, MVDC 스테이션용 보호협조기기에 대한 적절한 운용방식임을 알 수 있었다.

2. MVDC 스테이션용 보호협조기기 운용알고리즘

2.1 ±35kV MVDC 실증 배전망의 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. 현재 구축된 ±35kV MVDC 실증 시스템은 그림 1과 같이 태양광전원, AC 배전선로, MVDC 배전 스테이션, 실증용 MVDC 선로, 배전용변전소, 보호기기 등으로 구성되며, 배전용변전소의 변압기로부터 인출된 2개의 D/L에 MVDC 배전 스테이션의 입력단과 출력단이 각각 연결되어 있다.



[그림 1] ±35kV MVDC 실증 배전망 구성

2.2 보호협조기기 운용알고리즘

상기의 MVDC 실증 배전망에서 MVDC 스테이션 내부에 사고가 발생할 경우, 변전소측 보호기기가 먼저 동작하게 되면 고장 구간이 과급되어 동일선로의 타 고객에게 악영향을 줄 수 있다. MVDC 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. 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. 이에 대한 MVDC 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, 계통해석 프로그램을 이용하여 배전용변전소, 배전선로, MVDC 스테이션, 분산전원 등으로 구성된 실증 MVDC 배전망의 모델링을 수행한다.

[Step 3] 배전용변전소측 보호협조기기와의 보호협조 운용 특성을 평가하기 위하여, MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기에 대한 정정 시나리오(Case N)를 상정한다.

- 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 특정 사고 종류(*faultk*)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(*faultk*)로 배전계통측 보호협조기기($d_{dl,p}$)와 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기($d_{mvdc,q}$)에서 나타나는 사고전류($I_{k,p}$, $I_{k,q}$)를 각각 분석한다.

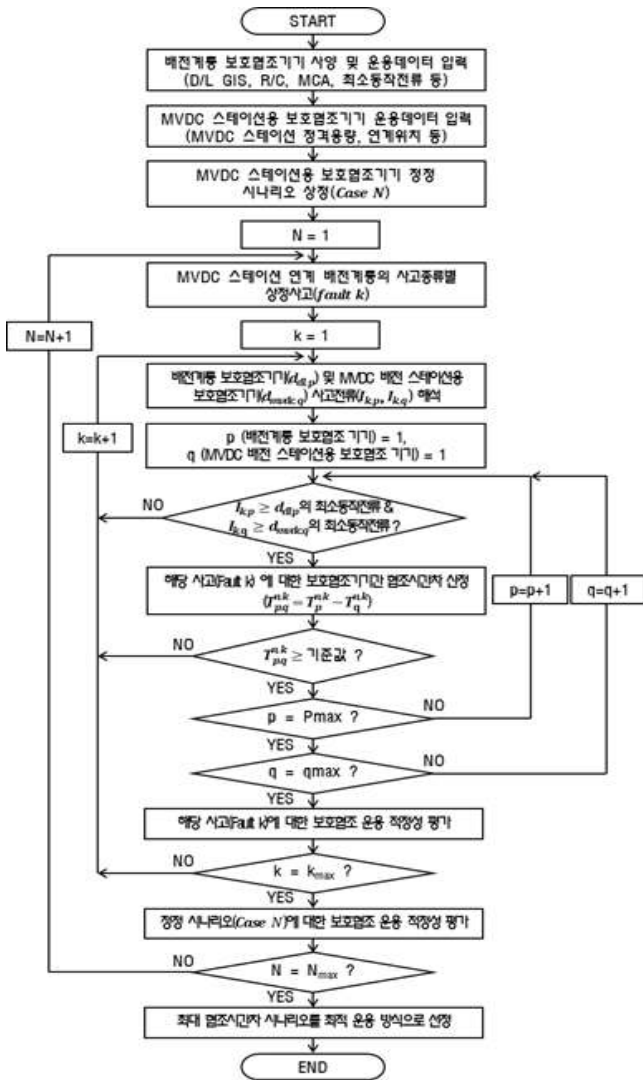
[Step 6] 각 보호협조기기($d_{dl,p}$, $d_{mvdc,q}$)를 통과하는 사고전류($I_{k,p}$, $I_{k,q}$)가 설정된 최소동작전류 보다 큰 경우, 해당 사고에 대하여 식 (1)과 같이 배전계통측 보호협조기기 동작시간($T_p^{n,k}$)과 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기 동작시간($T_q^{n,k}$)의 차를 구하여 협조시간차($T_{p,q}^{n,k}$)를 산정하고, 이 값이 기준값과 비교하여 보호협조 운용의 적정성을 평가한다.

$$T_{p,q}^{n,k} = T_p^{n,k} - T_q^{n,k} \quad (1)$$

[Step 7] [Step 5]에서 어떤 상정사고(*faultk*)에서도 협조 시간차가 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, 협조 시간차가 가장 큰 시나리오를 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기의 최적 정정방식으로 선정한다.

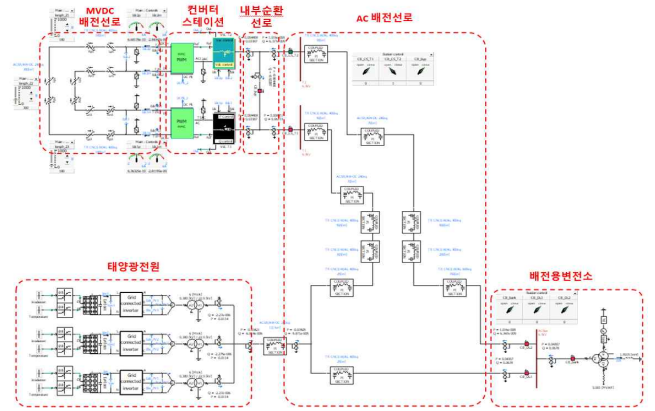
따라서, 상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2] MVDC 스테이션용 보호협조기기 운용알고리즘

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 ±35kV MVDC 실증 배전망 모델링

상기의 실증 배전망 구성을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용변전소, MVDC 스테이션, 태양광전원으로 구성된 ±35kV급 MVDC 실증 배전망을 모델링하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-D 결선방식이며, 3차 권선은 제3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 채용하고 있다. 한편, AC 배전선로는 일부구간의 가공선로를 제외하고 대부분 지중선로로 구성되며, 태양광전원에서 MVDC 스테이션으로 연결되는 구간과 스테이션에서 배전용변전소로 연결되는 구간으로 이루어져있다. 또한, MVDC 스테이션은 인터페이스 변압기, 차단기, 초충회로 등을 포함하고 있는 AC회로부와 스위칭 밸브와 커패시터가 있는 서브모듈부로 구성되며, AC 22.9kV의 전원을 ±35kV로 변환하는 역할을 수행한다.



[그림 3] ±35kV MVDC 실증 배전망의 모델링

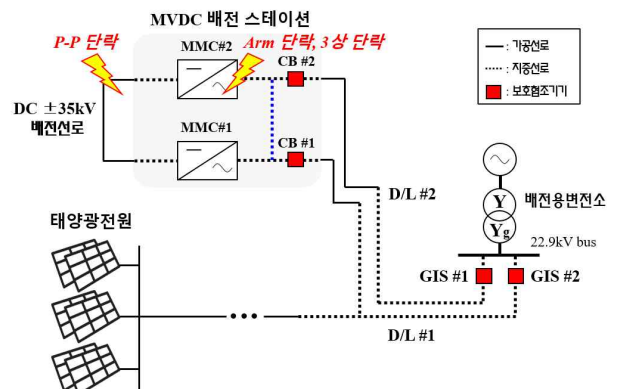
4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 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 표 1과 같다. 또한, 사고 발생 조건으로는 그림 4와 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.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목		내 용	
MVDC 배전 스테이션	종류	모듈형 멀티레벨 컨버터	
	정격용량	30[MW]	
	정격 전압 및 전류	AC 입력	22.9[kV], 756[A]
		DC 출력	±35[kV], 429[A]
	멀티레벨 수	28-level	
보호기기	MMC CB #1, MMC CB #2		
배전용 변전소	정격용량	45/60[MVA]	
	전압비	154/22.9[kV]	
	결선방식	Y-Yg-△	
	D/L 용량	15[MW]	
	보호기기	D/L GIS #1, D/L GIS #2	



[그림 4] MVDC 실증 배전망의 보호협조기기 구성 및 사고조건

4.2 PSCAD/EMTDC에 의한 사고전류 특성

MVDC 실증 배전망의 상정사고 모의조건을 바탕으로 PSCAD/EMTDC에 의한 사고특성을 나타내면 표 2와 같다. 먼저, MVDC 배전선로측에서 P-P 사고가 발생할 경우, 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, 약 4배인 2.95[kA]의 사고전류가 발생할 수 있음을 알 수 있으며, MVDC 스테이션 내부에서 Arm 단락사고가 발생한 경우의 사고전류는 정격의 약 2.2배인 1.63[kA]가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

[표 2] PSCAD/EMTDC에 의한 상정사고별 사고특성

사고종류	계측지점	사고전류[kA]
MVDC 선로 P-P 단락사고	D/L #1	2.05
	D/L #2	1.54
	MMC #1	1.91
	MMC #2	1.54
	MVDC 선로	±14.92
C/S용 변압기 2차측 3상 단락사고	D/L #1	3.12
	D/L #2	1.89
	MMC #1	2.95
	MMC #2	1.88
	MVDC 선로	±0.27
C/S 내부 Arm 단락사고	PV system	0.44
	D/L #1	1.68
	D/L #2	1.32
	MMC #1	1.63
	MMC #2	1.31
	MVDC 선로	±0.53
	PV system	0.43

4.3 정정 시나리오별 보호협조 특성

본 논문에서는 상기의 상정사고별 사고특성 해석결과를 바탕으로 한전의 보호협조 해석 프로그램인 Off-DAS를 이용하여, 정정 시나리오(Case I ~ III)에 대한 보호협조 운용특성을 종합하여 나타내면 표 3과 같다. 이 표에서와 같이, Case I의 경우 D/L GIS #1 - MMC CB #1과 D/L GIS #2 - MMC CB #2의 협조시간차를 비교한 결과, 모든 상정사고 조건에서 D/L GIS의 동작이 MVDC 스테이션용 보호협조기기보다 빨라 보호협조가 어려움을 알 수 있다. 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 보호협조기기(MMC CB #1, MMC CB #2)가 사고시에도 동작하지 않을 수 있어 최소동작전류 정정에 주의 해야한다. 한편, Case III의 경

우, Case I의 방법보다 MVDC 배전 스테이션용 보호협조기기가 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 충분하게 확보되어, 사고 파급 효과가 적고 안정적으로 실증 배전망을 운용할 수 있음을 알 수 있다.

[표 3] 정정 시나리오별 보호협조 운용특성

항 목	보호기기 동작 특성(cycles)				
	D/L GIS #1	D/L GIS #2	MMC CB #1	MMC CB #2	
Case I	P-P 단락	100.3	168.9	315.9	670.6
	C/S 내부 3상단락	56.7	116.1	115.1	329.7
	C/S Arm 단락	143.0	228.2	532.7	1626.4
Case II	P-P 단락	100.3	168.9	F: 24.3 D: 29.1	F: 31.4 D: 37.8
	C/S 내부 3상단락	56.7	116.1	F: 15.1 D: 18.0	F: 24.7 D: 29.6
	C/S Arm 단락	143.0	228.2	F: 29.3 D: 35.2	F: 38.1 D: 46.1
Case III	P-P 단락	100.3	168.9	192.3	384.3
	C/S 내부 3상단락	56.7	116.1	70.0	200.7
	C/S Arm 단락	143.0	228.	324.2	989.9

5. 결 론

본 논문에서는 ±35kV 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 스테이션 간 보호협조 운용에 대한 특성을 분석하였다. 그 결과, 첫 번째와 세 번째 정정 시나리오는 불완전 보호협조가 됨을 알 수 있으며, 두 번째 정정 시나리오에서는 다양한 사고 발생 조건에서도 38.7cycles 이상의 협조시간차가 확보되어 MVDC 스테이션용 보호협조기기에 대한 적절한 운용방식임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 이후동, 태동현, 노대석, 김주용, “20kV급 방사형 MVDC 배전계통의 보호협조 운용알고리즘에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.69, no.6, pp.869-880, 2020.
- [2] 강성현, 이후동, 이성두, 노대석, “PSCAD/EMTDC를 이용한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 사고해석에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.70, no.8, pp.1117-1128, 2021.