

±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 보호기기 운용특성에 관한 연구

김지명, 한병길, 황승욱, 태동현, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

A Study on Operation Characteristics of Protection Device for ±35kV MVDC Hybrid Distribution System

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

요약

최근, 정부의 2050 탄소중립 정책에 따라 신재생에너지전원이 배전계통에 활발하게 도입되고 있지만, 친환경 자원이 풍부한 특정 지역에 집중되고 있는 신재생에너지전원의 특성상, 배전설비의 부족으로 인해 계통접속 지연 문제가 발생하여 접속대기중인 신재생에너지전원의 용량이 급증하고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위하여 기존의 AC 배전선로를 DC화하여, 선로의 송전용량을 높이기 위한 ±35kV MVDC 하이브리드 배전망의 실증연구가 활발하게 진행되고 있으며, 실증연구에서는 AC 22.9kV의 전압을 컨버터스테이션을 통해 ±35kV으로 승압하여 운용하고, 배전용변전소 직하에 인버터스테이션을 설치하여 계통에 송전한다. 따라서, 본 논문에서는 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 안정적인 운용을 위하여, 컨버터스테이션과 인버터스테이션의 보호기기 정정치 운용방안을 제안하고, 상정사고 시나리오별 보호협조 특성을 평가한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터스테이션, 인버터스테이션, 태양광전원, 보호기기 등으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 모델링을 수행한다. 한편, 상정사고 시나리오별 보호협조 특성을 분석한 결과, 보호기기의 정정치를 적절하게 운용하면 안정적으로 MVDC 배전망을 운용할 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

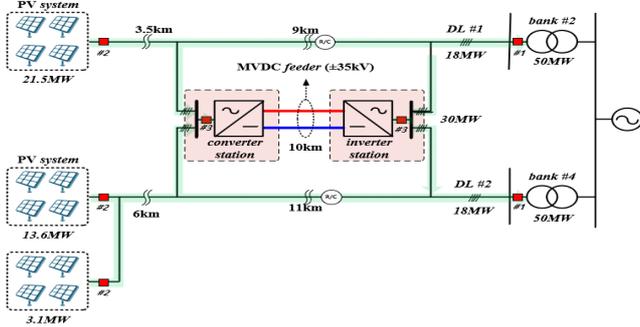
최근, 정부의 2050 탄소중립 정책에 따라 신재생에너지전원이 배전계통에 활발하게 도입되고 있지만, 친환경 자원이 풍부한 특정 지역에 집중되고 있는 신재생에너지전원의 특성상, 설비의 부족으로 인해 계통접속 지연 문제가 발생하여 접속대기중인 신재생에너지전원의 용량이 급증하고 있는 실정이다[1]. 이를 해결하기 위하여 MVDC 배전기술의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 기술은 기존의 AC 배전선로를 DC화하여, 선로의 송전용량을 높이기 위한 기술이며, 특히 기존의 AC 22.9kV 선로를 DC화하기 위해서는 ±35kV의 MVDC가 적절한 것으로 보고되고 있으며 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 즉, 신재생에너지전원의 접속대기 문제를 해결하기 위하여, 실증연구에서는 AC 22.9kV의 전압을 컨버터스테이션(C/S)을 통해 ±35kV으로 승압하여 운용하며, 배전용변전소 직하에 인버터스테이션(I/S)을 설치하여 계통에 송전한다. 따라서, 본 논문에서는 MVDC 배전기술의 실증을 위한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망을 바탕으로 컨버터스테이션과 인버터스테이션의 보호기기 정정치 산정

방안을 제시하고, MVDC 배전망의 안정적인 운용을 위한 상정사고 시나리오별 보호협조 특성을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, MVDC 배전선로, 컨버터스테이션, 인버터스테이션, 태양광전원 등으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 모델링을 제안한다. 한편, 상정사고 시나리오별 보호협조 특성을 분석한 결과, 보호기기의 정정치를 적절하게 상정하면 안정적으로 배전망을 운용할 수 있음을 알 수 있었다.

2. ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 구성

최근, 국책연구 사업으로 기존의 AC 배전선로를 DC화하여 배전선로 용량을 증대시키는 MVDC 배전기술에 관한 연구를 수행하고 있는데, 특히 컨버터스테이션을 통해 기존의 22.9kVAC 선로를 ±35kV 선로로 변환하여, 약 33MVA 용량의 신재생에너지전원을 연계하는 MVDC 배전망의 실증을 진행하고 있다. 그림 1과 같이, ±35kV급 MVDC 배전망 실

증연구를 위해 구축중인 실증용 MVDC 망은 PV 발전단지, AC 배전선로, 컨버터스테이션, DC 배전선로, 배전용변전소 등으로 구성된다. 이 그림에서와 같이, PV 발전단지에서 생산된 전력은 컨버터 스테이션에 의해 배전용 변전소로 공급되며, AC-DC-AC의 변환 단계를 거치게 된다. 그러나, 이러한 MVDC 실증 사이트에서 어느 지점에 사고가 발생할 경우, 사고전류는 PV 발전단지와 배전용 변전소로부터 양방향으로 공급될 수 있으며, 특히 ±35kV MVDC 배전선로의 경우, 양측 컨버터로부터 유입되는 사고전류는 AC 22.9kV 배전선로보다 상당히 높게 발생할 수 있어, 이에 대한 정확한 사고해석이 요구된다. 즉, MVDC용 컨버터 스테이션의 운용에 따른 MVDC 배전망과 AC 배전망의 상호 영향성의 평가와 AC 및 DC용 보호기기의 보호협조 구성에 대한 검토가 필요한 실정이다.



[그림 1] 실증용 MVDC 하이브리드 배전망의 구성도

3. 컨버터스테이션 및 인버터스테이션의 정정치 산정 방안

배전용변전소와 컨버터스테이션 간에 보호협조 동작이 잘 수행되는지를 검토하기 위하여, 본 논문에서는 컨버터스테이션의 AC측 보호기기의 설정을 배전용변전소와 동일한 방법으로 정정하는 경우(Case I)와 리클로저와 동일한 방법으로 정정하는 경우(Case II)로 구분하여 정정치 산정 방안을 제시한다.

3.1 C/S와 I/S의 AC측 보호기기를 배전용변전소와 동일하게 정정하는 경우(Case I)

1) OCR 정정치 산정

CT비 산정의 경우, 회선 당 운전전류는 실증용 배전망의 AC측 선로가 서로 다른 타 선로에서 2개의 회선이 연결되어 있음을 고려하면, 회선별 정격전류는 컨버터스테이션의 정격용량이 30MW이므로 식 (1)과 같이 산정한다. 따라서, 상기의

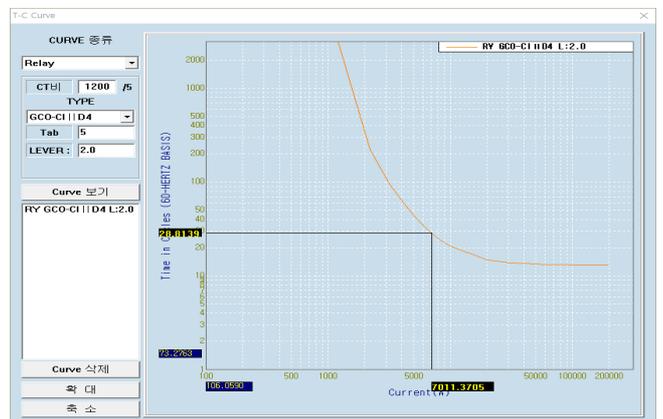
회선당 운전전류에 1.5배를 하면(756.4A x 1.5 = 1,134.6A), 약 1,134.6A정도이므로 CT비는 1200/5를 적용한다.

$$I = \frac{30,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 756.4[A] \quad (1)$$

한편, OCR 한시 탭은 계전기의 최소동작전류를 의미하는데, 정정치침에 따라 “회선당 운전전류의 150%”를 기준으로 산정한다. 따라서, 계전기의 OCR 탭은 5A로 설정되는데, 실제로 5A의 240배(CT의 배수)인 1,200A이상의 사고전류(단락사고)가 OCR 계전기에 유입되면, 한시특성에 의해 적정시간을 지연하면서 배전선로의 전위보호기기와 협조하면서 동작하게 된다. 한편, OCR의 순시 탭은 정정치침에서 “전위 보호장치(R/C) 설치 점의 3상 단락전류의 1.5배 이상”에 설정토록 되어 있다. 예를 들면, 전위 보호장치가 배전용 변전소로부터 5km 지점에 설치되어 있는 경우(CNCV 325mm²: 1.7km, ACSR 160mm²: 2km, ACSR 95mm²: 1.3km), 전위 보호장치 설치 점의 3상 단락전류는 3,664[A]로 산정되며, 이를 적용하면 순시 탭 동작전류는 식 (3)같다.

$$3,664 \times 1.5 \times \frac{5}{1,200} (1/CT비) \quad (3)$$

한편 OCR의 레버값은 계전기의 동작시간을 결정하는 요소로 계전기에서 사용하고 있는 강반한시의 곡선커브의 한 형태이며, 보통 0.5 ~ 10까지의 값을 가진다. 정정치침에서 계전기는 “배전용변전소 인출점 3상 단락전류에서 0.5초(30 사이클) 이하로 동작”하게 되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 변전소 인출점 3상 단락전류(D/L 최대고장전류)인 7,053A를 계전기의 특성곡선 X좌표 값에 대입하며, OCR의 한시 레버는 Fig. 2와 같이, 레버가 2.0인 경우에 28.8사이클이므로 2.0으로 산정한다.



[그림 2] 컨버터스테이션의 AC측 보호기기를 계전기(OCR)

2) OCGR 정정치 산정

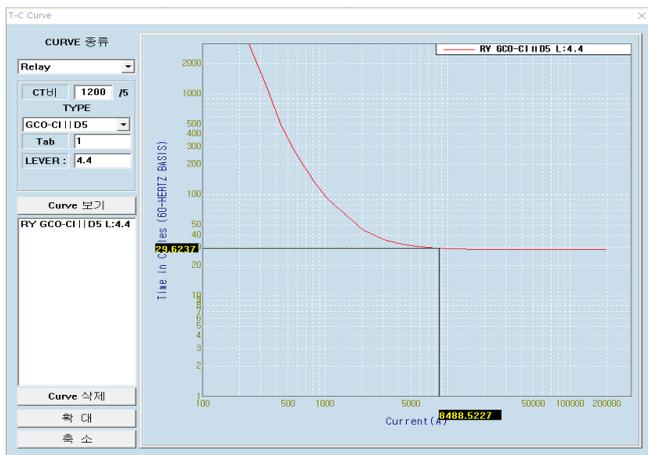
OCGR 한시 탭은 정정치침에 따라 “회선 당 운전전류의 30%”이므로 식 (4)와 같이, 1A로 산정한다.

$$\frac{30,000}{\sqrt{3} \times 22.9} \times 0.3 \times \frac{5}{1,200} (1/CT비) \quad (4)$$

또한, OCGR의 순시 TAP은 정정치침에서 “전위보호 장치(R/C) 설치 점의 최대 1선 지락전류(지락저항 0옴)의 1.4 배 이상”에 설정토록 되어 있다. 예를 들면, 전위 보호장치가 배전용 변전소로부터 5km 지점에 설치되어 있는 경우 (CNCV 325mm²: 1.7km, ACSR 160mm²: 2km, ACSR 95mm²: 1.3km), 전위 보호장치 설치 점의 1선 지락전류를 계산하면 2,841[A]가 산정되며, 이를 적용하면 순시 탭 동작전류는 식 (5)와 같이 20(A)로 구할 수 있다.

$$2,841 \times 1.4 \times \frac{5}{1,200} (1/CT비) \quad (5)$$

한편, OCGR의 한시 레버는 정정치침에 따르면, 계전기가 “배전용변전소 인출점 최대 1선 지락전류에서 0.5초(30사이클) 이하로 동작”하게 되어 있다. 따라서, 변전소 인출점 최대 1선 지락전류인 8,516A를 계전기의 특성곡선 X좌표 값에 대입하면, OCGR의 레버는 Fig. 3과 같이, 레버가 4.4인 경우에 29.6사이클이므로 한시 레버는 4.4로 산정된다.



[그림 3] 컨버터스테이션의 AC측 보호기기용 계전기(OCGR)

3.2 C/S와 I/S의 AC측 보호기기를 리클로저와 동일한 방법으로 정정하는 경우(Case II)

Recloser의 OCR 최소동작전류($I_{min,R/C}$)는 정정치침에 따라 식 (6)과 같이 “최대 부하전류($I_{L,max}$)의 2.8배 이상, 4.0배 이하”로 정의된다. 여기서, 컨버터스테이션의 용량이 30MW

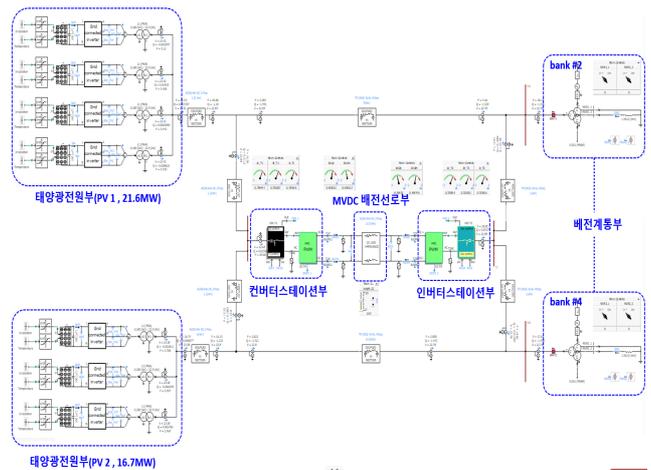
인 것을 고려하면, 최대부하전류는 756A이므로, Recloser의 OCR 최소동작전류($I_{min,R/C}$)는 2,570[A]로 산정된다. 또한, OCR의 순시와 한시곡선은 현장에서 일반적으로 사용하고 있는 N2와 N4 곡선을 적용하도록 한다.

$$2.8 \times I_{L,max} \leq I_{min,R/C} \leq 4 \times I_{L,max} \quad (6)$$

Recloser의 OCGR 최소 동작전류는 정정치침에 따라 “최대부하전류의 0.3배 이상”이므로, 230A로 산정되며, OCGR의 순시와 한시곡선은 현장에서 일반적으로 사용하고 있는 N2와 N4를 사용하는 것으로 상정한다.

4. PSCAD/EMTDC에 의한 MVDC 하이브리드 배전망의 모델링

태양광전원부, 컨버터스테이션부, 인버터스테이션부, MVDC 배전선로부, 배전계통부, 보호기기등으로 구성된 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 전체시스템은 그림 3과 같다. 여기서, 태양광전원부는 PV 1에 21.6MW, PV 2에 16.7MW이며, 컨버터스테이션부는 MVDC로 변환된 전력을 MVDC 배전선로부를 통해 인버터스테이션부로 공급한다. 또한, 배전계통부는 3권선 Yg-Yg-Δ 결선방식의 주변압기와 0.6Ω의 NGR로 구성된다.



[그림 4] ±35kV급 하이브리드 배전망의 전체 시스템 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 연구에서 제시한 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 상정사고별 최적 보호협조 운용방안을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다. 여기서, 태양광전원측에 연계된 컨버터 스테이션은 태양광전원의 AC 22.9kV를 입력받아

DC ±35kV로 변환하여, MVDC 선로로 공급하고, 계통공급용 인버터는 MVDC 선로로부터 공급받은 DC ±35kV를 AC 22.9kV로 변환하여 DL #1을 통하여 배전용 변전소로 공급한다. 전체 선로 길이는 15km이며, 리클로저는 10km 지점에 설치하는 것으로 상정한다. 한편, MVDC 하이브리드 배전망의 사고 시나리오는 표 2와 같이, ±35kV MVDC 배전선로에서 P-P 사고가 발생하는 경우, 컨버터스테이션 내부에서 Arm 단락 및 MMC용 변압기 2차측에 3상 단락사고가 발생하는 경우로 상정한다.

[표 1] 상정사고 조건

사고지점	사고종류
MVDC 선로사고	Pole(+) - Pole(-) 사고
컨버터스테이션	Arm 단락
내부사고	MMC용 변압기 2차측 3상 단락사고

5.2 MVDC 선로 사고시, 보호협조 특성

상기의 시나리오별 사고특성 결과와 컨버터스테이션의 AC측 보호기기의 정정조건(Case I, Case II)을 바탕으로 배전용 변전소와 컨버터스테이션 간의 보호협조 운용특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 컨버터스테이션의 AC측 보호기기의 정정조건(Case I, Case II)은 컨버터스테이션측 보호기기의 설정을 배전용변전소와 동일한 방법으로 정정하는 경우(Case I)와 리클로저와 동일한 방법으로 정정하는 경우(Case II)로 구분된다. 먼저, Case I에서의 경우, 컨버터스테이션 내부 3상 단락사고와 Arm 단락사고에 대하여 배전용변전소측 보호기기보다 컨버터스테이션측 보호기기가 늦게 동작하여 보호협조가 어려움을 알 수 있다. 또한, Case II의 경우 보호기기의 순시동작(N2 곡선)만을 고려하면, 컨버터스테이션 내부 3상 단락사고 시 MMC #1의 보호기기가 최소동작전류 미만의 사고전류가 흘러 동작하지 않는 부분을 제외하고서는 모든 사고에 대하여 보호협조가 가능함을 알 수 있다. 그러나, 재폐로기능(한시동작, N4 곡선)을 고려할 경우, 배전용변전소의 보호기기가 먼저 동작하여 컨버터스테이션의 보호협조가 어려움을 알 수 있다. 따라서, 컨버터스테이션의 중앙제어장치에서 MMC #1과 MMC #2의 보호기기의 동작을 연동시킨다면, 리클로저와 동일한 방법으로 설정(Case II)하면 컨버터스테이션과 배전용변전소의 안정적인 보호협조 운용이 가능함을 알 수 있다.

[표 2] 사고지점별 보호기기 운용 특성

항목	변전소 #2	변전소 #4	MMC #1	MMC #2	
Case I	P-P 사고	261.2 cycle	261.2 cycle	80.2 cycle	100.7 cycle
	C/S 내부 3상	50.4 cycle	50.4 cycle	226.2 cycle	25.9 cycle

	단락				
	Arm 단락	75.5 cycle	75.5 cycle	103.7 cycle	120.8 cycle
Case II	P-P 사고	261.2 cycle	261.2 cycle	N2: 33.8 cycle N4: 530 cycle	N2: 39.0 cycle N4: 711.2 cycle
	C/S 내부 3상 단락	50.4 cycle	50.4 cycle	동작 X (최소동작 전류 미만)	N2: 15.2 cycle N4: 89.3 cycle
	Arm 단락	75.5 cycle	75.5 cycle	N2: 39.7 cycle N4: 738.5 cycle	N2: 43.6 cycle N4: 894.2 cycle

6. 결 론

본 논문에서는 배전계통의 수용성을 증대시키기 위하여 연구중인 ±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 안정적인 운용을 위하여, 컨버터스테이션과 인버터스테이션에 대한 AC측 보호기기 정정방안을 제시하고 상정사고 조건별 보호기기 운용 특성을 평가한다. 여기서, AC측 보호기기를 배전용변전소와 동일한 방법(Case I)으로 정정하는 경우, 컨버터스테이션 내부 3상 단락사고와 Arm 단락사고에 대하여 배전용변전소측 보호기기보다 컨버터스테이션측 보호기기가 늦게 동작하여 보호협조가 어려움을 알 수 있다. 한편, AC측 보호기기를 리클로저와 동일한 방법(Case II)으로 정정하는 경우, 보호기기의 순시동작(N2 곡선)만을 고려하면, 컨버터스테이션 내부 3상 단락사고 시 MMC #1의 보호기기가 최소동작전류 미만의 사고전류가 흘러 동작하지 않는 부분을 제외하고서는 모든 사고에 대하여 보호협조가 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20191210301940)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Hu-Dong Lee, Ki-Young Kim, Mi-Sung Kim, Dae-Seok 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.