

# 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 특성 및 보호협조 운용방안

김지명\*, 김경화\*, 최성문\*, 정민철\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

## Fault Characteristics And Operation Method of Protection Coordination for 5kV Scale MV-LVDC Off-grid MG System

Ji-Myung Kim\*, Kyung-Hwa Kim\*, Seong-Moon Choi\*, Min-Chul Jung\*, Dea-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

### 요약

최근, 전 세계적으로 신재생에너지전원의 도입, DC 부하의 증가, 소비자의 고품질·고신뢰성 전력공급 요구로 인하여, MVDC 배전계통에 대한 필요성이 증가하고 있지만, MVDC용 기기들의 상용화는 아직 초기단계에 머물러 있는 실정이다. 이에 따라, 기존에 사용되고 있는 AC용 기기 및 선로를 이용하여 MVDC 배전망에 적용하기 위한 실증 연구가 진행되고 있지만, 기존의 AC용 기기들을 사용할 경우, 컨버터 및 선로와 같은 고가의 설비들은 사고 발생 시 안정적으로 보호되지 못할 가능성이 있으므로, MVDC 배전망의 안정적인 운용을 위한 보호협조 운용방안이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 마이크로그리드의 안정적인 운용을 위해, LVDC 선로에서 사고가 발생하는 경우에 대하여 보호기기의 운용방안을 제안하고, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 태양광전원, ESS, MVDC 선로, DC/DC 컨버터, DC/AC 인버터, 보호기기 등으로 구성된 MV-LVDC 마이크로그리드의 전체 시스템의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 다양한 사고지점별 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안한 보호기기의 운용방안에 따라 적절한 보호협조가 수행됨을 알 수 있어 본 논문의 유효성을 확인하였다.

## 1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지전원의 도입, DC 부하의 증가 그리고 소비자의 고품질·고신뢰성 전력 요구로 인하여, MVDC 배전에 대한 관심이 급증하고 있지만[1-3], 아직 연구 초기단계에 머물러 있는 실정이다. 특히, 배전선로, 차단기, 컨택터 등과 같은 MVDC용 기기들은 개발단계에 있어 상용화된 제품이 적으며, MVDC 배전망을 구축하는데 많은 어려움이 발생하고 있다. 이에 따라, 기존의 개발되어 사용되고 있는 기기 및 선로를 MVDC 배전망에 적용하기 위한 실증 연구가 진행되고 있다. 그러나, 기존 기기들을 사용할 경우, 컨버터 및 선로와 같은 고가의 설비들은 DC 선로측에서 사고 발생 시 안정적으로 보호되지 못할 수 있으므로, MVDC 배전망의 안정적인 운용을 위한 사고특성의 해석 및 보호협조 운용방안이 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 마이크로그리드의 사고지점별 전류의 특성을 해석하고 보호협조 운용방안을 제안하기 위해 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 태양광전원, ESS, MVDC 선

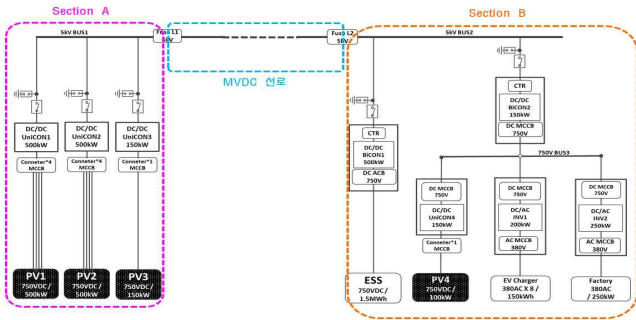
로, DC/DC 컨버터, DC/AC 인버터 및 보호기기들로 이루어진 사고지점별 사고해석 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 사고지점별 사고전류는 전원의 특성 및 사고지점까지의 선로 공장, 각종 전력변환기기에 따라 특성 및 크기가 다르므로 각 특성에 맞는 보호협조의 설계가 필요함을 알 수 있어 본 논문의 유효성을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 마이크로그리드용 보호협조 기기의 구성 및 보호협조 운용방안이 적절함을 알 수 있었다.

## 2. 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 보호협조 운용방안

### 2.1 5kV급 MV-LVDC 독립형 MG의 구성

5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드는 그림 1과 같이 section A, MVDC 선로 및 section B로 구성된다. 여기서, section A는 주 발전원부로, 태양광전원은 750[V]의 LVDC 선로에 연계되며, 컨버터를 통해 5[kV]의 MVDC로 승압하여 ESS 및 부하로 전력을 공급한다. 또한, section B는 태양광전

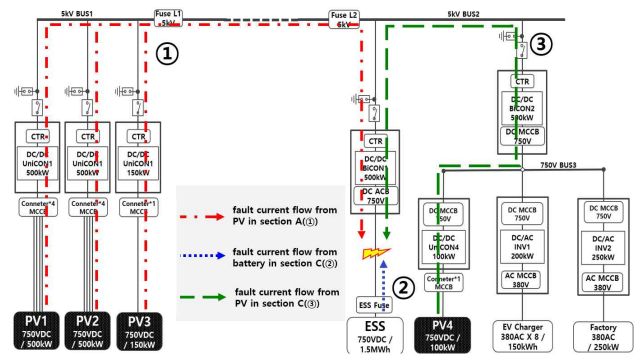
원, ESS, 수용가(EV 충전기, 공장 등) 및 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터를 구성되며, ESS는 양방향 컨버터를 사용하여 5[kV]/750[V]로 전압을 승압 및 강압하여 전력을 저장하거나 공급해주며, 수용가는 공급받은 전력을 인버터를 통해 380[V]의 AC로 변환하여 사용한다. 한편, section A와 section B는 2.4[Km] 공장의 MVDC 선로를 통해 연결되며, 각 구역의 수전부와 지중선로의 연계를 위한 선로의 길이는 각각 800[m], 1.4[Km]으로 상정한다.



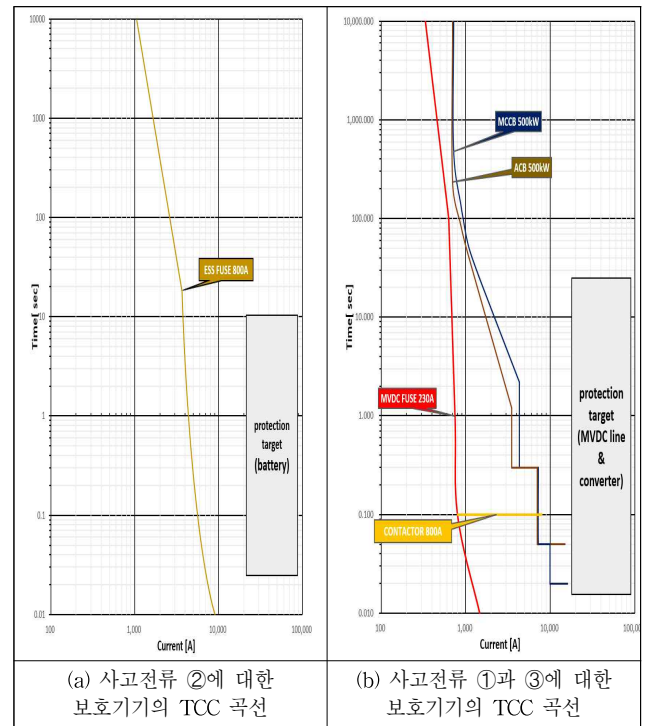
[그림 1] 5[kV]급 MVDC 독립형 마이크로그리드의 구성

### 2.2 MG용 보호협조 운용방안

배터리와 컨버터 사이의 LVDC 선로에서 사고가 발생할 경우, 사고전류의 흐름을 나타내면 그림 2와 같다. 여기서, 사고발생 지점으로 흐르는 전류는 section A의 태양광전원에서 유입되는 사고전류 ①과, section C의 ESS에서 유입되는 사고전류 ②, section C의 태양광전원에서 유입되는 사고전류 ③으로 구성된다. 이때, LVDC 선로에서 발생하는 사고전류의 특성은 사고전류를 공급하는 배터리에 근접한 선로에서 발생한 배터리 외부단락으로 인하여 높은 사고전류가 공급될 수 있다. 따라서, 배터리를 보호하기 위하여 설치된 ESS fuse는 사고전류 ②를 차단하기 위한 용량으로 선정되어야 한다. 또한, 태양광전원으로부터 사고구간을 분리하기 위하여 DC ACB는 사고전류 ①과 사고전류 ③을 고려하여 선정되어야 한다. 따라서, LVDC 선로에서 사고가 발생한 경우에 대한 보호기기의 TCC 특성곡선은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류 ②에 대한 보호는 ESS fuse(800A)가 담당하며, 사고전류 ①과 사고전류 ③에 대한 보호는 가장 먼저 DC ACB(500kW)가 동작하고, CTR(800A), MVDC fuse(230A) 및 MCCB(500kW)가 순서대로 동작하는 것을 나타낸다.



[그림 2] LVDC 선로에서 사고가 발생할 경우, 사고전류 방향



[그림 3] LVDC 사고지점에 대한 보호협조 TCC 특성곡선

## 3. PSCAD/EMTDC에 의한 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 모델링

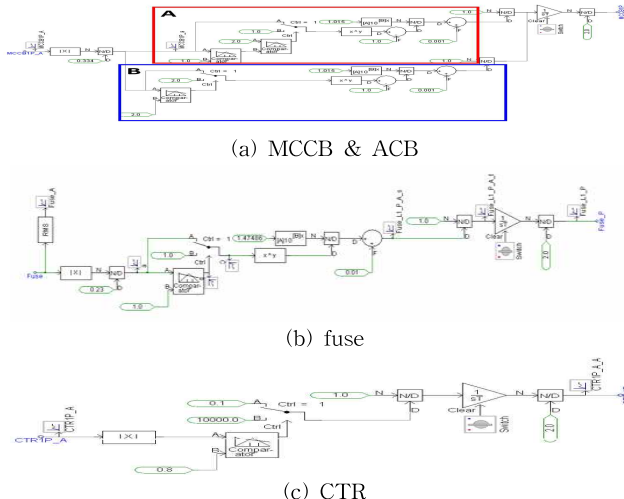
### 3.1 보호기기 모델링

상기의 실증 사이트에서 사용되고 있는 MG용 보호기기(MCCB, ACB, fuse, CTR)를 모델링하면 그림 4와 같다. 여기서, 각 보호기기는 제조사에서 제공하는 정정치를 바탕으로 IEEE std C37.112-2018의 반한시 특성곡선인 식 (1)을 이용하여 모델링을 수행한다[11]. 먼저, 그림 4(a)는 MCCB 및 ACB를 나타내며, 보호기기 특성을 적용하여 장한시 특성의 A부분과 단한시 및 순시특성의 B부분으로 나눠서 구성한다. 또한, 그림 4(b)는 fuse를 나타내며, 반한시 특성곡선을 사용하여 TCC 특성곡선과 유사하게 모델링을 수행한다. 한편, 그림 4(c)는 CTR을 나타내며 일정시간동안 기준값 이상의 사

고전류가 유입될 경우 동작을 수행하도록 모델링한다.

$$t(I) = \left( \frac{A}{M^p - 1} + B \right) \quad (1)$$

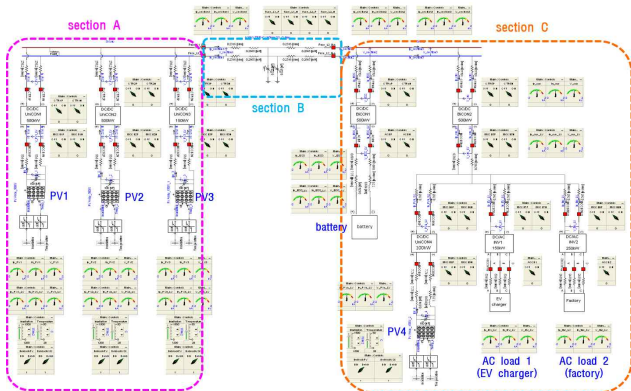
where,  $M$ : the current expressed in multiples of pickup current,  $A, B, p$ : constants chosen to provide the selected curve characteristics



[그림 4] 보호기기 모델링

### 3.2 전체 시스템 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 section A, section B, section C로 구성된 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 전체 시스템을 나타내면 그림 14와 같다. 여기서, section A는 태양광모듈, 태양광전원용 DC/DC 컨버터, CTR, MCCB, 등으로 구성되며, section C는 배터리, 배터리용 양방향 DC/DC 컨버터, 부하공급용 DC/DC 컨버터, 수용가용 DC/AC 인버터, 태양광모듈, 태양광전원용 DC/DC 컨버터, 수용가 부하, ACB, MCCB 등으로 구성된다. 또한, section B는 2.4km 공장의 MVDC 선로와 fuse로 구성되며, section A와 section C를 연결한다.

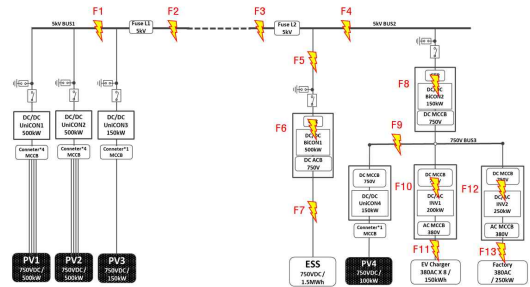


[그림 5] 전체시스템 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

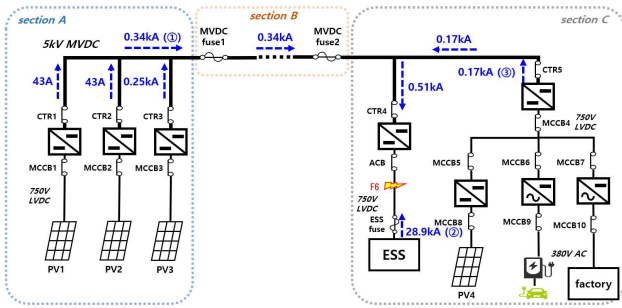
상기의 모델링을 바탕으로 MVDC 독립형 마이크로그리드의 사고해석을 위한 시뮬레이션 조건은 그림 6과 같다. 여기서, 사고 지점은 그림 6과 같이, F1 ~ F13으로 구성되며, 사고 지점 F1 ~ F5는 MVDC 선로에서 사고가 발생한 경우이며, F6, F7은 ESS에서 근접하게 사고가 발생한 경우이다. 또한, F7~F13은 LVDC 선로 및 컨버터에서 사고가 발생한 경우이며, 사고시, 단락저항은 1[mΩ]으로 상정한다.



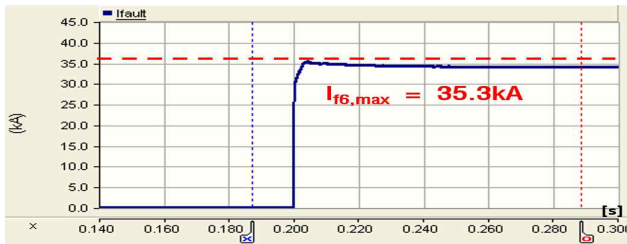
[그림 6] 5kV급 MVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 지점

### 4.2 LVDC측 사고에 대한 보호협조 운용특성

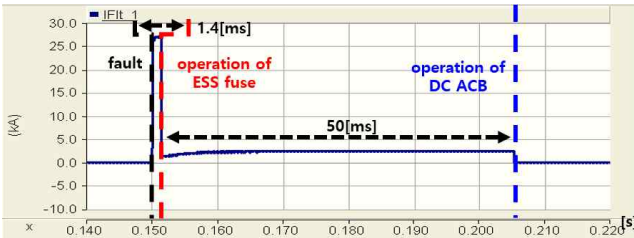
4.1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 section C의 배터리측의 LVDC 선로지점(F6)에서 단락사고가 발생한 경우에 대하여, 사고전류 및 보호기기의 동작특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7(a)는 사고지점(F6)으로 흐르는 전체 사고전류의 크기 및 방향을 나타내며, 사고전류 ①은 section A의 태양광전원에서 공급하는 0.34kA, 사고전류 ③은 section C의 태양광전원에서 공급하는 0.17kA가 각각 사고지점(F6)으로 유입됨을 알 수 있다. 또한, 사고전류 ②는 배터리의 외부단락으로 인하여 28.9kA의 높은 사고전류가 사고지점(F6)으로 공급됨을 알 수 있다. 한편, 그림 7(b)는 사고지점(F6)으로 흐르는 전체 사고전류의 파형을 나타내며, 배터리측 외부단락으로 인해 발생하는 전류를 포함하여 최대 35.3kA의 사고전류가 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 7(c)는 보호기기 동작에 의한 사고전류 특성을 나타내는데, ESS fuse는 사고 발생 후 약 1.4[ms]에 동작하고, 컨버터 내부의 DC ACB는 50[ms]에 동작함을 알 수 있다. 따라서, ESS fuse가 가장 먼저 동작하여 배터리를 보호하고 사고구간을 분리할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 사고전류의 크기 및 방향



(b) F6 지점의 사고전류



(c) 보호기기 동작에 의한 사고전류 특성

[그림 7] F6에서 사고 발생시 사고전류 및 보호기기의 동작특성

한편, 동일한 방식으로 상정사고 조건별로 PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션 결과를 비교·분석하여 나타내면 표 1과 같다. 여기서, MVDC선로에서 사고가 발생하는 경우 중, section A에 가까운 F1과 F2는 사고전류의 절반 이상이 section A의 태양광전원으로부터 공급되며, section B에 가까운 F3과 F4 및 F5는 MVDC 선로로 인하여 section A의 태양광전원으로부터 유입되는 사고전류가 감소하는 특성을 보인다. 또한, ESS측에서 사고가 발생하는 경우인 F6과 F7중에 DC/DC 컨버터 내부의 사고가 발생하는 경우인 F6의 경우 사고전류가 제한되는 특성을 보이지만 DC/DC 컨버터와 ESS 사이의 사고가 발생하는 F7의 경우, 매우 높은 사고전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 수용가 부하측에서 사고가 발생한 경우인 F8부터 F13의 경우, MVDC에 직접적으로 연계되는 DC/DC 컨버터가 있는 F8은 ESS로부터 높은 사고전류가 유입되어 큰 값의 사고전류가 흐르지만, 나머지 경우에는 사고전류가 유입될 수 있는 전원으로부터 거리에 따른 선로 임피던스와 전력변환기들로 인해 적은 사고전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 상기에서 제안한 보호협조 운용방안을 바탕으로 보호기기들이 동작하여 사고구간이 분리됨을 알 수 있다.

[표 1] 사고 지점별 사고전류 및 보호기기 동작특성

사고 지점	사고전류의 크기 [kA]				동작한 보호기기	
	section A	section B		총 사고전류		최대 사고전류
		ESS	부하			
F1	1.91	0.83	0.06	2.8	3.54	MVDC fuses, CTR
F2	1.91	0.83	0.06	2.8	3.54	MVDC fuses
F3	0.65	0.83	0.06	1.54	1.54	MVDC fuses
F4	0.65	0.83	0.25	1.73	1.73	MVDC fuses, CTR
F5	0.65	0.83	0.25	1.73	3.06	ACB, CTR
F6	0.46	0.83	0.25	1.54	2.85	MVDC fuse, ACB
F7	0.13	37.9	0.25	38.46	43.9	ESS fuse, ACB
F8	0.31	0.83	0.25	1.39	2.86	CTR, MCCB
F9	0.003	0.037	0.25	0.29	0.5	MCCB
F10	0.003	0.037	0.25	0.29	0.5	MCCB
F11	0.003	0.037	0.25	0.29	0.76	MCCB
F12	0.003	0.037	0.25	0.29	0.5	AC MCCB
F13	0.003	0.037	0.25	0.29	0.76	AC MCCB

## 5. 결론

본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드에서 사고지점별 사고전류 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 사고지점이 다양해질수록 선로 공장, 종류 및 각종 전력변환기와 사고전류 공급원의 특성에 따라 사고전류의 특성 및 크기가 다양해지며, 보호기기의 동작특성을 분석한 결과, MVDC/LVDC 마이크로그리드 계통에 적절한 보호기기가 선정되어, 모든 사고지점에 대해 보호협조가 정상적으로 이루어짐을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090)와 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] G. Bathurst, G. Hwang and L. Tejwani, "MVDC - The New Technology for Distribution Networks," 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, pp. 1-5, 2015.
- [2] R. Zuelli et al., "The impact of MVDC links on distribution networks," 2018 AEIT International Annual Conference, Bari, pp. 1-5, 2018.
- [3] Zhao Ma, Wanxing Sheng, Rui Li, Ming Wu, Rik De Doncker, Peter Lürkens, Minxiao Han, Jiuping Pan, "Study on the Feasibility of MVDC", 2018 CIGRE Session C6-315, 2018.