

# 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 사고전류 특성에 관한 연구

김지명\*, 이후동\*, 김순식\*, 황승욱\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

## A Study on Characteristics of Fault Current for 5kV Scale MV-LVDC Off-grid MG System

Ji-Myung Kim\*, Hu-Dong Lee\*, Soon-Sik Kim\*, Seung-Wook Hwang\* and Dea-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

### 요약

최근, 전 세계적으로 신재생에너지전원의 도입, DC 부하의 증가 그리고 소비자의 고품질·고신뢰성 전력 요구로 인하여, MVDC 배전에 대한 필요성이 급증하고 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 있다. 그러나, 기존의 AC용 기기들을 사용할 경우, 컨버터 및 선로와 같은 고가의 설비들은 사고 발생 시 안정적으로 보호되지 못할 가능성이 있으므로, MVDC 배전망의 안정적인 운용을 위한 사고특성의 해석이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 마이크로그리드의 사고지점별 전류의 특성을 해석하기 위해 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 태양광전원, ESS, MVDC 선로, DC/DC 컨버터, DC/AC 인버터 및 보호기기, 등으로 구성된 MVDC 계통의 사고해석 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 사고전류는 사고 위치, 전원의 종류 및 각종 전력변환기기에 영향을 받아 각 특성에 맞는 보호협조의 설계가 필요함을 알 수 있었다.

### 1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지전원의 도입, DC 부하의 증가 그리고 소비자의 고품질·고신뢰성 전력 요구로 인하여, MVDC 배전에 대한 관심이 급증하고 있지만[1,2], 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 해석이 요구되고 있다.

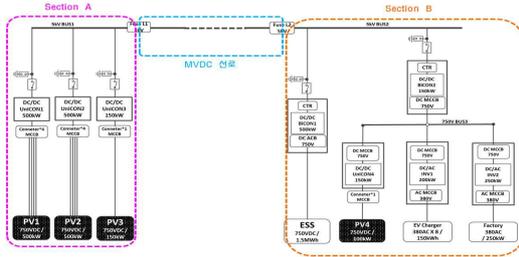
따라서 본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 마이크로그리드의 사고지점별 전류의 특성을 해석하기 위해 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 태양광전원, ESS, MVDC 선로, DC/DC 컨버터, DC/AC 인버터 및 보호기기들로 이루어진 사고지점별 사고해석 모델링을 수행한다.

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 유용성을 확인하였다.

### 2. 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 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 태양광전원, ESS, 수용가(EV 충전기, 공장 등) 및 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터로 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.



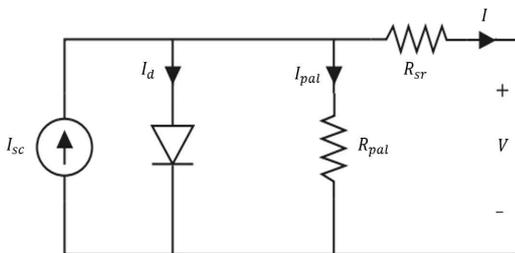
[그림 1] 5[kV]급 MVDC 독립형 마이크로그리드의 구성

한편, 독립형 마이크로그리드에서 사고가 발생할 경우, 태양광전원의 사고전류는 태양광 모듈의 출력 한계 및 DC/DC 컨버터의 IGBT 특성으로 인하여 정격의 1.25배로 제한된다. 또한, ESS측 DC/DC 컨버터 이전에 사고가 발생할 경우, 사고전류는 ESS의 내부 저항과 선로 임피던스에 의해 결정되지만 컨버터 이후에 사고가 발생할 경우, IGBT 특성으로 인하여 정격의 1.25배로 제한된다. 그러나, 태양광 모듈 및 IGBT 특성에 의하여 사고전류가 제한되어도, 사고지점별로 각 전원에서 공급되는 전류의 크기는 사고지점으로부터 거리에 따라 크게 좌우되므로 사고지점별 분석이 수행되어야 한다.

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

#### 3.1 태양광전원 모델링

태양광전원은 그림 2와 같이 전류원, 다이오드, 병렬 저항 및 직렬 저항으로 구성된 등가회로로 구성된다[3]. 여기서,  $I_{sc}$ 는 태양광전원의 단락전류,  $I_d$ 는 다이오드로 흐르는 전류,  $R_{pal}$ 는 병렬 저항,  $R_{sr}$ 은 직렬 저항,  $I$ 는 태양광전원의 출력 전류,  $V$ 는 태양광전원의 출력 전압을 나타낸다.



[그림 2] 태양광전원 등가회로

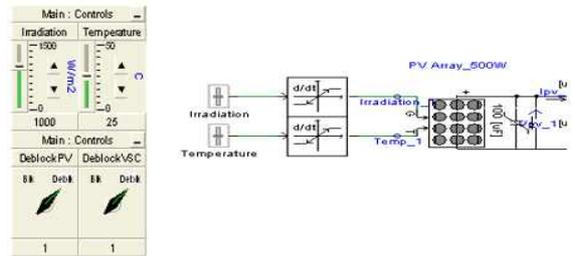
구체적으로, 태양광전류의 출력 전류  $I$ 는 태양광전원의 단락전류인  $I_{sc}$ 에서 다이오드로 흐르는 전류  $I_d$ 와 병렬저항으로 흐르는 전류  $I_{pal}$ 을 뺀 값이며, 여기서 태양광전원의 단락전류

인  $I_{sc}$ 는 단락전류의 최대값인  $I_{scR}$ 에서 최대 전류가 나올 수 있는 기준 일사량과 온도에서 현재 일사량과 온도를 고려하여 산정되며 이를 수식으로 나타내면 식 (1), 식 (2)와 같다.

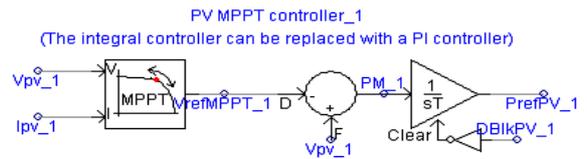
$$I = I_{sc} - I_d - I_{pal} \quad (1)$$

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

한편, 태양광전원을 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서, 그림 3(a)는 태양광전원의 모델링을 나타내며, 일사량과 온도의 제어를 통해 태양광 모듈의 출력을 제어한다. 또한, 그림 3(b)는 최대 전력점 추종(maximum power point tracker, MPPT) 제어를 나타내며, 일사량과 온도의 제어를 통해 출력되는 태양광전원의 전압과 전류를 입력받아 MPPT 제어를 통해 최대 전력점을 갖을 수 있는 출력 전압과 전류를 산정한다.



(a) 태양광전원 모델링



(b) MPPT 제어기

[그림 3] 태양광전원 모델링

#### 3.2 ESS 모델링

배터리와 배터리의 BMS로 구성된 ESS는 그림 4와 같다. 여기서, 리튬이온전지로 구성된 배터리는 내부저항, 내부 인덕턴스 및 내부전압으로 구성된 등가회로로 구성된다. 구체적으로, 배터리의 등가회로는 배터리의 기전력  $E_{bat}(t)$ 는 SOC의 역함수와 지수함수의 조합으로 나타내며, 여기서 SOC는 배터리 전체 용량에서 누적된 전류의 비로 충전상태를 의미한다. 또한, 배터리 단자전압  $V_{bat}(t)$ 는 기전력  $E_{bat}(t)$ 에서 내부저항에 의한 전압강하를 뺀 값이며, 이를 수식으로 나타내면 식 (3) ~ 식 (5)와 같다.

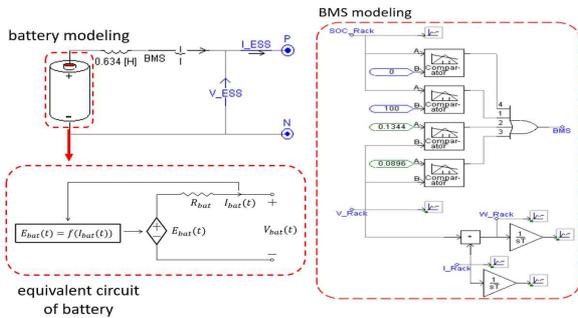
$$E_{bat}(t) = E_0 - K \frac{1}{SOC} + A \exp(-BQ(1 - SOC)) \quad (3)$$

[그림 5] 전체 시스템 모델링

$$SOC = \frac{Q - \int_{t_0}^{t_1} I_{bat}(t) dt}{Q} \times 100 \quad (4)$$

$$V_{bat}(t) = E_{bat}(t) - I_{bat}(t) \cdot R_{bat} \quad (5)$$

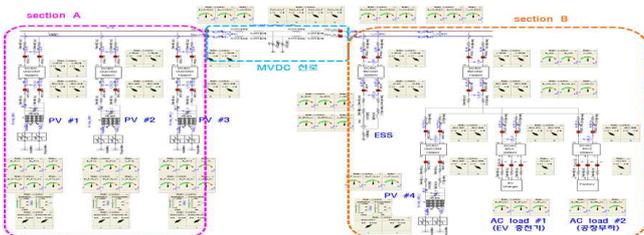
한편, 배터리의 BMS는 과충전, 과방전, 과전압, 저전압, 과전류, 등의 이상상황에 대해서 배터리를 안정적으로 보호하기 위해 회로를 차단하도록 제어한다.



[그림 4] ESS 모델링

### 3.3 전체 시스템 모델링

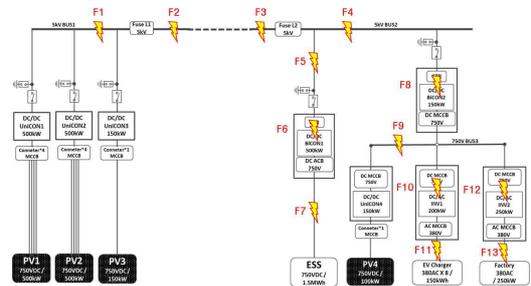
PSCAD/EMTDC를 이용하여 section A 및 section B, MVDC 선로(지중) 등으로 구성된 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 모델링을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, section A는 마이크로그리드에 전력을 공급하는 발전원으로, 총 1.15[MW]의 태양광발전원(PV #1: 500[kW], PV #2: 500[kW], PV #3: 150[kW])과 DC측의 선로 보호를 위한 MCCB 및 MVDC 계통 연계를 위한 DC/DC 컨버터 등으로 구성된다. 또한, section B는 section A의 500[kW]/1.5[MWh]의 ESS와 250[kW]의 공장 수용가부하, 150[kW]의 EV 충전소 그리고 100[kW]의 태양광발전원 및 각 장치를 보호하기 위한 보호장치와 DC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터 등으로 구성된다. 한편, section A와 section B는 2.4[km] 공장의 MVDC 선로(지중)를 통해 연결되며, 각 구역의 수전부와 지중선로의 연계를 위한 선로의 길이는 각각 800[m], 1.4[km]로 상정하며, 3개소의 태양광발전원이 모여서 발전하는 section A의 경우 DC/DC 컨버터와 태양광패널과의 거리는 약 200[m]로 상정한다.



## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

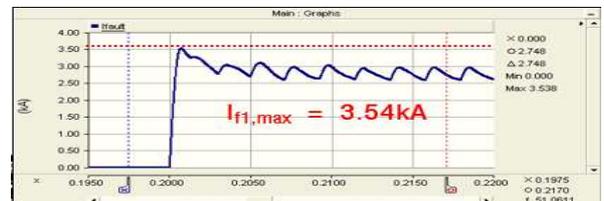
상기의 모델링을 바탕으로 MVDC 독립형 마이크로그리드의 사고해석을 위한 시뮬레이션 조건은 그림 6과 같다. 여기서, 사고 지점은 그림 6과 같이, F1 ~ F13으로 구성되며, 사고 지점 F1 ~ F5는 MVDC 선로에서 사고가 발생한 경우이며, F6, F7은 ESS에서 근접하게 사고가 발생한 경우이다. 또한, F7~F13은 LVDC 선로 및 컨버터에서 사고가 발생한 경우이며, 사고시, 단락저항은 1[mΩ]으로 상정한다.



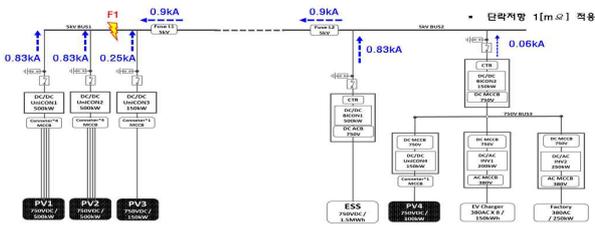
[그림 6] 5[kV]급 MVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 지점

### 4.2 MV-LVDC 사고지점별 사고전류 특성 해석

4.1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 F1에서 사고전류 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7(a)는 사고전류의 파형을 나타내며 최대 3.54[kA]의 사고전류가 발생함을 알 수 있고 그림 7(b)는 F1으로 유입되는 전체 사고전류의 흐름을 나타낸다. 또한, 태양광발전원에서 사고지점으로 유입되는 전류는 컨버터의 전류 제한에 따라 PV1과 PV2는 0.83[kA], PV3는 0.25[kA]이며, section B로부터 유입되는 사고전류는 약 0.9[kA]이고 전체 사고전류는 약 2.75[kA]로 사고전류의 약 70%가 태양광발전원 측에서 유입되는 것을 확인할 수 있다.



(a) 사고전류 파형



(b) 사고전류 흐름

[그림 7] F1에서 사고가 발생할 경우, 사고전류 특성

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 전력변환기기들로 인해 적은 사고전류가 발생하는 것을 알 수 있다.

[표 1] 사고 지점별 사고전류 특성

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

즉, 독립형 마이크로그리드에서 사고가 발생할 경우, 태양광전원은 사고가 발생하여도 일정량 이상의 출력을 낼 수 없는 태양광 모듈의 특성과 일정 이상의 사고전류가 유입되면 파괴되는 컨버터의 특성에 의해 일정 이하로 사고전류가 제

한되는 점을 알 수 있다. 또한, ESS는 사고전류를 제한없이 공급할 수 있어 사고에 막대한 영향을 끼칠 수 있지만, 상기의 컨버터의 특성으로 인하여 일정 부분 이하로 사고전류가 제한되는 것을 알 수 있다. 한편, 사고지점이 section A에 가까울수록 MVDC 선로의 영향을 받아 section B의 사고전류가 작아지는 것을 확인할 수 있으며 수용가 부하에 가까울수록 선로 및 전력변환기기들로 인해 사고전류가 제한되는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드에서 사고지점별 사고전류 특성을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션을 수행한 결과, 사고지점이 다양해질수록 선로 구성, 종류 및 각종 전력변환기기와 사고전류 공급원의 특성에 따라 사고전류의 특성 및 크기가 다르므로 각 특성에 맞는 보호협조의 설계가 필요함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20191210301940)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.