# 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 해석 모델링에 관한 연구

# 김지명, 이후동, 태동현, 노대석<sup>\*</sup> 한국기술교육대학교 전기공학과

# A Study on Fault Analysis Modeling of 5kV MV-LVDC Off-grid Micro Grid System

# Ji-Myung Kim, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**요 약** 최근, 전 세계적으로 신재생에너지전원의 도입, DC 부하의 증가 그리고 소비자의 고품질·고신뢰성 전력 요구로 인하여, MVDC 배전계통에 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 연구 가 진행되고 있지만, 기존의 AC용 기기들을 사용할 경우, 컨버터 및 선로와 같은 고가의 설비들은 사고 발생 시 안정적 으로 보호하지 못할 가능성이 있으므로, MVDC 배전망의 안정적인 운용을 위한 사고특성의 해석이 요구되고 있다. 따라 서, 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, 등으로 구 성된 MV-LVDC 마이크로그리드의 전체 시스템의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 다양한 사고지점별 시뮬레이션을 수행한 결과, MVDC 선로, LVDC 선로, AC 선로에서의 사고전류 특성은 사고의 위치, 사고 전류를 공급하는 전원의 종류, 각종 전력변환기기, 등에 영향을 받아 각 특성에 맞는 보호협조의 설계가 필요함을 알 수 있었다.

**Abstract** The MVDC distribution system has recently been in demand due to the interconnection of renewable energy sources, increase in DC load, and customer's demands for a high quality and reliable power system, while the commercialization of devices for MVDC is in the early stages. Accordingly, demonstration projects on applying existing AC devices and cables to MVDC distribution systems are being carried out. On the other hand, the protection of high-cost facilities, such as converters and cables, using existing AC devices and cables, may not be reliable in the event of a fault, and an analysis of the fault characteristics is required for the stable operation of an MV-LVDC microgrid (MG) system. This paper proposes the modeling of 5kV MV-LVDC MG system, which is composed of a PV system, ESS, MVDC cable, DC/DC converter, and DC/AC inverter using PSCAD/EMTDC S/W, to analyze the characteristics of the fault current at each fault location in the MV-LVDC MG system. The simulation results based on proposed modeling showed that a consideration of the fault current at each fault location is necessary to design protection coordination in an MV-LVDC MG system because the characteristics of the fault current in the MVDC cable, LVDC cable, and AC cable may vary depending on the fault location, types of power source, and power conversion types.

Keywords : MVDC Distribution System, MV-LVDC Off-grid MG System, Fault Current Analysis, PV System, Converter

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원에 의한 연구(P0008458)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20214910100010) 에 의하여 수행되었음. \*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education) email: dsrho@koreatech.ac.kr Received June 11, 2021 Revised July 12, 2021 Accepted September 3, 2021 Published September 30, 2021

## 1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재옙생에너지전원의 도입, DC 부하의 증가 그리고 소비자의 고품질·고신뢰성 전력 요 구로 인하여, MVDC 배전망에 대한 관심이 급증하고 있 지만[1-3], 국내외적으로 아직 실증단계에 머물러 있는 실정이다. 특히, 배전선로, 차단기, 컨택터 등과 같은 MVDC용 기기들은 개발단계에 있어 상용화된 제품이 거 의 없으며, MVDC 배전망을 구축하는데 많은 어려움이 발생하고 있다[4-6]. 이에 따라, 기존의 AC계통에서 사 용되는 기기 및 선로를 MVDC 배전망에 적용하기 위한 실증 연구가 진행되고 있다. 그러나, 기존의 AC 기기들 을 DC 배전망에 사용할 경우, 컨버터 및 선로와 같은 고 가의 설비들은 DC 선로측에서 사고 발생 시 보호하지 못할 수 있으므로, MVDC 배전망의 안정적인 운용을 위 한 사고특성의 해석이 요구되고 있다[7].

따라서 본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 마이크로그 리드의 사고지점별 전류의 특성을 해석하기 위해 배전계 통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여. 태양광전원, ESS, MVDC 선로, DC/DC 컨버터, DC/AC 인버터, 등으로 이루어진 전체 시스템을 모델링 을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, MVDC 선로에서 사고가 발생할 경우. 사고전류는 전원 으로부터 사고지점까지의 거리가 가깝기 때문에 크기가 크며, LVDC 선로에서 사고가 발생할 경우, 사고전류는 배터리용 컨버터와 배터리측 사이의 선로에서 사고를 제 외하면 비교적 작은 것을 알 수 있다. 또한, AC 부하측에 서 사고가 발생할 경우, 사고전류는 전원으로부터 거리 가 멀어 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, MV-LVDC 마이크로그리드의 사고전류는 사고의 위치, 사고 전류를 공급하는 전원의 종류, 각종 전력변환기기, 등에 영향을 받아 각 특성에 맞는 보호협조의 설계가 필 요함을 알 수 있었다.

# 2. 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 구성

최근, 국내에서는 전력변환단계의 손실과 시스템의 구 축비용을 저감할 수 있는 MV-LVDC 마이크로그리드에 대한 실증연구가 추진되고 있다[8]. 특히, 전라남도청은 소규모 DC 배전망의 실증을 위한 5kV급 MV-LVDC 독 립형 마이크로그리드의 구현 사업을 진행하고 있다. 이

러한 MV-LVDC 마이크로그리드는 Fig. 1과 같이 세 개의 section으로 구성된다. 여기서, section A는 1.15MW 급 태양광전원(PV 1,2,3), 태양광전원용 DC/DC 컨버 터, 등으로 구성된 주 발전원부이며, 태양광전원은 750V 의 LVDC 선로에 연계되고, 승압용 DC/DC 컨버터를 이 용해 5kV의 MVDC로 승압하여, section B인 5kV급 MVDC 선로를 통해 ESS 및 부하로 전력을 공급한다. 또 한, section C는 100kW급 태양광전원(PV4), 1.5MWh 급 ESS. 400kW급의 수용가 부하(EV 충전기, 공장), 등 으로 구성된다. 그리고 ESS는 배터리용 양방향 DC/DC 컨버터를 사용하여 전압을 750V/5kV로 변환하여, 태양 광전원으로부터 발전된 잉여전력을 배터리에 저장하거나 저장된 전력을 부하공급용 DC/DC 컨버터와 수용가용 DC/AC 인버터를 이용해 부하에 공급한다. 그러나, 본 실증사이트는 상용화된 MVDC용 보호기기의 미흡으로 기존 AC 보호기기를 대체하여 구성되는데, 이러한 경우 DC 선로측에서 사고 발생 시 컨버터 및 선로와 같은 고 가의 설비들이 보호되지 못할 수 있으므로, MVDC 마이 크로그리드의 안정적인 운용을 위한 사고특성 해석이 요 구되고 있다.



Fig. 1. Configuration of 5kV MV-LVDC off-grid MG system

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

#### 3.1 태양광모듈부

태양광모듈부의 등가회로는 Fig. 2와 같이 전류원, 다 이오드, 병렬 저항 및 직렬 저항으로 구성된다[9]. 여기 서, *I<sub>sc</sub>*는 태양광모듈의 단락전류, *I<sub>d</sub>*는 다이오드로 흐르 는 전류, *R<sub>pal</sub>*는 병렬 저항, *R<sub>sr</sub>*은 직렬 저항, *I*는 태양광 모듈의 출력 전류, *V*는 출력 전압을 나타낸다.



Fig. 2. Equivalent circuit of PV module

구체적으로, 태양광모듈의 출력 전류 *I*는 단락전류인 *I<sub>sc</sub>*에서 다이오드로 흐르는 전류 *I<sub>d</sub>*와 병렬저항으로 흐르 는 전류 *I<sub>pal</sub>을 뺀 값*이며, 여기서 태양광모듈의 단락전류 인 *I<sub>sc</sub>*는 단락전류의 최대값인 *I<sub>scR</sub>*에서 최대 전류가 나 올 수 있는 기준 일사량과 온도에서 현재 일사량과 온도 를 고려하여 산정되며 이를 수식으로 나타내면 Eq. (1), Eq. (2)와 같다.

$$I = I_{sc} - I_d - I_{pal} \tag{1}$$

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

where, I: output current[A],  $I_{sc}$ : short circuit current[A],  $I_{d}$ : diode current[A],  $I_{pal}$ : parallel current[A],  $I_{scR}$ : maximum short circuit current[A], G: measured radiation(W/m<sup>2</sup>),  $G_{R}$ : reference radiation[W/m<sup>2</sup>],  $a_{T}$ : temperature coefficient,  $T_{c}$ : measured temperature[°C],  $T_{cR}$ : reference temperature[°C]

한편, 태양광모듈부를 모델링하면 Fig. 3과 같다. 여 기서, Fig. 3는 태양광모듈의 모델링을 나타내며, 일사량 과 온도에 의해 태양광모듈의 출력을 제어한다.



Fig. 3. Modeling of PV module section

#### 3.2 배터리부

배터리와 BMS로 구성된 배터리부는 Fig. 4와 같다. 여기서, 리튬이온전지로 구성된 배터리는 내부저항, 내 부 인덕턴스 및 내부전압으로 구성된 등가회로로 구성된 다[10]. 구체적으로, 배터리의 기전력 *E*<sub>bat</sub>(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, 이 를 수식으로 나타내면 Eq. (3) ~ Eq. (5)와 같다. 한편, 배터리의 BMS는 과충전, 과방전, 과전압, 저전압, 과전 류, 등의 이상상태에 대해서 배터리를 안정적으로 보호 하기 위해 회로를 차단하도록 제어한다.

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

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

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

where,  $E_{bat}(t)$ : battery voltage[V],  $E_0$ : battery terminal voltage, K: polarization coefficient, Q: battery capacity[Ah], A: exponential coefficient, B: inversion exponential time coefficient, SOC: state of charge[%],  $V_{bat}(t)$ : battery output voltage[V],  $R_{bat}$ : battery internal resistance[Q],  $I_{bat}(t)$ : battery output current[A]



Fig. 4. Modeling of battery section

#### 3.3 DC/DC 컨버터부

#### 3.3.1 태양광전원용 DC/DC 컨버터

태양광전원용 DC/DC 컨버터는 Fig. 5와 같이 나타 낼 수 있다. 여기서, Fig. 5(a)는 최대 전력점 추종제어 회로로, 태양광모듈의 출력 전압과 전류를 이용해 최대 전력점을 추종하며, Fig. 5(b)는 DC/DC 컨버터의 주회 로를 나타낸다. 또한, Fig. 5(c)는 정전력 제어기로, outer loop와 inner loop로 구성되는데 outer loop는 추종된 최대 전력점을 바탕으로 현재의 출력전력과 이전 출력전력의 오차값에 대해 PI제어를 수행한다. 또한, inner loop는 outer loop의 PI 제어기 출력 값과 센싱 된 전류의 오차 값에 대해 PI 제어를 수행하며, 제어기 출력 값은 삼각파와 비교를 통해 IGBT의 듀티비를 조절 한다.



Fig. 5. Modeling of DC/DC converter for PV system

#### 3.3.2 배터리용 양방향 DC/DC 컨버터

배터리용 양방향 DC/DC 컨버터는 Fig. 6과 같이 나 타낼 수 있으며, EMS의 지령에 따라 태양광전원의 출력 이 수용가 부하보다 크면 충전모드를 수행하고, 작아지 면 방전모드로 운용한다. 여기서, Fig. 6(a)는 컨버터의 주회로를 나타내고, Fig. 6(b)는 outer loop와 inner loop로 구성된 컨버터의 제어기이며, 5kV MVDC 선로 의 정전압 제어를 위하여, 목표전압인 5kV와 출력 전압 의 오차에 대해 PI 제어를 수행한다.



Fig. 6. Modeling of bi-directional DC/DC converter for battery

## 3.3.3 부하공급용 DC/DC 컨버터

수용가 측의 전압을 제어하기 위한 부하공급용 DC/DC 컨버터는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기 서, Fig. 7(a)는 컨버터의 주회로를 나타내며, 스위칭 시 발생하는 전류 리플을 줄이기 위해 L-C 필터를 설치한 다. 또한, Fig. 7(b)는 outer loop와 inner loop로 구성 된 컨버터의 제어기이며, 0.75kV의 지령치와 센싱된 전 압의 오차값에 대해 PI 제어를 수행한다.



Fig. 7. Modeling of DC/DC converter for customer load

## 3.4 수용가용 DC/AC 인버터부

저압측의 EV 충전기 및 수용가 부하용 DC/AC 인버 터는 Fig. 8과 같이 주회로와 제어기로 구성된다. 여기 서, Fig. 8(a)는 인버터의 주회로를 나타내며, 일반적인 6개의 스위치와 L-C필터, 등으로 구성된다. 또한, Fig. 8(b)는 인버터 제어기로서, A부분은 목표전압과 현재 출 력전압을 비교하여 오차 값을 산정하고, B부분은 오차 값에 대하여 각각 PI제어를 수행하며, C부분은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 역할을 수 행한다. 또한, D부분은 삼각파의 반송파를 출력하고, E 부분은 기준파와 반송파를 비교하여 PWM신호로 변환하 는 역할을 수행한다.





Fig. 8. Modeling of DC/AC inverter

# 3.5 사고발생 장치부

MV-LVDC 마이크로그리드의 사고현상을 모의하기 위한 사고발생 장치부는 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, 사고발생 장치는 사고 지점별로 DC 측의 2선 단락 및 AC측의 3상 단락을 모의하고, 단락저 항을 고려하여 사고해석을 수행한다.



Fig. 9. Modeling of fault occurrence device

# 3.6 전체 시스템

PSCAD/EMTDC를 이용하여 section A, section B, section C로 구성된 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크 로그리드의 전체 시스템을 나타내면 Fig. 10과 같다. 여 기서, section A는 태양광모듈, 태양광전원용 DC/DC 컨버터, 등으로 구성되며, section C는 배터리, 배터리 용 양방향 DC/DC 컨버터, 부하공급용 DC/DC 컨버터, 수용가용 DC/AC 인버터, 태양광모듈, 태양광전원용 DC/DC 컨버터, 수용가 부하, 등으로 구성된다. 한편, section B는 2.4km 긍장을 갖는 MVDC 선로를 나타내 며, section A와 section C를 연결한다.



Fig. 10. Modeling of entire system

# 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

# 4.1 시뮬레이션 조건

상기의 모델링을 바탕으로 MVDC 독립형 마이크로그 리드의 사고해석을 위한 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다. 여기서, 태양광전원의 용량은 100, 150 및 500kW이며, 배터리의 용량은 500/1.5kW/MWh이고, 내부 인덕턴스는 0.634mH, 내부 저항은 7.75m Q 이다. 또한, 수용가 부하는 150kW의 전기자동차 충전기와 250kW의 공장부하로 이루어져 있으며 전압은 AC 380V이다. 한편, 태양광전원용 DC/DC 컨버터의 용량 은 100, 150, 500kW이며, 배터리용 양방향 DC/DC 컨 버터의 용량은 500kW이고 부하공급용 DC/DC 컨버터 의 용량은 500kW이다. 그리고, 수용가용 DC/AC 인버 터의 용량은 250kW이며 전압은 0.75/0.38kV이다. 또 section B의 MVDC 지중선로의 선종은 한, TFR-CV/95mm<sup>2</sup>이며 긍장은 2.4km이고, 선로 저항과 커패시턴스 및 인덕턴스는 각각 0.46 Q, 0.533 uF, 0.533mH를 산정된다. 한편, section A와 section C의 수전단과 MVDC 지중선로와 연결되는 MVDC 선종은 CU/XLPE 95mm<sup>2</sup>이며, 긍장은 각각 1.4, 0.8km이고 선로 저항은 각각 270.2. 154.4m Q으로 산정된다. 한 편, section A측 LVDC 선종은 CU/TFR-CV 70mm<sup>2</sup>이 며 긍장은 0.2km이고 선로저항은 53.6m û 이다. 또한, ESS측 LVDC 선종는 CU/TFR-CV 300mm<sup>2</sup>이며 긍장 은 0.2km이고 부하측 LVDC 선종은 CU/TFR-CV 120mm<sup>2</sup>이고 긍장은 0.01km으로 각각의 선로 저항은 0.601. 1.53m Q으로 산정된다.

	item	specification	
PV	capacity[kW]	100, 150, 500	
	voltage[kV]	0.75	
battery	capacity[kW/Mwh]	500/1.5	
	voltage[kV]	0.75	
	internal inductance[uH]	0.634	
	Internal resistance[m0]	7.75	
customer load	EV charger load[kWh]	150	
	factory load[kW]	250	
	AC load voltage[kV]	0.38	
DC/DC converter	capacity[kW]	100, 150, 500	
	voltage[kV]	0.75/5	
DC/AC inverter	capacity[kW]	250	
	voltage[kV]	0.75/0.38	

Table 1. Simulation conditions

한편, 상정 사고조건은 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있 다. 여기서, F1은 section A의 고압 측 선로 사고이고, F2와 F3는 MVDC 지중선로의 사고를 나타낸다. 또한, F4는 Section C의 ESS 고압 측 선로 사고이고, F5는 ESS DC측의 CTR(contactor)과 DC/DC 컨버터 사이 의 사고이며, F6은 DC/DC 컨버터와 ESS 사이의 사고 를 나타낸다. 한편, F7은 Section C의 ESS와 수용가 사 이의 MVDC 선로 사고이고, F8은 CTR과 LVDC용 DC/DC 컨버터 사이의 사고이며, F9는 section C의 태 양광전원의 LVDC측 사고를 나타낸다. 또한, F10, F12 는 DC MCCB와 DC/AC 인버터 사이의 사고이고, F11 과 F13은 DC/AC 인버터와 부하 사이의 사고를 상정한 것이다.



Fig. 11. Contengency fault conditions(13 cases)

## 4.2 MVDC 사고지점 사고특성 해석

4.1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 section A 측 MVDC 선로에서 단락사고(F1)가 발생한 경우에 대하여, 사고전류 특성은 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기 서, Fig. 12(a)는 사고전류의 파형을 나타내며 초기 과도 상태 시에는 DC/DC 컨버터 내부의 필터용 C성분에 의 해 방전되는 전류를 포함하여 최대 3.91kA의 사고전류 가 발생함을 알 수 있다. 또한, Fig. 12(b)는 F1으로 유 입되는 전체 사고전류의 조류 방향을 나타내며, 사고 시 PV1, PV2는 DC/DC 컨버터 정격용량(500KW)의 1.25 배의 기여전류를 공급하여, 사고지점인 F1으로 각각 0.83kA의 사고전류를 발생시키며, PV3은 150KW의 정 격용량을 가짐에 따라 0.25kA의 사고전류를 F1지점으 로 공급함을 알 수 있다. 또한, ESS측에서 발생한 0.83kA의 사고전류와 부하공급용 DC/DC 컨버터 측의 0.13kA의 사고전류가 MVDC 선로에서 통합되어, 총 0.96kA의 사고전류가 지중선로를 통해 공급됨을 알 수 있다. 따라서, 사고지점에는 총 2.87kA의 사고전류가 흐 르게 된다.



Fig. 12. Characteristics of fault current with F1 fault

#### 4.3 LVDC 사고지점 사고특성 해석

배터리용 DC/DC 컨버터와 배터리부 사이의 LVDC 선로에서 단락사고(F6)가 발생한 경우, 사고전류의 특성 은 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 13(a)는 사고전류의 파형을 나타내며 초기 과도상태 시에는 DC/DC 컨버터 내부의 필터용 C성분에 의해 방전되는 전류를 포함하여 최대 35.3kA의 사고전류가 발생함을 알 수 있다. 또한, Fig. 13(b)는 F6으로 유입되는 전체 사고전류의 조류 방향을 나타내며, PV1, PV2, PV3는 각각 0.043kA, 0.043kA, 0.25kA의 사고전류를 공급하 여, 총 0.34kA의 사고전류가 section A로부터 유입되 고, 부하공급용 DC/DC 컨버터 측의 0.17kA의 전류가 배터리측으로 유입되어, 배터리용 DC/DC 컨버터를 통 해 LVDC측으로 0.51kA의 사고전류가 공급되는 것을 알 수 있다. 한편, 배터리부에서 사고지점으로 공급하는 사고전류는 배터리부의 낮은 내부 임피던스와 선로 임피 던스로 인하여 28.9kA의 매우 큰 사고전류가 발생하게 된다. 따라서, 사고지점에는 총 29.41kA의 사고전류가 흐르게 된다.



Fig. 13. Characteristics of fault current with F6 fault

## 4.4 AC측 사고지점의 사고특성 해석

EV 충전용 부하 측 AC선로에서 3상 단락사고가 (F11)가 발생한 경우, 사고전류의 특성은 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 14(a)는 사고전류의 파형 을 나타내며, 최대 1.9kA의 사고전류가 발생함을 알 수 있다. 또한, Fig. 14(b)는 사고전류의 조류 방향을 나타 내며, section A의 태양광전원에서 약 1A의 매우 작은 전류가 유입되고, 배터리측에서 공급하는 사고전류는 약 125A 정도임을 알 수 있다. 한편, PV4는 태양광전원용 DC/DC 컨버터를 통해 사고지점으로 0.17kA의 사고전 류를 공급하며, 부하공급용 DC/DC 컨버터는 정격용량 의 1.25배에 해당하는 0.83kA의 사고전류를 공급하는 것을 알 수 있다. 따라서, 사고지점에는 총 1.9kA의 사고 전류가 흐르게 된다.





Fig. 14. Characteristics of fault current with F11 fault

### 4.5 종합 분석

상기와 같은 방식으로 다른 상정사고에 대하여 종합적 으로 사고전류 특성을 나타내면 Table 2와 같다. 여기 서, MVDC 선로에서 사고가 발생하는 경우 중, section A에 가까운 F1과 F2지점에서의 사고전류는 절반 이상이 section A의 태양광전원으로부터 공급되며, section C 에 가까운 F3과 F4, F7지점의 사고전류는 MVDC 선로 의 영향으로 section A의 태양광전원으로부터 유입되는 사고전류가 감소하는 특성을 나타낸다. 또한, 배터리측 에서 사고가 발생하는 경우, DC/DC 컨버터 내부에서 사고가 발생하는 F5지점의 사고전류는 컨버터의 용량에 의하여 작은 값을 나타내지만, DC/DC 컨버터와 배터리 사이의 F6지점의 사고전류는 배터리의 내부 저항에 의하 여 매우 높은 전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 수 용가 부하측에서 사고가 발생하는 F8~F13의 경우, MVDC에 직접 연계되는 DC/DC 컨버터 내부의 F8지점 의 사고전류는 배터리로부터 높은 전류가 유입되어 큰 값의 사고전류가 발생하지만, 나머지 경우에는 거리에 따른 선로 임피던스와 DC/DC 컨버터의 용량으로 인해 적은 사고전류가 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 2. Fault current depending on fault locations

fualt locations	fault current[kA]					
	contion A	section C		total	maximum	
	section A	ESS side	Load side	current	current	
F1	1.91	0.83	0.13	2.87	3.91	
F2	1.91	0.83	0.05	2.75	3.86	
F3	0.7	0.83	0.8	2.33	3.21	
F4	0.7	0.83	0.47	2	3.23	
F5	0.7	0.83	0.17	1.7	3.21	
F6	0.34	28.9	0.17	29.41	35.3	
F7	0.69	0.83	0.7	1.59	3.2	
F8	0.69	0.83	0.16	1.68	3.2	
F9	0.001	0.125	0.17	0.305	1	
F10	0.001	0.125	0.17	0.305	1	
F11	0.001	0.125	0.17	0.305	1.9	
F12	0.001	0.125	0.17	0.305	1	
F13	0.001	0.125	0.17	0.305	1.9	

# 5. 결론

본 논문에서는 소규모 DC 배전망의 실증 사업으로 추 진하고 있는 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드 의 안정적인 운용을 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용해 독립형 MV-LVDC 마이크로그리드의 전체 시스템을 모 델링하고 사고지점별, 사고전류 특성 해석을 수행한다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) MVDC 선로에서 단락사고가 발생한 경우에 대하여, section A의 PV1과 PV2는 각각 0.83kA의 사고전류를 발생시키며, PV3은 0.25kA의 사고전 류를 사고지점으로 공급함을 알 수 있다. 또한, ESS측에서 발생한 0.83kA의 사고전류와 부하공 급용 DC/DC 컨버터 측의 0.13kA의 사고전류가 MVDC 선로에서 통합되어, 총 0.96kA의 사고전 류가 지중선로를 통해 공급되며, 사고지점에는 총 2.87kA의 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있다.
- (2) LVDC 선로에서 단락사고가 발생한 경우에 대하여, PV1, PV2, PV3는 각각 0.043kA, 0.043kA, 0.25kA의 사고전류를 공급하여, 총 0.34kA의 사고전류가 section A로부터 유입되고, 부하공급용 DC/DC 컨버터 측의 0.17kA의 전류가 배터리측으로 유입되어, 배터리용 DC/DC 컨버터를 통해 LVDC측으로 0.51kA의 사고전류가 공급되는 것을 알 수 있다. 한편, 배터리부에서 사고지점으로 공급하는 사고전류는 배터리부의 낮은 내부 임피던스와 선로 임피던스로 인하여 28.9kA의 매우큰 사고전류가 발생하게 된다. 따라서, 사고지점에는 총 29.41kA의 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있다.
- (3) AC선로측에서 단락사고가 발생한 경우에 대하여, section A의 태양광전원은 약 1A의 매우 작은 전 류가 발생하며, 배터리측에서 공급하는 사고전류 는 약 125A임을 알 수 있다. 한편, PV4는 태양광 전원용 DC/DC 컨버터를 통해 사고지점으로 0.17kA의 사고전류를 공급하며, 부하공급용 DC/DC 컨버터는 정격용량의 1.25배에 해당하는 0.83kA의 사고전류를 공급하며, 사고지점에는 총 1.9kA의 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있다.
- (4) 본 연구에서 제안한 MV-LVDC용 사고해석 모델 링에 의하여 사고전류의 특성을 분석한 결과, MV-LVDC 마이크로그리드의 사고전류는 사고의

위치, 사고 전류를 공급하는 전원의 종류, 각종 전 력변환기기, 등에 영향을 받아 각 특성에 맞는 보 호협조의 설계가 필요함을 알 수 있었다.

# References

- [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. DOI: https://doi.org/10.1049/cp.2015.0037
- [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.
- [4] M. Monadi, C. Koch-Ciobotaru, A. Luna, J. Ignacio Candela and P. Rodriguez, "Multi-terminal medium voltage DC grids fault location and isolation", in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 14, pp. 3517-3528, 2016. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0183
- [5] J. Yang, J. E. Fletcher and J. O'Reilly, "Short-Circuit and Ground Fault Analyses and Location in VSC-Based DC Network Cables", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 10, pp. 3827-3837, 2012. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2162712
- [6] M. Monadi, C. Koch-Ciobotaru, A. Luna, J. I. Candela and P. Rodriguez, "Implementation of the differential protection for MVDC distribution systems using real-time simulation and hardware-in-the-loop", 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, pp. 3380-3385, 2015. DOI: https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310137
- [7] G. Li, L. Zhang, T. Joseph, J. Liang G. Yan, "Comparisons of MVAC and MVDC Systems in Dynamic Operation, Fault Protection and Post-Fault Restoration", IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 14-17 Oct. 2019 DOI: https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927251
- [8] M. S. Son, H. S. Jin, D. S. Rho, J. H. Ko, "Operation method of protection devices in 5kV MVDC microgrid system interconnected with distributed generators," 2020 The Korean Institute of Electrical Engineers conference, pp. 54-57, 2020. 11.
- [9] Z. Miao, L. Xu, V. Disfani, L. Fan, "An SOC-Based Battery Management System for Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, pp. 966-973, 11 Oct. 2013

#### DOI: https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2279638

[10] B. Gorgan, S. Busoi, G. Tanasescu, P. Notingher, "PV plant modeling for power system integration using PSCAD software", 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering(ATEE), 978-1-4799-7514-3, 7-9 May, 2015. DOI: <u>https://doi.org/10.1109/ATEE.2015.7133916</u>

## 김 지 명(Ji-Myung Kim)

# [준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교 육대학교 전기공학과 석사과정 재 학 중

〈관심분야〉 전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

#### 이 후 동(Hu-Dong Lee)

#### [정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학 과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전 기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야> 배전계통 운용, 보호협조, 신재생에너지, 마이크로그리드

## 태 동 현(Dong-Hyun Tae)

### [정회원]

- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학 과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전 기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉

배전계통, 신재생에너지, 마이크로그리드, 전기저장장치

### 노 대 석(Dae-Seok Rho)

#### [종신회원]

- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공 학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학
   과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)

• 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원

• 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

〈관심분야〉 전력/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석