

# 5kV급 MV-LVDC 배전시스템의 CMV 발생 메커니즘 및 운용특성에 관한 연구

이민행\*, 김윤호\*, 김세진\*, 김경화\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:dlalsgod97@koreatech.ac.kr

## A Study on the Mechanism and Operation Characteristics of CMV in 5kV MV-LVDC Distribution System

Min-Haeng Lee\*, Kyung-Hwa Kim\*, Yun-Ho Kim\*, Se-Jin Kim\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korea University of Technology and Education

### 요 약

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 기존 AC 배전망의 접속용량 포화 등의 이유로, 기존의 AC 배전망에 DC 배전기술을 적용하여 공급용량을 향상시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, 기존의 AC 배전망과 달리 DC 배전시스템은 계통연계 및 전기설비 기술기준과 안전운용 절차 등이 미흡하여, DC 배전망의 전기적 위해요인에 대한 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 실증단지를 대상으로 DC 배전망의 전기적 위해요인 중 하나인 CMV에 대한 발생 메커니즘과 CMV의 운용특성을 제시한다. 이를 바탕으로 5kV급 MV-LVDC 배전시스템의 CMV 운용특성을 평가한 결과, 메인컨버터 IGBT의 스위칭에 의한 CMV는 과도한 전압으로 인해 DC 설비의 절연내력과 수용가의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서 론

최근, 정부는 차세대 성장 동력 산업 중 하나로서 녹색 성장 정책을 추진하고 있으며, 그 일환으로 재생에너지 3020 이행계획에 따라 2030년까지 신재생에너지 전원의 비중을 20[%]로 확대하는 보급사업을 적극적으로 수행하고 있다. 이에 따라, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 기존 배전망의 접속용량 포화 등의 이유로 DC 배전시스템에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 이러한, DC 배전망은 조류를 능동적으로 제어하여 선로 및 설비의 이용률을 높일 수 있고, 동일한 선로를 활용하여 기존의 AC 배전망보다 더 많은 용량을 공급할 수 있어 전력 인프라의 투자를 지연시킬 수 있다. 하지만, 기존에 운용되던 AC 배전시스템과 달리, DC 배전시스템은 계통연계 및 전기설비 기술기준과 안전운용 절차 등이 미흡하여, DC 배전망의 전기적 위해요인에 대한 연구가 요구되고 있는 상황이다[1].

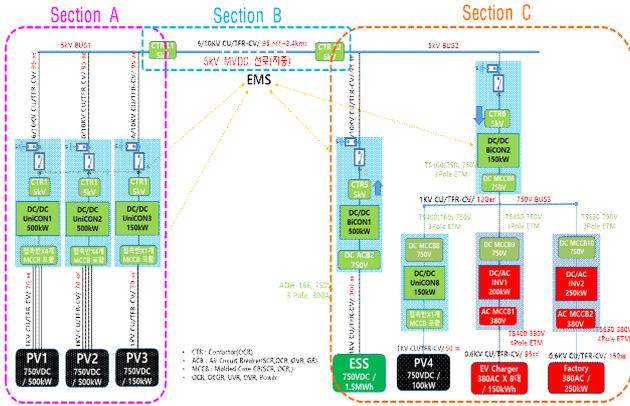
따라서, 본 논문에서는 DC 배전망의 안전성을 확보하기 위해, 전기적 위해요인 중 하나인 CMV에 대한 발생 메커니즘을 제시하고, 소규모 DC 배전망의 실증단지인 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드를 대상으로 CMV 운용

특성을 제시한다. 이를 바탕으로 5kV급 DC 배전시스템에서 CMV에 대한 운용 특성을 분석한 결과, IGBT의 스위칭에 의한 CMV는 과도한 전압으로 인해 DC 설비의 절연내력을 초과할 가능성이 있어, DC 설비에 악영향을 미칠 수 있으며, 이는 노이즈를 유발하여 다양한 계기류의 오작동을 일으킬 수 있어 작업자의 안전을 위협할 수 있음을 알 수 있다.

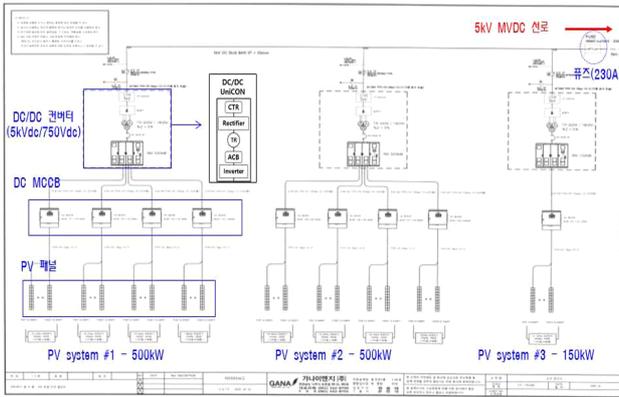
### 2. 5kV급 MV-LVDC 배전시스템의 운용특성

최근, 국내에서는 전력변환단계의 손실과 시스템의 구축비용을 저감할 수 있는 MV-LVDC 마이크로그리드에 대한 실증 연구가 활발하게 추진되고 있다. 특히, 전라남도에서는 소규모 DC 배전망의 실증을 위한 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 구현 사업을 진행하고 있다. 이러한, MV-LVDC 마이크로그리드는 그림 3과 같이 세 개의 section으로 구성된다[2]. 여기서, section A는 그림 4와 같이 배전시스템의 단선도로 나타낼 수 있는데, 1.15MW급 태양광전원(PV 1,2,3), 태양광전원용 DC/DC 컨버터 등으로 구성된 주 발전원부이며, 태양광전원은 750V의 LVDC 선로에 연계되고, 승압용 DC/DC 컨버터를 이용해 5kV의 MVDC로 승압한다. 또

한, section B는 TFR-CV/95mm<sup>2</sup>의 선종으로 2.4km의 MVDC 지중선로로 구성되며, 5kV급 MVDC 선로를 통해 ESS 및 부하로 전력을 공급한다. 그리고, section A와 section C의 수전단과 MVDC 지중선로와 연결되는 MVDC 선종은 CU/XLPE 95mm<sup>2</sup>이며, 공장은 각각 1.4, 0.8km로 구성된다. 한편, section C는 100kW급 태양광전원(PV 4)과 1.5MWh급 ESS, 400kW급의 수용가 부하(EV 충전기, 공장)등으로 구성된다.



[그림 3] 5kV MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 전체 구성



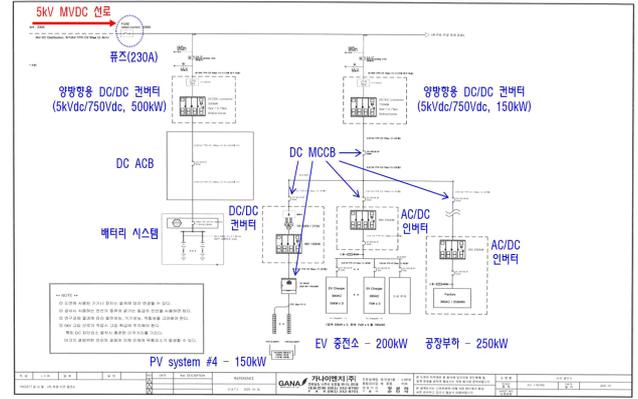
[그림 4] 5kV MV-LVDC 마이크로그리드의 단선도(section A)

### 3. 5kV급 MV-LVDC 배전계통의 CMV 발생 메커니즘

#### 3.1 5kV급 MV-LVDC 배전계통의 구성

5kV급 MV-LVDC 배전계통에서 section C는 그림 5와 같이 배전계통의 단선도로 나타낼 수 있는데, 100kW급 태양광전원(PV 4)과 1.5MWh급 ESS, 400kW급의 수용가 부하(EV 충전기, 공장)등으로 구성된다. 여기서, ESS는 배터리용 양방향 DC/DC 컨버터를 사용하여 전압을 750V/5kV로 변환하여, 태양광전원으로부터 발전된 잉여전력을 배터리에 저장하거나 저장된 전력을 부하공급용 DC/DC 컨버터와 수용가용

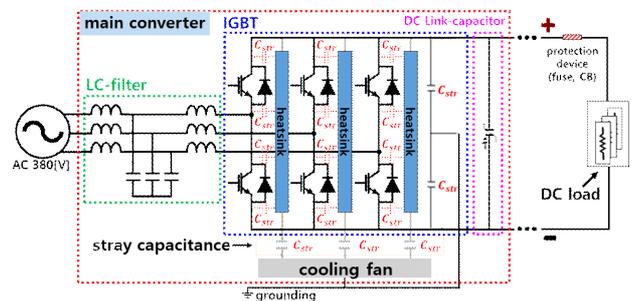
DC/AC 인버터를 통하여 부하에 공급한다. 그러나, 본 실증사 이트는 상용화된 MVDC용 보호기기의 미흡으로 기존 AC 보호기기를 대체하여 구성되는데, DC 선로측에서 전기적위해 요인으로부터 컨버터 및 선로와 같은 고가의 설비들이 보호되지 못할 수 있으므로, 이에 따른 운용특성이 요구됨을 알 수 있다.



[그림 5] 5kV MV-LVDC 마이크로그리드의 단선도(section C)

#### 3.2 5kV급 MV-LVDC 배전계통의 CMV 발생 메커니즘

5kV급 MV-LVDC 배전계통의 메인컨버터는 그림 6과 같이 IGBT 모듈, L-C 필터, DC Link 커패시터로 구성된다. 여기서, 메인컨버터의 IGBT는 전력변환을 목적으로 5~10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 수행하며, 이때 발생하는 온도상승을 억제하기 위하여 방열판(heatsink)을 설치한다[3]. 하지만, 도전부와 방열판(외함) 사이에 존재하는 기생 커패시턴스(stray capacitance)에 의하여 공통모드전압(CMV, common mode voltage)이 발생할 수 있다. 여기서, 기생 커패시턴스는 식 (1)과 같이 IGBT 모듈의 도전부와 방열판의 크기를 고려하여 산정할 수 있으며, 구조에 따라 CMV 크기에 영향을 미칠 수 있다.



[그림 6] IGBT 스위칭에 의한 CMV

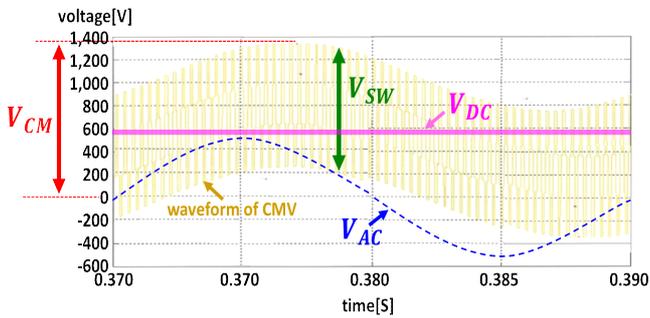
$$C_{str} = \frac{4 \times \epsilon_r \times \epsilon_0}{\pi} \times w \times \ln\left(\frac{Y}{H}\right) + \frac{A}{d} \times \epsilon_0 + 0.88 \times \epsilon_0 \quad (1)$$

여기서,  $C_{str}$  : 기생 커패시턴스,  $\epsilon_r$  : 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )의 비유전율,  $\epsilon_0$  진공 유전율,  $w$  : IGBT 모듈의 폭,  $Y$  : 방열판의 높이,  $H$  : 방열판에서 IGBT 모듈 중심까지의 거리,  $A$  : 방열판의 면적,  $d$  : 방열판에서 IGBT 모듈 밑면까지의 거리

또한, CMV( $V_{CM}$ )는 그림 7과 같이 직류( $V_{DC}$ ), 교류( $V_{AC}$ ), 스위칭 성분( $V_{SW}$ )으로 구성되며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 메인컨버터가 DC 부하에 전력을 공급하면, IGBT의 스위칭 동작에 의하여 발생하는 전압변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스에 의해 합성 CMV가 생성된다.

$$V_{CM} = \sqrt{V_{AC}^2 + V_{SW}^2 + V_{DC}^2} \quad (2)$$

여기서,  $V_{CM}$  : CMV[V],  $V_{AC}$  : 교류 성분[V],  $V_{SW}$  : 스위칭 성분[V],  $V_{DC}$  : 직류 성분[V]



[그림 7] CMV의 구성요소 및 파형

## 4. 시험 결과 및 분석

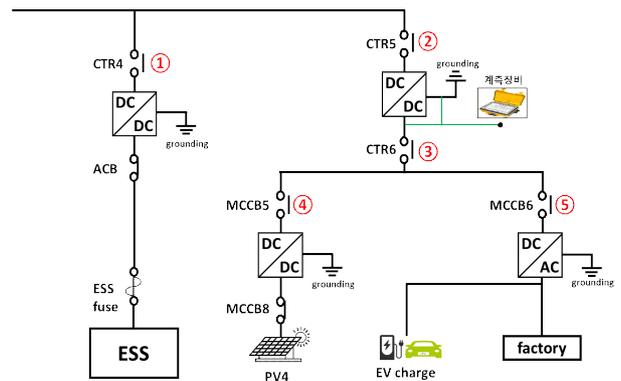
### 4.1 시험 조건

본 논문에서 제시한 CMV 발생 메커니즘과 5kV급 MV-LVDC 배전계통의 실증단지를 바탕으로, CMV의 운용특성을 평가하기 위한 시험조건은 표 1과 같다. 단, 측정구역은 5kV급 MV-LVDC 배전계통의 실증단지에서 section C의 구역으로 선정한다. 여기서, 태양광전원의 용량은 100[kW]이며, 배터리의 용량은 500/1.5[kW/MWh]이고, 내부 임피던스는 0.634[mH], 내부 저항은 7.75[mΩ]이다. 또한, 수용가 부하는 150[kW]의 전기자동차 충전기와 250[kW]의 공장부하로 이루어져 있으며 전압은 AC 380[V]이다. 한편, 태양광전원용 DC/DC 컨버터의 용량은 100[kW]이며, 배터리용 양방향 DC/DC 컨버터의 용량은 500[kW]이고 부하공급용 DC/DC 컨버터의 용량은 500[kW]이다. 그리고, 수용가용 DC/AC 인버터의 용량은 250[kW]이며 전압은 0.75/0.38[kV]이다. 한편, 가동순서에 따른 CMV의 운용특성은 그림 8과 같이 section

C의 구역에서 ①번에서 ⑤번의 순서로 차단기의 개폐동작을 수행하는데, 이때 측정장치부는 배터리용 DC/DC 컨버터(5/0.75[kV])의 출력측 전압(0.75[kV])의 (+)단자와 접지, (-)단자와 접지 사이의 전압을 측정하여 CMV 운용특성을 확인한다.

[표 1] 시험조건

항 목		내 역
태양광전원	정격용량[kW]	100
	정격전압[kV]	0.750
배터리	정격용량[kW/MWh]	500/1.5
	정격전압[kV]	0.75
	내부 임피던스[uH]	0.634
수용가 부하	내부 저항[mΩ]	7.75
	EV charger 정격용량[kWh]	150
	factory 정격용량[kW]	250
DC/DC 컨버터	AC 부하 전압[kV]	0.38
	정격용량[kW]	100, 500
DC/AC 인버터	정격전압[kV]	0.75, 5
	정격용량[kW]	250
CMV 측정위치	정격전압[kV]	0.75/0.38
	DC/DC 컨버터의 출력측(0.75[kV])	

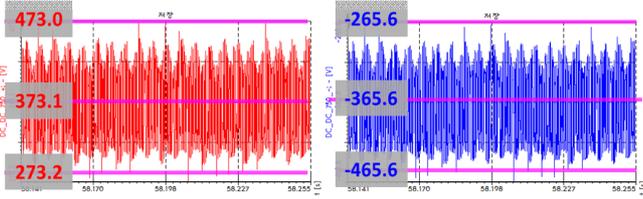


[그림 8] 5kV MV-LVDC 실증단지의 가동순서 개념도

### 4.2 5kV급 MV-LVDC 배전계통의 CMV 운용특성

상기에서 제시한 5kV MV-LVDC 실증단지의 가동순서 개념도를 바탕으로, PV와 수용가용 DC/DC 컨버터의 입력전압만을 공급할 경우에 계통연계용 DC/DC 컨버터의 출력측 단자의 CMV 운용특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 그림 9(a)와 같이 메인컨버터의

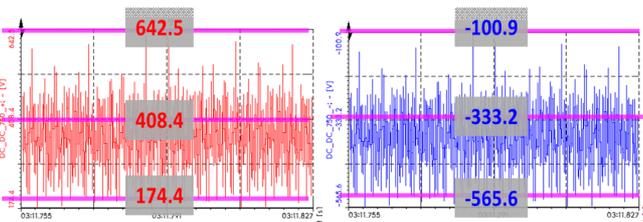
(+)단자와 접지사이에서 최대 473.0[V]로 산정되며, 그림 9(b)와 같이 (-)단자와 접지 사이에서 -465.6[V]의 CMV가 발생됨을 알 수 있다. 즉, CMV가 약  $\Delta 199.8[V]$ 로 산정되어, 메인컨버터의 정격전압의 약 53[%]정도 발생됨을 알 수 있다.



(a) (+)단자와 접지사이의 전압 (b) (-)단자와 접지사이의 전압

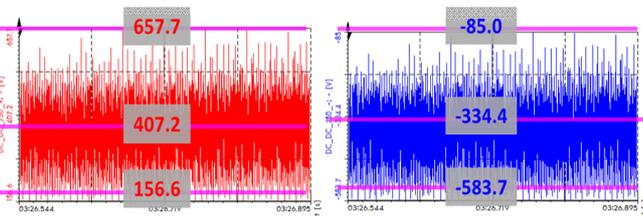
[그림 9] 계통연계용 DC/DC 컨버터의 CMV 운용특성

또한, 그림 10은 수용가용 DC/DC 컨버터를 가동한 경우의 계통연계용 DC/DC 컨버터의 출력측 단자의 CMV 운용특성을 나타내는데, 그림 10(a)와 같이 메인컨버터의 (+)단자와 접지사이에서 최대 642.5[V]로 산정되며, 그림 10(b)와 같이 (-)단자와 접지 사이에서 -565.6[V]의 CMV가 발생됨을 알 수 있다. 즉, CMV가 약  $\Delta 468.1[V]$ 로 산정되어, 메인컨버터의 정격전압의 약 113.7[%]정도 발생됨을 알 수 있다. 한편, 그림 11은 수용가용과 PV용 DC/DC 컨버터를 가동한 경우의 계통연계용 DC/DC 컨버터의 출력측 단자의 CMV 운용특성을 나타내는데, 그림 11(a)와 같이 메인컨버터의 (+)단자와 접지사이에서 최대 657.7[V]로 산정되며, 그림 11(b)와 같이 (-)단자와 접지 사이에서 -583.7[V]의 CMV가 발생됨을 알 수 있다. 즉, CMV가 약  $\Delta 501.1[V]$ 로 산정되어, 메인컨버터의 정격전압의 약 123.1[%]정도 발생됨을 알 수 있다.



(a) (+)단자와 접지사이의 전압 (b) (-)단자와 접지사이의 전압

[그림 10] 수용가용 DC/DC 컨버터 연계시 CMV 운용특성



(a) (+)단자와 접지사이의 전압 (b) (-)단자와 접지사이의 전압

[그림 11] PV용 DC/DC 컨버터 연계시 CMV 운용특성

### 4.3 종합분석

상기에서 제시한 5kV MV-LVDC 실증단지를 바탕으로, 제시한 가동순서에 따른 연계용 DC/DC컨버터의 CMV 운용특성을 종합하면 표 2와 같다. 여기서, 메인컨버터 IGBT의 스위칭에 의한 CMV는 가동순서에 관계없이 과도한 전압으로 인해 DC 설비의 절연내력을 초과할 가능성이 있어 DC 설비에 악영향을 미칠 수 있으며, 이는 노이즈를 유발하여 다양한 계기류의 오작동을 일으킬 수 있어 작업자의 안전을 위협할 수 있음을 알 수 있다.

[표 2] 5kV 실증단지의 가동순서에 따른 CMV 운용특성

항목	계통 연계용 DC/DC 컨버터	수용가용 DC/DC 컨버터	PV용 DC/DC 컨버터
(+)단자 [V]	273.2 ~473.0	174.4 ~642.5	156.6 ~657.7
(-)단자 [V]	-265.6 ~-465.6	-100.9 ~-565.6	-85.0 ~-583.7

## 5. 결 론

본 논문에서는 DC 배전망의 전기적 위해요인 중 하나인 CMV에 대한 발생 메커니즘을 제시하고, 소규모 DC 배전망의 실증단지인 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드에서의 CMV 운용특성을 평가한다. 이를 바탕으로 5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드에서의 CMV 운용특성을 평가한 결과, 메인컨버터 IGBT의 스위칭에 의한 CMV는 과도한 전압으로 인해 DC 설비의 절연내력을 초과할 가능성이 있어, DC 설비에 악영향을 미칠 수 있으며, 이는 노이즈를 유발하여 다양한 계기류의 오작동을 일으킬 수 있어 작업자의 안전을 위협할 수 있음을 알 수 있다.

## 참고문헌

[1] 이후동, 한병길, 김지명, 김윤희, 노대석, “±35kV급 MVDC 실증 배전망의 보호협조기기 운용알고리즘에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 24, No. 11, pp. 900-908, 2023

[2] 김지명, 이후동, 태동현, 노대석, “5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 사고 해석 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 22, No. 9, pp. 745-753, 2021

[3] 최성문, 유현상, 한병길, 김미영, 노대석, “CMV에 대한 ESS 안전성 평가에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 24, No. 5, pp. 635-646, 2023