

5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인 평가 모델링에 관한 연구

이민행, 김세진, 장형안, 김운호, 노대석*

한국기술교육대학교

e-mail:dlalsgod97@koreatech.ac.kr

A Study on the Evaluation Modeling of Electrical Hazard Factors in 5kV MVDC Microgrid System

Min-Haeng Lee, Se-Jin Kim, Hyeong-An Jang, Yun-Ho Kim, Dae-Seok Rho*

Korea University of Technology and Education

요약

최근, 신재생에너지 및 분산형 전원의 배전망 연계와 DC 부하의 수요 확대에 인하여, 전력 손실을 최소화하고 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 DC 배전망의 필요성이 증가하고 있다. 하지만, AC 배전망과 DC 배전망은 안전 운용절차와 대응방식이 상이하기 때문에, DC 배전망에서 작업자의 안전 확보와 설비 보호를 위한 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전망의 전기적 위해요인으로 추정되는 CMV와 누설전류, 개폐서지 등의 발생 메커니즘을 제시하고, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 부하연계용 DC/DC 컨버터부, 수용가용 DC/AC 인버터부, 등으로 구성된 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인을 평가한 결과, CMV, 누설전류, 개폐서지, 등의 전기적 위해요인이 LVDC 배전망의 안전성에 악영향을 유발하여, 인체 및 설비의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

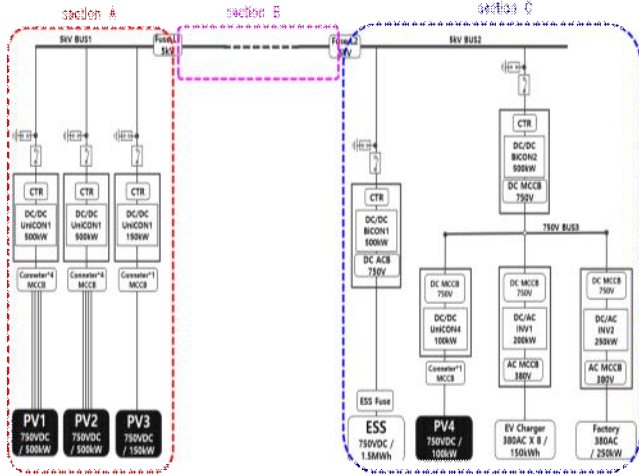
기존 AC 배전망의 수용성 한계로 인하여 신재생에너지 전원의 효율적인 계통 연계가 어려운 상황이다. 이를 극복하기 위한 방안 중의 하나인 DC 배전망은 기존 AC 배전망과 달리 전기 설비 기술 기준과 안전 운용절차가 아직 미흡하여, 다양한 전기적 위해요인에 의한 작업자의 안전 및 설비 보호를 위한 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 즉, DC 배전망의 전기적 위해요인은 전력 변환장치의 스위칭 동작과 사고 발생, 보호기기의 동작, 등과 같은 다양한 요인에 따라 발생하여, 작업자뿐만 아니라 DC 배전설비에 악영향을 미칠 수 있으므로 전기적 위해요인의 발생 메커니즘과 운용특성에 대하여 제시되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인으로 추정되는 CMV, 누설전류, 개폐서지, 등의 발생 메커니즘을 설비의 구성과 운용특성에 대하여 제시되어야 한다. 또한, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS부, 태양광전원부, 부하연계용 DC/DC 컨버터부, 수용가용 DC/AC 인버터부, 등으로 구성된 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인 평가 모델링을 수행한다.

이를 바탕으로 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인을 분석한 결과, CMV는 과도한 전압으로 인해 DC 설비의 절연내력을 초과할 가능성이 있고, 누설전류는 전기설비 기술기준의 허용 기준치(1mA)를 크게 초과하여 인체 감전 및 화재 발

생 가능성이 있음을 알 수 있었다. 따라서, CMV, 누설전류, 개폐서지, 등의 전기적 위해요인이 LVDC 배전망의 안전성에 부정적 영향을 유발하여 인체 및 설비의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

2. 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 구성

최근, 전라남도에서는 DC 배전망의 실증을 위한 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 구현 사업을 진행하고 있으며, 이는 그림 1과 같이 세 개의 section으로 구성된다. 여기서, section A는 태양광전원(1.15MW)과 DC/DC 컨버터 등으로 구성된 주 발전원부이며, 태양광전원은 750V의 LVDC 선로에 연계되고, DC/DC 컨버터를 이용해 5kV의 MVDC로 승압한다. 또한, section B는 5kV급 MVDC 지중선로(TFR-CV/95mm², 2.4km)이며, MVDC 선로를 통해 ESS 및 부하로 전력을 공급한다. 한편, section C는 태양광전원(100kW)과 ESS(1.5MWh), 수용가 부하(400kW급의 EV, 공장)등으로 구성되며, 수용가 부하는 양방향 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터를 통해 태양광전원과 ESS로부터 전력을 공급받는다. 그러나, 본 실증사이트는 상용화된 MVDC용 보호기기의 미흡으로 기존 AC 보호기기를 대체하여 구성되는데, DC 선로 측에서 전기적 위해요인으로부터 컨버터 및 선로와 같은 고가의 설비들이 보호되지 못할 수 있으므로, 이에 따른 운용특성이 요구됨을 알 수 있다.



[그림 1] 5kV MVDC 마이크로그리드의 전체 구성

3. 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인 발생 메커니즘

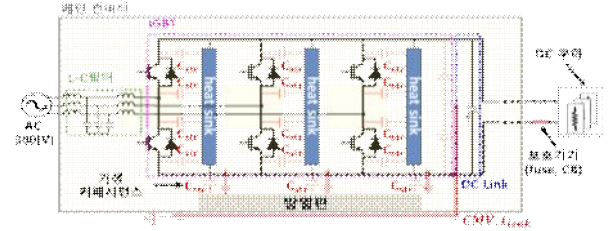
3.1 IGBT 스위칭 동작에 의한 CMV 및 누설전류 발생 메커니즘

일반적으로, LVDC 배전망의 메인컨버터는 그림 2와 같이 IGBT 모듈, L-C 필터, DC Link 커패시터, 등으로 구성된다. 여기서, IGBT는 전력변환을 목적으로 5~10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 수행하며, 이때 발생하는 온도상승을 억제하기 위하여 방열판(heatsink)이 필수적으로 설치된다. 하지만, IGBT 모듈의 도전부와 방열판 사이에 형성되는 기생 커패시턴스(stray capacitance)에 의하여, 접지 경로를 통한 공통 모드 전압(CMV, common mode voltage)이 발생될 수 있으며, 이로 인해 누설전류(leakage current)가 유입될 수 있다. 여기서, 기생 커패시턴스는 식 (1)과 같이 IGBT 모듈과 방열판의 구조적인 특성을 고려하여 산정되며, CMV의 크기에 직접적인 영향을 미친다. 또한, IGBT 스위칭 동작에 의한 누설전류($i_{leak, str}$)는 식 (2)와 같이 시간에 따른 IGBT 스위칭의 전압 변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스(C_{str})에 의해 결정되므로, 메인 컨버터의 스위칭 주파수와 방열판의 구조가 누설전류의 발생에 큰 영향을 미칠 수 있다.

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

$$i_{leak, IGBT} = C_{str} \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

여기서, C_{str} : 기생 커패시턴스, ϵ_r : Al_2O_3 의 비유전율, ϵ_0 : 진공 유전율, w : IGBT 모듈의 폭, Y : 방열판 높이, H : IGBT 모듈 중심과 방열판 사이의 거리, A : 방열판 면적, d : IGBT 모듈 밑면과 방열판 사이의 거리, $i_{leak, str}$: IGBT 스위칭 동작에 의한 누설전류, v : 스위칭 전압, t : 스위칭 시간



[그림 2] IGBT 스위칭 동작에 의한 CMV 및 누설전류 발생 메커니즘

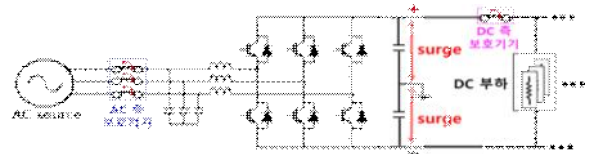
3.2 보호기기의 차단 동작에 의한 개폐서지 발생 메커니즘

사고 유형과 위치에 따라 차단기가 동작하면, 선로의 인덕터에 저장된 자기 에너지와 차단기 극간 커패시터에 축적된 정전 에너지가 순간적으로 방전되어, AC와 DC 측에서 서로 다른 형태의 개폐서지가 발생하여 LVDC 배전망에 악영향을 미칠 수 있다. 즉, 차단 동작에 의한 서지는 그림 3과 같이 메인 컨버터의 기생 커패시턴스에 의해 약 1/2로 분배된 후 (+)극과 접지 및 (-)극과 접지 사이에 인가되어, 수용가에 악영향을 줄 수 있다. 한편, 보호기기의 차단 동작에 의한 개폐서지의 전압은 변압기의 인덕터와 메인 컨버터의 커패시터 간의 공진에 의하여, 변압기의 철심을 포화시켜 철공진 현상을 발생시킬 수 있다. 즉, 변압기 2차 측의 전압은 변압기 및 메인 컨버터의 등가 임피던스(XP)와 차단기의 극간 임피던스(XCB)의 전압 분배에 의하여 식 (3)과 같이 결정된다. 또한, 등가 임피던스는 식 (4)와 같이 변압기의 리액턴스(XL)와 메인 컨버터의 리액턴스(XCmain)의 병렬 합으로 나타낼 수 있다.

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{n} \times \frac{X_p}{X_p + X_{CB}} \quad (3)$$

$$X_p = \frac{X_L \times X_{C_main}}{j(X_L + X_{C_main})} \quad (4)$$

여기서, E_{in} : 입력전압[V], E_{out} : 출력전압[V], n : 권수비, X_p : 변압기와 메인 컨버터의 병렬 등가 임피던스[Ω], X_{CB} : 차단기의 극간 임피던스[Ω], X_L : 변압기의 리액턴스[Ω], X_{C_main} : 메인 컨버터의 리액턴스[Ω]



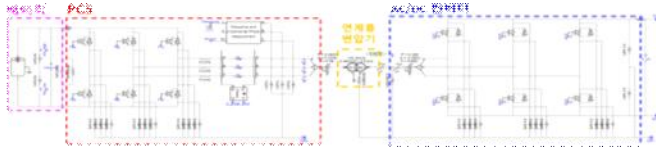
[그림 3] 보호기기의 동작에 의한 개폐서지 발생 메커니즘

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인 평가 모델링

4.1 ESS부

ESS부는 그림 4와 같이 배터리와 PCS, 연계용 변압기, AC/DC 컨버터, 등으로 구성된다. 여기서, 배터리는 단자전압과 내부저항 등을 바탕으로 다수의 배터리 모듈을 하나의 배터리팩으로 등가화하여 나타낸다. 또한, PCS는 고조파와 노이즈를 저감시키는 L-C 필터와 스위칭을 통해 DC 전력을 3상 AC 전력으로

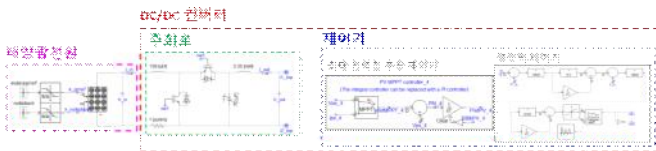
변환시키는 IGBT 모듈, 출력단의 DC 전압을 안정적으로 유지하는 DC-Link 커패시터, 등으로 구성된다. 한편, 연계용 변압기는 PCS의 AC 측에서 출력되는 3상 AC 전압을 380[V]에서 3.3[kV]로 승압시키며, 이는 AC/DC 컨버터를 통해 5[kV]의 DC 전압으로 변환한다.



[그림 4] ESS부의 모델링

4.2 태양광전원부

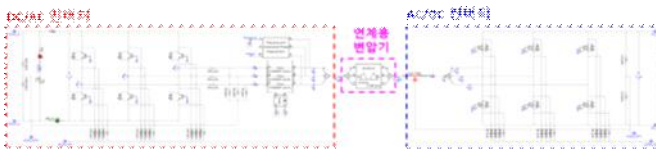
태양광전원부는 그림 5와 같이 태양광 스트링과 DC/DC 컨버터, 등으로 구성된다. 여기서, 태양광 스트링은 다수의 태양광 모듈을 1개의 스트링으로 등가화하여 나타낸다. 한편, DC/DC 컨버터는 주회로와 제어기로 구성되는데, 목표로 하는 전력을 조정하기 위하여 최대 전력점 추종 제어기를 통해 태양광 모듈의 출력 전압과 전류를 이용해 최대 전력점을 추종한다. 또한, 정전력 제어기는 추종된 최대 전력점을 바탕으로 현재와 이전 출력전력의 오차값에 대해 PI 제어를 수행한다.



[그림 5] 태양광전원부의 모델링

4.3 부하연계용 DC/DC 컨버터부

부하연계용 DC/DC 컨버터는 그림 6과 같이 DC/AC 인버터와 연계용 변압기, AC/DC 컨버터, 등으로 구성된다. 여기서, DC/AC 인버터는 L-C 필터와 IGBT 모듈, DC-Link 커패시터, 등으로 구성된다. 또한, 연계용 변압기는 5[kV]의 DC 전압을 입력받아 DC/AC 인버터의 AC 측에서 출력되는 3상 AC 전압을 3.3[kV]에서 380[V]로 강압시키며, 이는 AC/DC 컨버터를 통해 750[V]의 DC 전압으로 변환한다.



[그림 6] 부하연계용 DC/DC 컨버터의 모델링

4.4 수용가용 DC/AC 인버터부

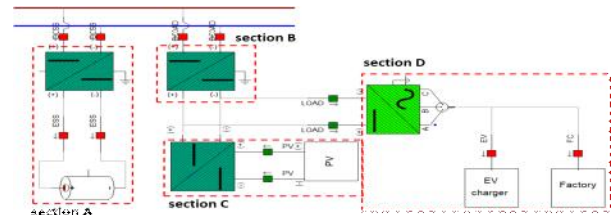
저압선로 측의 EV 충전소 및 수용가 부하와 연계된 DC/AC 인버터는 그림 7과 같이 주회로와 제어기로 구성된다. 여기서, DC/AC 인버터의 주회로는 L-C 필터와 IGBT 모듈, DC-Link 커패시터, 등으로 구성된다. 또한, 제어기는 목표 전압과 현재 출력전압을 비교하여 오차 값을 산정하고, PI 제어를 수행한다.



[그림 7] 수용가용 DC/AC 인버터의 모델링

4.5 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로 전체 시스템을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, section A는 배터리의 DC 750[V]를 5[kV]로 변환하는 ESS부, section B는 DC 5[kV]를 DC 750[V]로 변환하는 부하공급용 DC/DC 컨버터부, section C는 태양광전원의 DC 750[V]를 계통과 연계되는 태양광전원부로 구성된다. 또한, section D는 수용가용 DC/AC 인버터부와 DC 부하를 나타낸다.



[그림 8] 전체 시스템 구성

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

상기에서 제시한 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인 평가 모델링을 바탕으로, 전기적 위해요인의 운용특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 단, 측정구역은 5kV급 MVDC 마이크로그리드에서 section C로 결정하며, 측정지점은 부하연계용 DC/DC 컨버터부의 750[V]의 LVDC 선로로 산정한다.

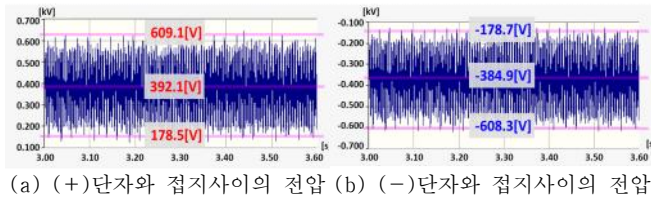
[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목		내 역
ESS	배터리 [kW/MWh]	500/1.5
	정격전압[kV]	0.75
	내부 임피던스[uH]/내부 저항[mΩ]	0.634/7.75
태양광	정격용량[kW]	100
	정격전압[kV]	0.750
	태양광 연계용 DC/DC 컨버터 (태양광측[kV]/LVDC선로측[kV])	0.75/0.75
수용가	부하 공급용 DC/DC 컨버터 (고압측[kV]/저압측[kV])	5.0/0.75
	수용가용 DC/AC 인버터 (LVDC선로측[kV]/부하측[V _{AC}])	0.75/380
	부하용량[kW]	400
측정위치	부하 연계용 DC/DC 컨버터 (저압측[kV])	0.75 feeder

5.2 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 CMV 운용특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 5kV급 MVDC 마이크로그리드에서 IGBT 스위칭 동작에 의한 부하공급용 DC/DC 컨버터의 저압측 CMV의 운용특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, (+) 단자와 접지 사이에 최대 609.1[V]로 산정되어, CMV가

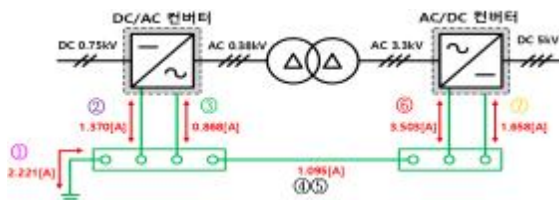
약 $\Delta 430.6[V]$ 로 정격전압의 109.8[%] 정도 나타남을 알 수 있다. 따라서, IGBT 스위칭 동작에 의한 CMV가 DC 설비의 절연 내력을 초과하여, LVDC 배전망에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



[그림 9] 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 CMV 운용특성

5.3 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 누설전류 운용특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 5kV급 MVDC 마이크로그리드에서 IGBT 스위칭 동작에 의한 부하공급용 DC/DC 컨버터의 저압측 누설전류의 운용특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10(a)와 그림 10(b)는 각각 설비에 유입되는 누설전류의 방향과 크기를 나타낸다. 즉, 부하공급용 DC/DC 컨버터에서 DC/AC 컨버터의 스위칭 소자(②)와 기타소자(③)에서 각각 1.370[A], 0.868[A]의 누설전류가 발생하고, AC/DC 컨버터의 기타소자(⑥)와 스위칭 소자(⑦)에서 각각 3.503[A], 1.658[A]의 누설전류가 발생하여, 공통 접지측(①)으로 2.221[A] 만큼 유입됨을 알 수 있다. 따라서, IGBT 스위칭 동작에 의한 누설전류가 전기설비 기술기준 제 13조에서 규정한 허용 기준치(1mA)를 크게 초과하게 되어, 인체 감전 및 화재 발생 가능성을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.



(a) 누설전류의 흐름도



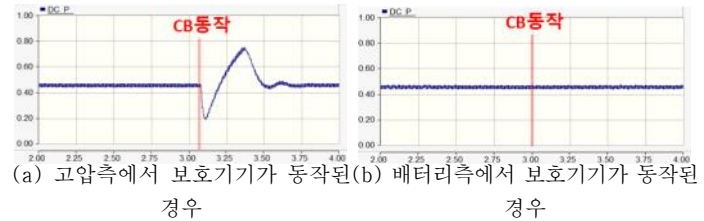
(b) 누설전류의 특성

[그림 10] 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 누설전류 운용특성

5.4 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 개폐서지 운용특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 5kV급 MVDC 마이크로그리드에서 보호기기의 차단동작에 의한 부하공급용 DC/DC 컨버터의 저압측 개폐서지의 운용특성을 나타내면 그림 11과 같다. 여기서, 부하공급용 DC/DC 컨버터의 고압측에서 보호기기가 동

작된 경우, LVDC 저압선로측에서 개폐서지가 정격전압(840[V]) 기준 53.8[%]정도 발생됨을 알 수 있다. 또한, ESS부의 배터리와 PCS 측 사이에서 보호기기가 동작된 경우, LVDC 저압선로측에서 개폐서지는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 따라서, 개폐서지는 전력변환기기의 입력단 측에서 보호기기의 차단동작이 수행될 경우, 일정한 크기로 발생하지만, 출력단 쪽의 DC 링크 커패시터에 의해 잔류전하가 점진적으로 소멸됨을 알 수 있다.



[그림 11] 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 개폐서지 운용특성

6. 결 론

본 논문에서는 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인으로 추정되는 CMV, 누설전류, 개폐서지 등의 발생 메커니즘을 설비의 구성과 운용특성을 바탕으로 제시하며, 실증단지를 바탕으로 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 5kV급 MVDC 마이크로그리드의 전기적 위해요인을 분석한 결과, CMV, 누설전류, 개폐서지, 등의 전기적 위해요인이 LVDC 배전망의 안전성에 부정적인 영향을 유발하여 인체 및 설비의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 김지명, 이후동, 한병길, 노대석, “5kV급 MV-LVDC 독립형 마이크로그리드의 보호협조 운용방안에 관한 연구”, 전기학회 논문지, 71(1), 45-54, 2022
- [2] 이민행, 이후동, 송일근, 최성문, 이나경, 노대석, “LVDC 배전 계통의 CMV 및 서지 운용특성에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, vol. 25, No. 9, pp. 491-503, 2024
- [3] 최성문, 유현상, 한병길, 김미영, 노대석, “CMV에 대한 ESS 안전성 평가에 관한 연구”, 한국산학기술학회 논문지, vol. 24, No. 5, pp. 635-646, 2023