

# 전기적 위해요인을 고려한 400V급 LVDC 배전망의 안전성 평가방안에 관한 연구

김윤호, 이민행, 김세진, 장형안, 노대석\*  
한국기술교육대학교  
e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

## A Safety Evaluation Method of 400V LVDC Distribution System Considering Electrical Hazard Factors

Yun-Ho Kim, Min-Haeng Lee, Se-Jin Kim,  
Hyeong-An Jang, Dae-Seok Rho\*  
Korea University of Technology and Education

### 요 약

최근, 전력변환 손실, 신재생에너지 전원 수용성 등의 문제점을 해결할 수 있는 LVDC 배전망에 대한 관심이 증가하고 있다. 하지만, LVDC 배전망을 안전하게 운용하기 위한 표준과 규정이 미흡한 실정이므로, 전기설비와 작업자에 악영향을 줄 수 있는 전기적 위해요인에 대한 평가가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망의 전기적 위해요인으로 분류되는 사고전류, 순환전류, 누설전류, 감전전류, 서지, CMV, 철공진의 발생 메커니즘을 제시하고, 전기적 위해요인의 심각도, 발생도, 검출도를 고려한 위험 우선순위 평가방안(risk priority number, RPN)을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC에 의하여 400V급 LVDC 배전망을 모델링을 수행한다. 상기의 평가방안 및 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인에 대한 LVDC 배전망의 안전성을 평가한 결과, 접지방식에 따른 감전전류, IGBT 스위칭에 의한 누설전류, 뇌격에 의한 서지가 높은 위험 순위로 선정되어, 전기설비와 작업자 안전에 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

## 1. 서 론

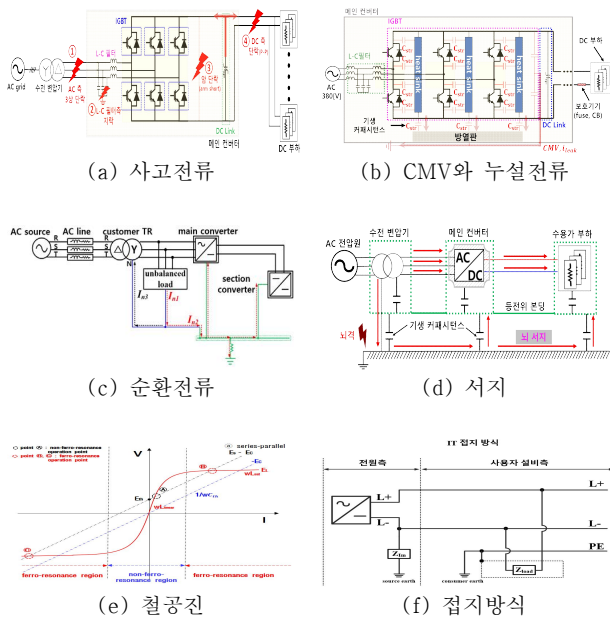
최근, DC 배전망은 전력손실 저감, 변환 효율성의 향상 등의 이유로 큰 주목을 받고 있다[1]. DC 배전망은 망전압에 따라 LVDC, MVDC, HVDC로 분류되는데, 이중 LVDC 배전망은 신재생에너지 전원과 ESS를 효과적으로 연계할 수 있을것으로 기대되고 있다. 이러한 이유로, LVDC 배전망의 해석, 제어방안 등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지만, LVDC 배전망의 전기적 위해요인으로 부터 안전하게 운용하기 위한 연구는 미흡한 실정이다[2]. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망의 안전성을 평가하기 위하여, 주요한 전기적 위해요인으로 평가되는 단락 및 지락 사고전류, 불평형 부하에 의한 순환전류, IGBT 스위칭 및 절연성능 열화에 의한 누설전류, 접지방식에 따른 감전전류, 뇌격 및 보호기기 개폐에 의한 서지, IGBT 스위칭에 의한 CMV, 변압기의 비선형회로에 의한 철공진의 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 심각도, 발생도, 검출도를 고려한 위험 우선순위(risk priority number, RPN) 평가방식을 제안한다. 여기서, 심각도는 전기적 위해요인의 이상전압 및 전류 크기, 발생도는 전기적 위해요인의 발생빈도, 검출도는 보호기기의 검출 가능성을 바탕

으로 선정한다. 또한, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 400V급 LVDC 배전망을 모델링하며, 이를 바탕으로 메커니즘에 의한 전기적 위해요인의 특성을 분석한다. 상기에서 제시한 전기적 위해요인에 대한 LVDC 배전망의 안전성 평가를 수행한 결과, 접지방식에 따른 감전전류, IGBT 스위칭에 의한 누설전류, 뇌격에 의한 서지가 높은 위험 순위로 평가되어, LVDC 전기설비와 작업자 안전에 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

## 2. LVDC 배전망의 전기적 위해요인 발생 메커니즘

LVDC 배전망의 전기적 위해요인은 그림 1과 같이, 사고전류, CMV, 누설전류, 순환전류, 서지, 철공진 등으로 제시되고 있다. 먼저, 사고전류는 그림 1의 (a)와 같이 AC 측 3상 단락과 LC 필터측 지락, 암 단락(arm short), DC 측 단락(P-P)에 의해 발생할 수 있으며, 전력변환기기의 커패시터 방전에 의해 큰 사고전류가 발생하여 LVDC 배전망에 악영향을 미칠 수 있다. 또한, CMV와 누설전류는 그림 1의 (b)와 같이, IGBT 스위칭 과정에서 IGBT 모듈과 방열판 사이에 형성되는 기생 커패시턴스에 의해

발생하며, LVDC 설비의 절연에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 한편, 순환전류는 그림 1의 (c)와 같이, 불평형 부하에 의해 발생하는데, 대부분의 전류가 변압기의 중성선을 통하여 순환하게 되지만, 일부 전류는 LVDC측의 메인컨버터와 구간컨버터의 외함으로 유입될 가능성이 있다. 그리고, 서지는 그림 1의 (d)와 같이, 뇌격과 보호기기 동작에 의해 발생할 수 있으며, 전기설비 외함의 기생 커패시턴스와 결합하여 이상전압을 유발한다. 또한, 철공진은 그림 1의 (e)와 같이, 차단기나 서지 등의 과전압이 발생할 경우, LVDC용 변압기의 비선형회로에 의해 나타나며, LVDC 설비의 손상을 유발한다. 그리고, 접지방식에 따른 감전전류는 그림 1의 (f)와 같이, TT, TN, IT 등의 접지의 구성에 따라 노출부와 외함에 의해 인체감전 현상이 발생하여 작업자 안전에 악영향을 미칠 가능성이 있다.



[그림 1] LVDC 배전망의 전기적 위해요인 발생 메커니즘

### 3. 전기적 위해요인을 고려한 LVDC 배전망의 안전성 평가방안

#### 3.1 심각도 평가방안

상기에서 제시한 LVDC 배전망의 전기적 위해요인을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 그림 2와 같이, RPN(risk priority number) 방식을 적용한다. 이 방식은 심각도(severity, S), 발생도(occurrence, O), 검출도(detection, D)를 고려하여 산정되는데, 심각도는 전기적 위해요인의 이상전압 및 전류 크기의 심각성, 발생도는 전기적 위해요인의 발생빈도, 검출도는 전기적 위해요인의 검출 가능성을 나타낸다.

| RPN            | RPN rating |     |        |      |           |
|----------------|------------|-----|--------|------|-----------|
| severity (S)   | very low   | low | medium | high | very high |
| occurrence (O) | very low   | low | medium | high | very high |
| detection (D)  | very low   | low | medium | high | very high |

[그림 2] RPN 위험 등급

먼저, 사고전류 심각도 위험등급은 사고전류의 크기에 따라 산정되며, 사고전류가 발생하지 않으면 “very low(1)”, 정격전류 정도이면 “low(2)”, 전력 반도체 소자 내력 이하이면 “medium(3)”, 차단기의 차단용량 이하이면 “high(4)”, 차단기의 차단용량 이상이면 “very high(5)”로 평가한다. 또한, 누설전류는 1[mA] 이하이면 “very low(1)”, 12.5[mA] 이하이면 “low(2)”, 30[mA] 이하이면 “medium(3)”, 100[mA] 이하이면 “high(4)”, 100[mA] 이상이면 “very high(5)”로 평가한다. 한편, 순환전류는 정격전류의 5[%] 이하이면 “very low(1)”, 10[%] 이하이면 “low(2)”, 20[%] 이하이면 “medium(3)”, 30[%] 이하이면 “high(4)”, 30[%] 이상이면 “very high(5)”로 평가한다. 그리고, 접지방식에 따른 감전전류는 2[mA] 이하이면 “very low(1)”, 9[mA] 이하이면 “low(2)”, 25[mA] 이하이면 “medium(3)”, 140[mA] 이하이면 “high(4)”, 140[mA] 이상이면 “very high(5)”로 평가한다. 또한, CMV, 서지, 철공진의 심각도는 위해요인이 발생하지 않으면 “very low(1)”, 정격전압 이하이면 “low(2)”, 절연내력 이하이면 “medium(3)”, 절연내력 이상이면 “high(4)”로 평가한다.

#### 3.2 발생도 평가방안

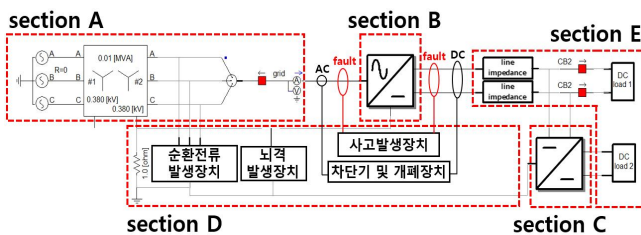
LVDC 배전망의 전기적 위해요인의 발생도는 발생 빈도를 바탕으로 5가지 단계로 산정한다. 여기서, 단락사고는 AC 망을 기준으로 통계적으로 발생률이 낮으므로 “very low(1)”, 지락사고는 AC 망을 기준으로 상대적으로 발생률이 높으므로 “low(2)”로 상정한다. 또한, 뇌격에 의한 서지는 뇌격 발생률이 낮으므로 “low(2)”, 보호기기 개폐에 의한 서지는 사고 발생률이 뇌의 발생 확률보다 높으므로 “medium(3)”으로 상정한다. 한편, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 전력변환 과정에서 지속적으로 발생하므로 “very high(5)”, IGBT 스위칭에 의한 누설전류도 동일한 이유로 very high(5)”, 절연내력 열화에 의한 누설전류는 오랜 기간에 걸쳐 일어나므로 “medium(3)”으로 평가한다. 또한, 부하 불평형에 의한 순환전류는 상시 발생 가능하므로 “high(4)”, 보호기기 개폐에 의한 철공진은 AC 망을 기준으로 상대적으로 발생률이 낮으므로 “very low(1)”, 접지방식에 의한 감전전류는 시설점검 시 작업자의 부주의로 발생하므로 “medium(3)”으로 평가한다.

### 3.3 검출도 평가방안

LVDC 배전망의 전기적 위해요인의 검출도는 5가지 단계로 산정한다. 여기서, 단락사고는 차단기의 동작을 통해 검출할 수 있으므로 “very low(1)”, 지락사고는 IMD(insulation monitoring device)를 바탕으로 검출할 수 있으므로 “very low(1)”로 상정한다. 또한, 뇌격에 의한 서지와 보호기기 개폐에 의한 서지는 SPD의 운용이력을 통해 검출하므로 “medium(3)”, CMV는 오실로스코프와 같은 계측장치를 이용하여 검출할 수 있으므로 “medium(3)”으로 상정한다. 한편, IGBT 스위칭과 절연 내력 열화에 의한 누설전류는 절연저항계 및 누설전류계를 통해 검출하므로 “high(4)”, 부하 불평형에 의한 순환전류는 전류 측정기를 통해 검출하므로 “high(4)”로 상정한다. 또한, 보호기기 개폐에 의한 철공진은 SPD의 운용이력을 통해 검출하므로 “medium(3)”, 접지방식에 의한 감전전류는 절연저항계 및 누설전류계를 통해 검출하므로 “high(4)”로 평가한다.

## 4. PSCAD/EMTDC에 의한 400V LVDC 배전망의 모델링

LVDC 배전망의 전기적 위해요인을 평가하기 위한 전체 시스템 모델링은 그림 3과 같다. 여기서, section A는 AC 전원부, section B는 메인 컨버터부, section C는 구간 컨버터부로 구성된다. 또한, section D는 사고발생 장치와 순환전류 발생장치, 뇌격 발생장치, 차단기 및 개폐장치로 구성된 전기적 위해요인 발생장치부이며, section E는 모의 부하장치를 나타낸다.



[그림 3] 400V급 LVDC 배전망의 모델링

## 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 5.1 시뮬레이션 조건

LVDC 배전망의 전기적 위해요인의 안전성 평가를 수행하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 변압기는 Y-Yg 결선방식이고, 12[kVA]의 용량을 가지며, 380[V]/380[V]의 변압비를 가진다. 또한, 메인 컨버터는 12[kW]의 용량을 가지고 3상 380[V]의 AC 전압을 400[V]의 DC 전압으로 변환하며, 기생 커패시턴스는 실증 사이트의 데이터를 바탕으로 0.15[nF], 1.5[nF]

으로 상정한다. 한편, 구간 컨버터는 5[kW]의 용량을 가지고 400[V]의 DC 전압을 200[V]의 DC 전압으로 변환한다. 그리고, 사고발생 장치는 0.1[Ω]의 단/지락 저항을 가지고, 순환전류 발생장치는 10[%], 30[%]의 부하 불평형률을 모의하며, 뇌격 발생장치는 50[kV]의 임펄스 전압을 인가한다. 또한, 절연성능 장치는 전기설비기술기준을 바탕으로 절연 저항을 0.1[MΩ], 100[MΩ]으로 상정하며, 차단기 및 개폐장치는 개방 저항을 1[MΩ], 투입 저항을 1[μΩ]으로 가정한다. 한편, 모의부하부는 1[kW], 10[kW]의 부하 용량을 가지고 1[Ω]의 선로 임피던스를 모의하며, 접지저항은 1[Ω], 30[Ω]으로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

| 항 목        | 내 역                                      |
|------------|------------------------------------------|
| 변압기        | 결선 방식                                    |
|            | 정격 용량[kVA]                               |
|            | 변압비[V]                                   |
| 메인 컨버터     | 정격 용량[kW]                                |
|            | 변압비[V <sub>AC</sub> ]/[V <sub>DC</sub> ] |
|            | 기생 커패시턴스[nF]                             |
| 구간 컨버터     | 정격 용량[kW]                                |
|            | 변압비[V <sub>DC</sub> ]/[V <sub>DC</sub> ] |
| 사고발생 장치    | 단/지락 저항[Ω]                               |
| 순환전류 발생장치  | 부하 불평형률[%]                               |
| 뇌격 발생장치    | 임펄스 전압[kV]                               |
| 절연성능 장치    | 절연 저항[MΩ]                                |
| 차단기 및 개폐장치 | 개방 저항[MΩ]                                |
|            | 투입 저항[μΩ]                                |
|            | 부하 용량[kW]                                |
| 모의 부하부     | 선로 저항[Ω]                                 |
|            | 접지 저항[Ω]                                 |

### 5.2 전기적 위해요인에 대한 LVDC 배전망의 안전성 평가

상기에서 제시한 LVDC 배전망의 안전성 평가 방안에 따라 사고전류, 서지, CMV, 누설전류, 순환전류, 철공진, 접지방식에 대한 RPN 평가 점수를 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 단락사고는 심각도가 4점으로 매우 높지만, 발생도와 검출도가 1점으로 상정되어, RPN 점수가 4~5점으로 낮게 산정되며, 지락사고는 사고전류가 발생하지 않아, RPN 점수가 2~4점으로 낮게 평가된다. 또한, AC 및 DC측 보호기기 동작에 의한 서지는 18점의 RPN 점수로 비교적 낮은 위험도를 갖지만, 뇌격에 의한 서지는 30점의 RPN 점수로 크게 산정되므로, LVDC 배전망에서 SPD 등과 같은 서지 보호기기를 적절히 구비해야 함을 알 수 있다. 한편, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 심각도가 1점으로 매우 낮지만, 발생도와 검출도가 각각 5점, 3점으로 상정되어, RPN 점수가 15점으로 산정되며 비교적 낮은 위험도를 가진다.

또한, 절연성능 열화에 의한 누설전류는 24점의 RPN 점수로 낮은 위험도를 갖지만, IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 기생 커패시턴스에 의해

패시턴스와 스위칭 주파수에 따라 최대 60점까지 상승할 수 있으므로, LVDC 배전망에서 기생 커패시턴스와 절연성능을 적절히 관리해야 함을 알 수 있다. 한편, 불평형 부하에 의한 순환전류는 불평형 부하율과 접지저항에 따라 최대 48점까지 상승할 수 있으며, 보호기기 개폐에 의한 철공진은 필터 커패시터, 불평형 부하율, 접지전위 상승률에 따라 최대 12점까지 상승하므로, 망 조건에 대한 면밀한 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다. 그리고, 접지방식에 따른 감전전류는 노출부 감전사고의 경우, 60점으로 가장 높은 위험도를 갖는 것을 알 수 있으며, 외함 감전 사고의 경우, TN-S 접지방식이 36점, TT 접지방식이 24점, IT 접지방식이 12점이므로, IT 접지방식이 상대적으로 낮은 위험도를 갖는 것을 알 수 있다.

[표 2] RPN 평가방식에 의한 전기적 위험요인의 안전성 평가

| 위험요인 | 세부 요인      | 파라미터 조건                                               | S | O | D | RPN |
|------|------------|-------------------------------------------------------|---|---|---|-----|
| 접지방식 | TN-S 방식    | 노출부 감전사고                                              | 5 | 3 | 4 | 60  |
| 접지방식 | TT 방식      | 노출부 감전사고                                              | 5 | 3 | 4 | 60  |
| 접지방식 | IT방식       | 노출부 감전사고                                              | 5 | 3 | 4 | 60  |
| 누설전류 | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 1.5[nF],<br>스위칭 주파수: 8.0[kHz]              | 3 | 5 | 4 | 60  |
| 누설전류 | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 1.5[nF],<br>스위칭 주파수: 3.6[kW]               | 3 | 5 | 4 | 60  |
| 순환전류 | 불평형 부하에 의한 | 불평형 부하율 : 30[%],<br>접지저항 : 1[Ω]                       | 3 | 4 | 4 | 48  |
| 누설전류 | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>스위칭 주파수: 8.0[kHz]             | 2 | 5 | 4 | 40  |
| 누설전류 | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>스위칭 주파수: 3.6[kW]              | 2 | 5 | 4 | 40  |
| 접지방식 | TN-S 방식    | 외함 감전사고                                               | 3 | 3 | 4 | 36  |
| 순환전류 | 불평형 부하에 의한 | 불평형 부하율 : 30[%],<br>접지저항 : 30[Ω]                      | 2 | 4 | 4 | 32  |
| 순환전류 | 불평형 부하에 의한 | 불평형 부하율 : 10[%],<br>접지저항 : 1[Ω]                       | 2 | 4 | 4 | 32  |
| 순환전류 | 불평형 부하     | 불평형 부하율 : 10[%],<br>접지저항 : 30[Ω]                      | 2 | 4 | 4 | 32  |
| 서지   | 뇌격에 의한     | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 10[kW]                | 5 | 2 | 3 | 30  |
| 서지   | 뇌격에 의한     | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 1[kW]                 | 5 | 2 | 3 | 30  |
| 접지방식 | TT 방식      | 외함 감전사고                                               | 2 | 3 | 4 | 24  |
| 누설전류 | 절연내력 열화    | 절연 저항 : 0.1[MΩ]                                       | 2 | 3 | 4 | 24  |
| 서지   | DC측 개폐     | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 10[kW]                | 2 | 3 | 3 | 18  |
| 서지   | DC측 개폐     | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 1[kW]                 | 2 | 3 | 3 | 18  |
| 서지   | AC측 개폐     | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 10[kW]                | 2 | 3 | 3 | 18  |
| 서지   | AC측 개폐     | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 1[kW]                 | 2 | 3 | 3 | 18  |
| CMV  | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 1.5[nF],<br>부하 크기 : 10[kW]                 | 1 | 5 | 3 | 15  |
| CMV  | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 1.5[nF],<br>부하 크기 : 1[kW]                  | 1 | 5 | 3 | 15  |
| CMV  | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 10[kW]                | 1 | 5 | 3 | 15  |
| CMV  | IGBT 스위칭   | 기생 커패시턴스 : 0.15[nF],<br>부하 크기 : 1[kW]                 | 1 | 5 | 3 | 15  |
| 철공진  | 보호기기 개폐    | 필터 커패시터 : 100[uF],<br>불평형 부하율 : 30[%],<br>접지전위 : 5[%] | 4 | 1 | 3 | 12  |
| 누설전류 | 절연내력 열화    | 절연 저항 : 100[MΩ]                                       | 1 | 3 | 4 | 12  |
| 접지방식 | IT 방식      | 외함 감전사고                                               | 1 | 3 | 4 | 12  |
| 철공진  | 보호기기 개폐    | 필터 커패시터 : 100[uF],<br>불평형 부하율 : 10[%],<br>접지전위 : 5[%] | 3 | 1 | 3 | 9   |
| 철공진  | 보호기기 개폐    | 필터 커패시터 : 100[uF],                                    | 2 | 1 | 3 | 6   |

|      |         |                                                       |   |   |   |   |
|------|---------|-------------------------------------------------------|---|---|---|---|
|      |         | 불평형 부하율 : 10[%],<br>접지전위 : 1[%]                       |   |   |   |   |
| 철공진  | 보호기기 개폐 | 필터 커패시터 : 260[uF],<br>불평형 부하율 : 30[%],<br>접지전위 : 5[%] | 2 | 1 | 3 | 6 |
| 철공진  | 보호기기 개폐 | 필터 커패시터 : 260[uF],<br>불평형 부하율 : 10[%],<br>접지전위 : 5[%] | 2 | 1 | 3 | 6 |
| 사고전류 | 단락사고    | 400[V] DC 전로                                          | 4 | 1 | 1 | 4 |
| 사고전류 | 단락사고    | 200[V] DC 전로                                          | 4 | 1 | 1 | 4 |
| 사고전류 | 지락사고    | 400[V] DC 전로                                          | 2 | 2 | 1 | 4 |
| 철공진  | 보호기기 개폐 | 필터 커패시터 : 260[uF],<br>불평형 부하율 : 10[%],<br>접지전위 : 1[%] | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 사고전류 | 지락사고    | 200[V] DC 전로                                          | 1 | 2 | 1 | 2 |

## 6. 결 론

본 논문에서는 LVDC 배전망의 주요한 전기적 위험요인으로 제시되는 사고전류, 순환전류, 누설전류, 감전전류, 서지, CMV, 철공진에 대한 발생 메커니즘을 제안하고, RPN 방식을 적용한 안전성 평가방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 400V급 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 전기적 위험요인에 대한 LVDC 배전망의 안전성 평가를 수행한 결과, 접지방식에 따른 감전전류가 60점으로 가장 높은 위험 순위로 평가되어 DC 설비 작업자 안전에 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 이후동 외 4명, “±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 보호협조 운용방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 제 24권 3호, pp. 533-542, 3월, 2023년.
- [2] 임승택 외 5명, “IT접지 저압직류배전 수용가에서의 인체감전 영향 및 접지 임피던스 선정에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, 제 70권 2호, pp.432-438, 2월, 2021년.