

# 전기적 위해요인을 고려한 LVDC 배전계통의 안전성 평가 방안에 관한 연구

김경화\*, 김윤호\*, 이민행\*, 김세진\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교

e-mail:kyunghwa316@koreatech.ac.kr

## A Study on the Safety Evaluation Method in LVDC Distribution System Considering Electrical Hazard Factors

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

\*Korea University of Technology and Education

### 요약

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 요구 등으로 DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 하지만, DC 배전계통은 전기설비 기술기준과 안전운용 절차 등이 미흡하여, DC 배전망의 전기적 위해요인과 이에 따른 안전성 평가에 대한 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 누설전류, 순환전류, CMV, 서지 등에 대한 안전성 평가방안을 제안한다. 구체적으로, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험우선순위(RPN, risk priority number)를 바탕으로, 다양한 전기적 위해요인의 발생원인에 따른 안전성 평가 방안을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 누설 및 순환전류, CMV 및 서지로 구성된 LVDC 배전계통의 전기적 위해요인 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 평가 방안 및 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인에 따른 LVDC 배전계통의 안전성 평가를 수행한 결과, 불평형부하에 의한 순환전류가 LVDC 배전계통의 안전성에 가장 큰 영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.

및 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인에 따른 LVDC 배전계통의 안전성 평가를 수행한 결과, 불평형부하에 의한 순환전류가 LVDC 배전계통의 안전성에 영향을 줄 가능성이 가장 높음을 알 수 있다.

### 1. 서론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 요구 등으로, DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 하지만, DC 배전계통은 전기설비 기술기준과 안전운용 절차 등이 미흡하여, DC 배전망의 위해요인과 이에 따른 안전성평가에 대한 연구가 필요한 실정이다 [1-3]. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 누설 및 순환전류와 CMV 및 서지에 대한 안전성 평가방안을 제시한다. 구체적으로, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험우선순위(RPN, risk priority number)를 바탕으로, 다양한 전기적 위해요인의 발생원인에 의한 안전성 평가 방안을 제시한다. 여기서, 심각도는 누설 및 순환전류와 CMV 및 서지의 크기에 따라 가중치를 다양하게 적용하며, 발생도는 전기적 위해요인의 발생빈도를 고려하여 평가한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 누설 및 순환전류 발생장치부, CMV 및 서지 발생장치부로 구성된 LVDC 배전계통의 전기적 위해요인 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 평가 방안

### 2. 전기적 위해요인을 고려한 LVDC 배전계통의 안전성 평가 방안

#### 2.1 누설 및 순환전류에 대한 안전성 평가 방안

누설전류 및 순환전류의 심각도는 배터리측으로 유입되는 누설 및 순환전류의 크기에 따라 평가한다. 여기서, 심각도는 표 1과 같이 IEC 60479 및 한국전기설비규정을 바탕으로 누설 및 순환전류의 크기에 따라 높은 가중치를 적용하여 위험 등급을 “low”, “medium”, “high”, “very high”의 4가지로 분류한다. 즉, 누설전류의 크기가 한국전기설비규정값(1[mA]) 이하이면 “low”로 평가하고, 1[mA]보다 크고 이탈한계 전류(9[mA])보다 작으면 “medium”으로, 9[mA]보다 크고 심실세동 전류(60[mA])보다 작으면 “high”로, 60[mA]보다 크면 “very high”로 평가한다.

[표 1] 누설 및 순환전류 심각도 평가 방안

항 목	내 역
1[mA] 미만	low(1)
1[mA] 이상 9[mA] 미만	medium(2)
9[mA] 이상 60[mA] 미만	high(3)
60[mA] 이상	very high(4)

또한, 누설 및 순환전류의 발생도는 표 2와 같이 누설 및 순환전류의 발생빈도를 바탕으로 평가하며, IGBT 스위칭 및 배터리 기생 커패시턴스에 대한 발생도는 컨버터의 동작 시에 발생하므로 “medium”, 절연성능 저하에 대한 발생도는 오랜 기간에 걸쳐 일어나므로 “low”, 불평형부하에 대한 발생도는 상시 존재하므로 “high”로 분류한다. 한편, 검출도(D)는 LVDC 배전계통에서 발생하는 누설 및 순환전류의 측정 가능성을 바탕으로 평가되지만, 대부분 IMD에 의하여 검출되므로 IGBT의 기생커패시턴스, 배터리의 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능, 불평형부하에 대한 검출도를 일정 값으로 분류한다.

[표 2] 누설 및 순환전류 발생도 평가 방안

발생 메커니즘	평가 기준	내 역
절연성능 저하에 의한 누설전류	오랜기간에 걸쳐 발생	low(1)
IGBT 스위칭에 의한 누설전류	컨버터 동작시 상시 발생	medium(2)
부하 불평형에 의한 순환전류	불평형 부하시 상시 발생	high(3)

## 2.2 CMV 및 서지에 대한 안전성 평가방안

CMV 및 서지의 심각도는 표 3과 같이, 크기에 따라 4가지 단계로 산정되며, 크기가 증가할수록 높은 위험등급을 적용한다. 즉, 전압의 크기가 메인컨버터의 정격전압 이하인 경우에 위험등급을 “low”로 평가하고, 전압의 크기가 정격전압 이상이고 절연내력 이하인 경우에는 “medium”, 절연내력을 초과하는 경우에는 “high”, 절연내력을 수배 초과하는 경우에는 “very high”로 평가한다.

[표 3] CMV 및 서지 발생도 평가 방안

항 목	내 역
정격전압 이내	low(1)
정격전압 초과 절연내력 미만	medium(2)
절연내력 초과	high(3)
절연내력 수배 초과	very high(4)

또한, CMV 및 서지의 발생도 위험등급은 3가지 단계를 적용한다. 여기서, IGBT 스위칭은 LVDC 배전계통에 전원이 공급됨에 따라 일반적으로 발생하므로 위험등급을 “high”로 평가하며, 차단기 개폐와 뇌격에 의한 CMV는 각각 “medium”과 “low”로 평가한다. 마지막으로 검출도는 CMV

및 서지의 잠재적 발견 가능성을 나타내는데, LVDC 배전계통에 설치된 보호기기의 한계로 인하여 일정한 값으로 분류한다.

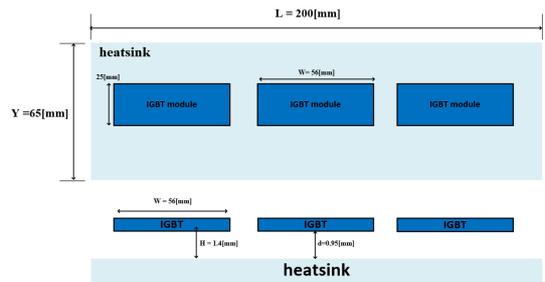
[표 4] CMV 및 서지 발생도 평가 방안

발생 메커니즘	평가 기준	내 역
뇌격에 의한 서지	뇌격의 발생률은 매우 낮음	low(1)
AC 측 보호기기 동작에 의한 서지	DC 배전계통에서의 사고 발생률	medium(2)
DC 측 보호기기 동작에 의한 서지		
IGBT 스위칭에 의한 CMV	상시 동작	high(3)

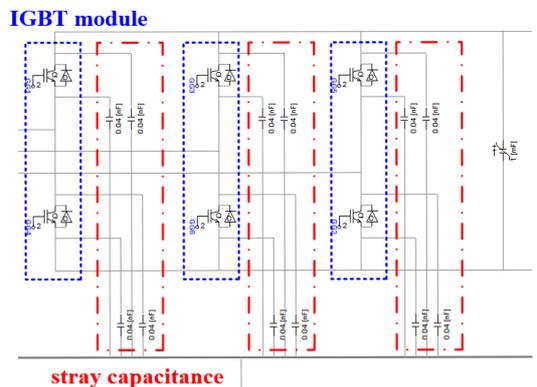
## 3. PSCAD/EMTDC에 의한 LVDC 배전계통의 전기적 위해요인 모델링

### 3.1 누설 및 순환전류 특성 모델링

IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 전력변환기의 기생 커패시턴스와 스위칭 주파수에 의해 발생한다. 먼저, 메인컨버터의 IGBT 스위칭에 의한 누설전류 모델링은 그림 1과 같이 나타낼 수 있는데, 그림 1 (a)는 IGBT 모듈과 방열판의 구성이고, 그림 1 (b)는 메인컨버터의 기생 커패시턴스를 나타낸다.



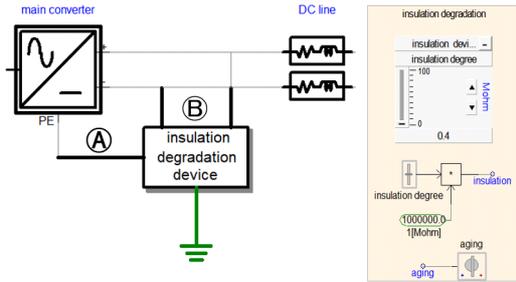
(a) IGBT 모듈과 방열판의 구성



(b) 메인컨버터의 기생커패시턴스

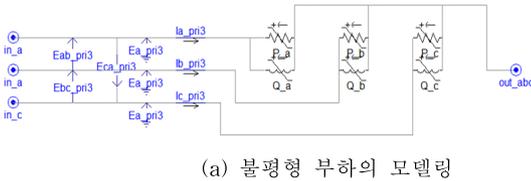
[그림 1] IGBT 스위칭에 의한 누설전류 모델링

한편, 절연성능 열화에 의한 누설전류는 전기설비와 DC 선로의 절연성능 저하에 의해 발생하며, 이를 모의하기 위한 누설전류 발생장치는 그림 2와 같다. 이 장치는 그림 2의 ㉠부분과 같이, 전기설비의 절연성능 저하에 의해 누설전류가 발생한 것을 모의하며, ㉡부분과 같이 DC 선로의 열화와 접속 불량으로 인한 누설전류를 상정한다.

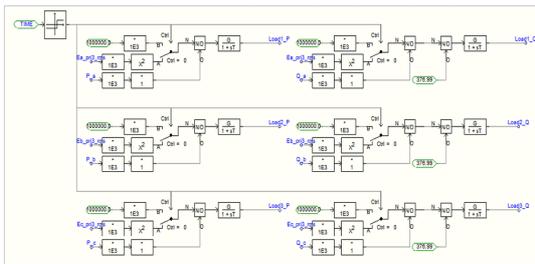


[그림 2] 절연성능 열화에 의한 누설전류 모델링

또한, 순환전류는 불평형 부하에 의해 발생하며, 이를 모의하기 위한 순환전류 발생장치는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3(a)는 AC 불평형 부하의 모델링이며, 그림 3 (b)는 3상에 대한 정전력 부하를 나타낸다.



(a) 불평형 부하의 모델링



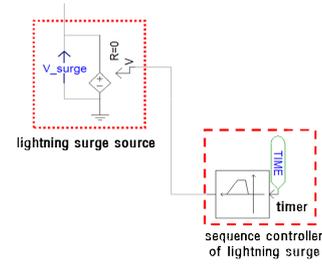
(b) 정전력 부하의 모델링

[그림 3] 불평형 부하에 의한 순환전류 모델링

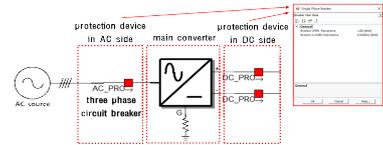
### 3.2 CMV 및 서지 특성 모델링

CMV 및 서지에 대한 안전성을 평가하기 위한 뇌격 발생장치부는 그림 4와 같이 뇌서지 발생장치와 뇌서지 시퀀스 제어기로 구성된다. 여기서, 뇌서지 발생장치는 PSCAD/EMTDC의 라이브러리에서 제공하는 lightning strike generator를 바탕으로 가변 전압원을 이용하여 모델링을 수행하며, 시퀀스 제어기의 지령에 따라 뇌서지를 발생시킨다. 한편, AC 및 DC측 보호기기의 차단 동작에 의한 서지의 운용 특성을 평가하기 위하여, 보호기기 동작 장치부를 모델링하

면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 차단기 개방 및 투입 저항은 각각  $1[M\Omega]$ ,  $1[\mu\Omega]$ 으로 상정한다.



[그림 4] 뇌격발생장치부 모델링



[그림 5] AC측 및 DC측 보호기기 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

전기적 위해요인에 따른 상정 시나리오는 표 5 ~ 표 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 표 5는 누설전류 상정 시나리오를 나타내는데, 기생커패시턴스와 절연저항에 따라 case 1 ~ case 4로 분류한다. 또한, 표 6은 순환전류 상정 시나리오를 나타내며, 부하 불평형률과 접지저항 값에 따라 case 5 ~ case 8로 상정한다.

[표 5] 누설전류 상정 시나리오

case	기생커패시턴스 [nF]	절연저항 [M Ω]
1	0.15	100
2	1.5	100
3	0.15	100
4	0.15	0.1

[표 6] 순환전류 상정 시나리오

case	부하 불평형률 [%]	접지저항 [Ω]
5	10	1
6	10	30
7	30	1
8	30	30

한편, 표 7은 CMV 상정 시나리오를 나타내고, 기생커패시턴스와 부하용량별로 case 9 ~ case 12로 나누어 상정한다. 또한, 표 8은 서지 상정 시나리오를 나타내는데, AC측 보호기기 동작, DC 측 보호기기 동작, 뇌서지 발생 등에 의한 메커니즘별로 case 13 ~ case 18로 나누어 나타낸다.

[표 7] CMV 상정 시나리오

case	기생 커패시턴스 [nF]	부하용량 [kW]
9	0.15	1
10	0.15	10
11	1.5	1
12	1.5	10

[표 8] 서지발생 상정 시나리오

발생 메커니즘	case	기생 커패시턴스 [nF]	부하용량 [kW]
AC 측 보호기기 동작	13	0.15	1
	14	0.15	10
DC 측 보호기기 동작	15	0.15	1
	16	0.15	10
뇌서지	17	0.15	1
	18	0.15	10

#### 4.2 LVDC 배전계통의 안전성 평가

상기에서 제안한 안전성 평가 방안 및 모델링에 따라 사고, 순환전류, 누설전류, CMV, 서지의 전기적 위해요인에 대한 RPN 평가 점수를 나타내면 표 7과 같다. 여기서, 불평형 부하에 의한 순환전류가 18점, 24점으로 가장 높은 위험도를 갖는 것으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 누설전류는 일반적으로 낮은 점수를 갖지만, 기생커패시턴스와 절연성능 저하에 따라 12점까지 상승할 수 있으므로, LVDC 배전계통에서 기생커패시턴스와 절연성능을 적절히 관리해야함을 알 수 있다. 한편, AC 측 보호기기 동작에 의한 서지는 RPN 평가 결과 4점으로, 비교적 낮은 위험도를 갖는 것을 알 수 있다. 또한, DC 측 보호기기에 의한 서지와 뇌격에 의한 서지는 상대적으로 RPN 점수가 산정되므로, LVDC 배전계통에서 SPD 등과 같은 서지 보호기기를 적절히 구비해야함을 알 수 있다.

[표 7] 전기적 위해요인별 RPN 산정결과

case	심각도	발생도	검출도	RPN
1	2	2	2	8
2	3	2	2	12
3	1	1	2	2
4	2	1	2	4
5	3	3	2	18
6	4	3	2	24
7	4	3	2	24
8	4	3	2	24
9	1	3	2	6
10	1	3	2	6
11	1	3	2	6
12	1	3	2	6
13	1	2	2	4
14	1	2	2	4
15	1	2	2	4
16	2	2	2	8
17	4	1	2	8
18	4	1	2	8

## 5. 결 론

본 논문에서는 LVDC 배전계통의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 누설 및 순환전류와 CMV 및 서지에 대한 안전성 평가방안을 제시한다. 구체적으로, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험우선순위를 바탕으로, 다양한 전기적 위해요인의 발생원인에 의한 안전성 평가 방안을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 누설 및 순환전류 특성 모델링, CMV 및 서지 특성으로 구성된 LVDC 배전계통의 전기적 위해요인 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 평가 방안 및 모델링을 바탕으로 전기적 위해요인에 따른 LVDC 배전계통의 안전성 평가를 수행한 결과, 불평형부하에 의한 순환전류가 LVDC 배전계통의 안전성에 영향을 줄 가능성이 가장 높음을 알 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Hun Lee, Will the use of renewable energy in the enterprise expand : 185 companies worldwide including Google GM Apple\_Government, October Green Support for joining RE100, including the introduction of a new system, Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 25-28, 2019.8.
- [2] S. Y. Lim, S. Y Park, S. H. Yoo, "The Economic Effects of the New and Renewable Energies Sector", Journal of Energy Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 31-40, 2014.12.
- [3] S. J. Park, S. M. Park, J. H. Lee, ESS utilization and related PCS technology, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 12-18, 2017.1.
- [4] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, vol. 32, no. 6, pp. 91-99, 2018.12.