

RPN 방식에 의한 LVDC 배전망의 안전성 평가방안에 관한 연구

김윤호*, 김세진*, 이진호*, 정재범*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

A Safety Evaluation Method in LVDC Distribution System using Risk Priority Number

Yun-Ho Kim*, Se-Jin Kim*, Jin-Ho Lee*, Jae-Beom Jung*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, 신재생에너지의 수용성 향상, 전력변환 손실 저감 등을 위하여, LVDC 배전망에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, LVDC 배전망을 적절하게 관리하기 위한 기술 표준과 규정이 미흡한 실정이며, LVDC 배전망을 운용하는 과정에서 발생할 수 있는 다양한 전기적 위해요인에 대한 안전성 평가가 요구되고 있다. 특히, LVDC 배전망의 사고전류와 아크는 전기설비에 큰 소손을 발생시키고, 순환전류와 누설전류는 컨버터 외함에 지속적으로 유입되어 감전을 유발시킬 수 있다. 또한, CMV, 서지, 철공진은 이상전압의 형태로 계통에 유입되어 설비의 소손 및 절연파괴를 발생시키고, 감전전류는 접지방식에 따라 인체에 심각한 악영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망의 전기적 위해요인을 사고전류, 아크, 순환전류, 누설전류, CMV, 서지, 철공진, 감전전류 등으로 분류하고, RPN(risk priority number) 방식에 의한 LVDC 배전망의 전기적 위해요인 안전성 평가방안을 제시한다. 또한, 전기적 위해요인의 운용특성을 분석하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC에 의하여 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 장기에서 제시한 평가방안과 모델링을 바탕으로 LVDC 배전망의 안전성을 평가한 결과, 감전전류와 아크, 누설전류가 높은 위험 순위로 산정되어, 인체 및 설비에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

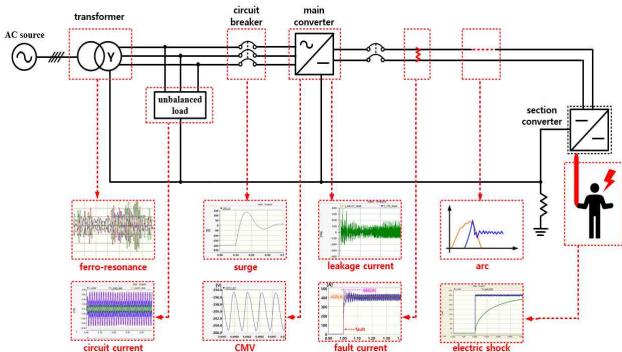
최근, 신재생에너지의 수용성 향상, 전력변환 손실 저감 등을 위하여, LVDC 배전망에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, LVDC 배전망을 적절하게 관리하기 위한 표준과 규정이 미흡한 실정이며, LVDC 배전망을 운용하는 과정에서 발생할 수 있는 다양한 전기적 위해요인에 대한 안전성 평가가 요구되고 있다. 특히, LVDC 배전망의 사고전류와 아크는 설비에 큰 소손을 발생시키고, 순환전류와 누설전류는 지속적으로 컨버터 외함의 유입되며, 감전전류는 접지방식에 따라 인체에 심각한 악영향을 미칠 수 있다. 또한, CMV, 서지, 철공진은 이상전압의 형태로 계통에 유입되어 설비의 소손 및 절연파괴를 발생시킬 가능성이 높다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망의 전기적 위해요인으로 분류되는 사고전류, 누설전류, 순환전류, 아크, 서지, CMV 등의 위험성을 분석하기 위하여, RPN 방식을 이용한 안전성 평가방안을 제안한다. 여기서, RPN 방식은 심각도, 발생도, 검출도로 구성되는데, 심각도는 작업자 피해 및 설비 손실 가능성과 전기적 위해요인의 이상 전압 및 전류의 크기를 고려하고, 발생도는 전

기적 위해요인의 발생 빈도, 검출도는 검출 가능성을 바탕으로 산정한다. 또한, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 사고전류, 누설전류, 순환전류, 아크, 서지, CMV, 감전전류 등의 LVDC 배전망의 전기적 위해요인 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 전기적 위해요인에 대한 LVDC 배전망의 안전성을 평가한 결과, 아크, IGBT 스위칭에 의한 누설전류, 불평형 부하에 의한 순환전류가 높은 위험 순위로 산정되어, 전기설비와 작업자 안전에 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

2. LVDC 배전망의 전기적 위해요인 분류

LVDC 배전망의 전기적 위해요인은 그림 1과 같이, 사고전류, 순환전류, 누설전류, CMV, 서지, 철공진, 감전전류, 아크 등으로 분류된다. 먼저, 사고전류는 AC측 3상 단락과 LC 필터측 지락, 암 단락, DC측 단락에 의해 발생하여 LVDC 설비에 소손을 발생시키며, 순환전류는 불평형 부하에 의해 발생하여 컨버터의 외함으로 유입될 가능성이 있다. 또한, 누설전류와 CMV는 IGBT 모

둘과 방열판 사이에 형성되는 기생 커패시턴스에 의해 발생하여 인체 및 설비에 악영향을 미칠 수 있다. 한편, 서지는 뇌격과 보호기기 동작에 의해 발생하고, 철공진은 LVDC 변압기의 비선형 회로에 의해 발생하는데, 이상전압에 의한 LVDC 설비의 손상을 유발할 수 있다. 그리고, 접지방식에 따른 감전전류는 노출부와 외함 접촉에 의해 발생하여 인체에 심각한 악영향을 미치며, 아크는 접촉불량, 외부충격 등에 의해 발생하며, 과열에 의한 전기화재와 작업자의 화상을 유발하여 LVDC 배전망에 심각한 악영향을 미칠 수 있다.



[그림 1] LVDC 배전망의 전기적 위험요인 분류

3. RPN 방식을 고려한 LVDC 배전망의 안전성 평가 방안

본 연구에서는 다양한 전기적 위험요인에 대한 LVDC 배전망의 안전성을 평가하기 위해 그림 2와 같이, 심각도(severity), 발생도(occurrence), 검출도(detection)를 정량화하여 위험성을 분석하는 RPN 방식을 적용한다. 여기서, 심각도는 위험요인이 시스템에 미치는 심각성으로 이상전압 및 전류의 크기와 작업자 피해 및 설비 손실가능성을 의미하고, 발생도는 위험요인의 발생빈도, 검출도는 위험요인의 발견 가능성을 나타낸다.

RPN		RPN rating				
severity 1 (S ₁)	very low (1)	low (2)	medium (3)	high (4)	very high (5)	
severity 2 (S ₂)	very low (1)	low (2)	medium (3)	high (4)	very high (5)	
occurrence (O)	very low (1)	low (2)	medium (3)	high (4)	very high (5)	
detection (D)	very low (1)	low (2)	medium (3)	high (4)	very high (5)	

[그림 2] RPN 평가 개념도

3.1 심각도 요소

심각도는 위험요인의 이상전압 및 전류의 크기와 작업자 피해 및 설비 손실가능성을 바탕으로 산정된다. 먼저, 사고전류의 경

우, 사고전류가 발생하지 않으면 “very low(1)”, 정격전류 정도 이면 “low(2)”, 전력 반도체 소자 내력 이하이면 “medium(3)”, 차단기의 차단용량 이하이면 “high(4)”, 차단기의 차단용량 이상 이면 “very high(5)”로 평가한다. 또한, 순환전류는 계통에서 허용되는 일반적인 불평형 조건인 15[%]와 내선규정인 30[%]를 바탕으로 상정한다. 한편, 누설전류는 전기설비 기술기준의 판단기준 제 13조, 전기설비 기술기준 제 27조, 산업안전보건법 제 304조, IEC 60479의 심실제동 전류를 바탕으로 상정한다. 또한, CMV, 서지, 철공진은 정격전압, 절연내력을 바탕으로 4가지로 분류하여 평가하고, 접지방식에 따른 감전전류는 IEC 60479의 감전전류 곡선, 아크는 IEC 63027을 바탕으로 아크 에너지와 검출시간을 바탕으로 상정한다.

한편, 작업자 피해 및 설비 손실가능성은 전기적 위험요인별로 분류하여 평가한다. 여기서, 사고전류의 경우, 인명피해가 발생할 수 있고, 사고로 인한 전력변환기기 및 선로손상에 의한 재산 피해 발생 가능성이 매우 높으므로 “very high(5)”로 평가하고, 순환전류는 불평형 부하에 의해 지속적으로 발생하여 변압기 등의 기기에 소손을 발생시킬 수 있으며, 일부 순환전류가 기기의 외함으로 흘러 감전될 가능성이 있으므로 “medium(3)”으로 평가한다. 또한, 누설전류는 주변 환경에 따라 설비의 화재로 이어질 가능성이 있고, 전기기기에 접촉되어 인체를 통해 전류가 흘러 감전될 가능성이 있으므로 “medium(3)”으로 상정하고, CMV는 전력변환 과정에서 지속적으로 발생하여 설비의 절연을 악화시킬 가능성이 있지만, 인체에 영향을 줄 가능성이 매우 낮으므로 “very low(1)”로 평가한다. 한편, 서지는 설비의 대지 접촉부분과 인체의 대지 접촉 사이의 전위차에 의해 인체에 영향을 줄 가능성이 높고, 매우 큰 이상전압에 의해 설비의 소손 및 절연파괴를 발생시킬 가능성이 높으므로 “high(4)”로 상정하고, 철공진은 과도전압에 의한 변압기 소손 및 절연파괴 발생 가능성이 있지만, 인체에 영향을 줄 가능성이 낮기 때문에 “low(2)”로 상정한다. 그리고, 접지방식에 의한 감전전류는 작업자 부주의로 충전부와 접촉할 경우, 인명피해의 가능성이 매우 높으므로 “very high(5)”로 평가한다. 마지막으로, 아크는 전기화재의 주된 원인이고, 작업자의 화상 및 생명에 심각한 지장을 초래하므로 “very high(5)”로 평가한다.

3.2 발생도 요소

LVDC 배전망의 전기적 위험요인의 발생도는 발생 빈도를 바탕으로 평가한다. 여기서, 단락사고는 AC 망을 기준으로 통계적으로 발생률이 낮으므로 “very low(1)”, 지락사고는 AC 망을 기준으로 상대적으로 발생률이 높으므로 “low(2)”로 상정하고, 부하 불평형에 의한 순환전류는 상시 발생 가능하므로 “high(4)”로 평가한다. 또한, IGBT 스위칭에 의한 누설전류와 CMV는 전력

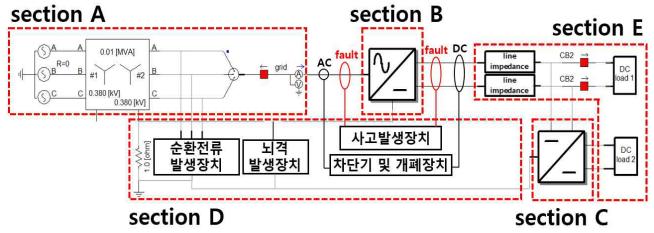
변환 과정에서 지속적으로 발생하므로 “very high(5)”로 상정하고, 절연내력 열화에 의한 누설전류는 오랜 기간에 걸쳐 일어나므로 “medium(3)”으로 평가한다. 한편, 보호기기 개폐에 의한 서지는 사고 발생률이 뇌의 발생 확률보다 높으므로 “medium(3)”으로 상정하고, 뇌격에 의한 서지는 뇌격 발생률이 낮으므로 “low(2)”로 평가한다. 그리고, 비선형 회로에 의한 철공진은 AC 망을 기준으로 상대적으로 발생률이 낮으므로 “very low(1)”로 상정하고, 접지방식에 의한 감전전류는 시설점검 시 작업자의 부주의로 발생하므로 “medium(3)”으로 평가한다. 한편, 아크는 모선의 접촉 불량, 트래킹, 절연파괴, 과전류, 지락사고, 작업자의 실수 등에 의해 빈번하게 발생하므로 “high(4)”로 상정한다.

3.3 검출도 요소

LVDC 배전망의 전기적 위해요인의 검출도는 검출가능성을 바탕으로 평가한다. 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, 부하 불평형에 의한 순환전류는 전류 측정기를 통해 검출하므로 “high(4)”로 상정하고, IGBT 스위칭과 절연내력 열화에 의한 누설전류는 절연저항계 및 누설전류계를 통해 검출하므로 “high(4)”로 평가한다. 한편, CMV는 오실로스코프와 같은 계측장치를 이용하여 검출할 수 있으므로 “medium(3)”, 보호기기 개폐와 뇌격에 의한 서지는 SPD의 운용이력을 통해 검출하므로 “medium(3)”으로 상정한다. 그리고, 비선형 회로에 의한 철공진은 SPD의 운용이력을 통해 검출하므로 “medium(3)”, 접지방식에 의한 감전전류는 절연저항계 및 누설전류계를 통해 검출하므로 “high(4)”로 평가한다. 한편, 아크는 도선에 직렬로 연결된 저항 성분으로 보이기 때문에 정상 및 고장 상태를 검출하기 어렵고 고장검출을 위한 기술적 난이도가 매우 높으므로 “very high(5)”로 상정한다.

4. PSCAD/EMTDC에 의한 LVDC 배전망의 전기적 위해요인 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 부하장치부를 나타낸다.



[그림 3] LVDC 배전망의 전기적 위해요인 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

LVDC 배전망의 전기적 위해요인의 안전성 평가를 수행하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 사고전류는 실제통사례 및 기술기준을 바탕으로 0.1[Ω]의 단락저항과 10[Ω]의 지락 저항을 가지고, 순환전류는 단상부하를 조절하여 10[%]~30[%]의 부하 불평형률을 모의한다. 또한, IGBT 스위칭에 의한 누설전류와 CMV는 기생 커패시턴스를 0.15[nF]과 1.5[nF]으로 구성하고, 절연성능 열화에 의한 누설전류는 전기설비의 절연저항을 100[MΩ]~0.1[MΩ]로 저하시킨다. 한편, 뇌격에 의한 서지는 50[kV]의 임펄스 전압을 인가하고, 보호기기 개폐에 의한 서지는 개방 저항을 1[MΩ], 투입 저항을 1[μΩ]으로 모의한다. 그리고, 비선형 회로에 의한 철공진은 극간 커패시턴스를 10[nF]으로 상정하고, 접지방식별 감전전류는 TT, IT, TN-C로 구성한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목	내 역	
사고유형별 사고전류	단락 저항[Ω]	0.1
	지락 저항[Ω]	10
불평형 부하에 의한 순환전류	부하 불평형률[%]	10, 30
IGBT 스위칭에 의한 누설전류 및 CMV	기생 커패시턴스[nF]	0.15, 1.5
절연성능 열화에 의한 누설전류	절연저항[MΩ]	100, 0.1
뇌격에 의한 서지	임펄스 전압[kV]	50
보호기기 동작에 의한 서지	개방 저항[MΩ]	1
	투입 저항[μΩ]	1
비선형 회로에 의한 철공진	극간 커패시턴스[nF]	10

5.2 RPN 방식에 의한 LVDC 배전망의 안전성 평가

상기에서 제시한 LVDC 배전계통의 안전성 평가 방안에 따라

사고전류, 누설전류, CMV, 순환전류, 서지, 철공진, 감전전류, 아크에 대한 RPN 평가 점수를 나타내면 표 2와 같다.

여기서, 노출부 감전에 의한 감전전류는 높은 심각도로 가장 높은 순위를 가지고, DC 아크와 IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 높은 발생도와 검출도로 인해 상대적으로 높은 순위로 평가되어, 안전사고에 대한 대책이 요구됨을 확인할 수 있다. 또한, 뇌격에 의한 서지, 불평형 부하에 의한 순환전류, 보호기기 개폐에 의한 서지는 중간순위로 평가되며, LVDC 설비와 DC 작업자 안전에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 확인할 수 있다. 한편, 사고유형 별 사고전류는 심각도가 높지만, 발생도와 검출도가 매우 낮아 위험도가 낮게 평가되며, CMV는 발생도와 검출도가 높지만, 인체 및 설비에 악영향을 미칠 가능성이 매우 낮아 상대적으로 낮은 순위로 산정됨을 확인할 수 있다. 그리고, 철공진은 불평형 부하율과 접지전위가 높은 경우에 크게 나타날 수 있지만, 발생도가 매우 낮아 낮은 순위로 평가되어 LVDC 배전망에 큰 악영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

[표 2] RPN 방식에 의한 LVDC 배전망의 안전성 평가

위해 요인	세부 요인	파라미터 조건	S ₁	S ₂	O	D	RPN	순위
감전 전류	TN-C	노출부 감전사고	5	5	3	4	300	1
감전 전류	TT	노출부 감전사고	5	5	3	4	300	1
감전 전류	IT	노출부 감전사고	5	5	3	4	300	1
아크		시험전압 : 480[V], 시험전류 : 2.5[A]	2	5	4	5	200	4
아크		시험전압 : 490[V], 시험전류 : 7[A]	2	5	4	5	200	4
아크		시험전압 : 490[V], 시험전류 : 14[A]	2	5	4	5	200	4
아크		시험전압 : 810[V], 시험전류 : 7[A]	2	5	4	5	200	4
누설 전류	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 1.5[nF], 스위칭 주파수: 8.0[kHz]	3	3	5	4	180	8
누설 전류	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 1.5[nF], 스위칭 주파수: 3.6[kHz]	3	3	5	4	180	8
감전 전류	TN-C	외합 감전사고	3	5	3	4	180	8
순환 전류	불평형 부하	불평형 부하율 : 30[%], 접지저항 : 1[Ω]	3	3	4	4	144	11
누설 전류	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 스위칭 주파수: 8.0[kHz]	2	3	5	4	120	12
누설 전류	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 스위칭 주파수: 3.6[kHz]	2	3	5	4	120	12
서지	뇌격	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 10[kW]	5	4	2	3	120	12
서지	뇌격	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 1[kW]	5	4	2	3	120	12
감전 전류	TT	외합 감전사고	2	5	3	4	120	12
순환 전류	불평형 부하	불평형 부하율 : 30[%], 접지저항 : 30[Ω]	2	3	4	4	96	17
순환 전류	불평형 부하	불평형 부하율 : 10[%], 접지저항 : 1[Ω]	2	3	4	4	96	17
순환 전류	불평형 부하	불평형 부하율 : 10[%], 접지저항 : 30[Ω]	2	3	4	4	96	17
누설 전류	절연 열화	절연 저항 : 0.1[MΩ]	2	3	3	4	72	20
서지	DC즉 개폐	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 10[kW]	2	4	3	3	72	20
서지	DC즉 개폐	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 1[kW]	2	4	3	3	72	20
서지	DC즉 개폐	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 10[kW]	2	4	3	3	72	20
서지	DC즉 개폐	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 1[kW]	2	4	3	3	72	20
감전 전류	IT	외합 감전사고	1	5	3	4	60	25

누설 전류	절연열화	절연 저抵抗 : 100[MΩ]	1	3	3	4	36	26
철공진	보호 기기 개폐	필터 커페시터 : 100[uF], 불평형 부하율 : 30[%], 접지전위 : 5[%]	4	2	1	3	24	27
사고 전류	단락 사고	AC측 3상 단락, 단락저항 : 10[mΩ]	4	5	1	1	20	28
사고 전류	단락 사고	DC측 단락, 단락저항 : 1[Ω]	4	5	1	1	20	28
사고 전류	단락 사고	암 단락, 단락저항 : 30[mΩ]	2	5	2	1	20	28
철공진	보호 기기 개폐	필터 커페시터 : 100[uF], 불평형 부하율 : 10[%], 접지전위 : 5[%]	3	2	1	3	18	31
CMV	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 1.5[nF], 부하 크기 : 10[kW]	1	1	5	3	15	32
CMV	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 1.5[nF], 부하 크기 : 1[kW]	1	1	5	3	15	32
CMV	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 10[kW]	1	1	5	3	15	32
CMV	IGBT 스위칭	기생 커페시턴스 : 0.15[nF], 부하 크기 : 1[kW]	1	1	5	3	15	32
철공진	보호기기 개폐	필터 커페시터 : 260[uF], 불평형 부하율 : 30[%], 접지전위 : 1[%]	2	2	1	3	12	36
철공진	보호기기 개폐	필터 커페시터 : 260[uF], 불평형 부하율 : 10[%], 접지전위 : 1[%]	2	2	1	3	12	36
철공진	보호기기 개폐	필터 커페시터 : 100[uF], 불평형 부하율 : 10[%], 접지전위 : 1[%]	2	2	1	3	12	36
사고전류	지락사고	필터 즉 저락, 저락저항 : 10[Ω]	1	5	2	1	10	39
철공진	보호기기 개폐	필터 커페시터 : 260[uF], 불평형 부하율 : 10[%], 접지전위 : 1[%]	1	2	1	3	6	40

6. 결 론

본 논문에서는 LVDC 배전망의 사고전류, 누설전류, CMV, 순환전류, 서지, 철공진, 감전전류, 아크를 전기적 위해요인으로 제시하고, RPN 방식을 이용한 안전성 평가방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, LVDC 배전망의 전기적 위해요인 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 전기적 위해요인에 대한 LVDC 배전망의 안전성 평가를 수행한 결과, 감전전류와 아크, IGBT 스위칭에 의한 누설전류가 높은 위험 순위로 산정되어, 전기설비와 작업자 안전에 큰 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

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