

400V급 10kW LVDC 배전계통의 누설전류 발생 메커니즘에 관한 연구

김윤호*, 김경화*, 이민행*, 김세진*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

A Study on Mechanism of Leakage Current in 400V, 10kW LVDC Distribution System

Yun-Ho Kim*, Kyung-Hwa 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 등의 이유로 선로 및 설비의 이용률 향상, 공급용량을 증대시킬 수 있는 DC 배전계통에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지만, DC의 전기적 특성을 고려한 전기적 위해요인의 평가기준이 미흡한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전계통의 위해요인 중 하나인 누설전류의 안전성을 평가하기 위하여, IGBT 스위칭 및 절연성능에 의한 누설전류 발생 메커니즘을 제안하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 메인 컨버터부, 절연성능 장치부, 구간 컨버터부로 구성된 10kW, 400V급 DC 배전계통의 모델링을 수행한다. 상기의 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 누설전류 특성을 분석한 결과, 메인 컨버터의 기생 커패시턴스와 절연성능 저하에 따라 누설전류가 크게 증가하여, DC 전기설비의 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 기존 배전망 접속용량 포화 등의 이유로 DC 배전계통에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 DC 배전계통은 조류를 능동적으로 제어하여 선로 및 설비의 이용률을 높일 수 있고, 동일한 선로를 활용하여 기존의 AC 배전계통보다 더 많은 용량을 공급할 수 있어 변전소 증설과 같은 불필요한 투자를 회피할 수 있는 장점을 가지고 있다[1]. 하지만, 기존에 운용되던 AC 배전계통과 달리, DC 배전계통은 계통연계 및 사용전 검사를 위한 기술기준이 미흡하고 안전운용 절차 및 운용 경험이 부족하므로, DC 배전계통의 절연내력, DC 아크 등의 전기적 특성을 고려한 안전성 평가방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 DC 배전계통의 위해요인 중 하나로 평가되는 누설전류의 안전성을 평가하기 위하여, IGBT 스위칭 및 절연성능에 의한 누설전류 발생 메커니즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 메인 컨버터부, 절연성능 장치부, 구간 컨버터부로 구성된 400V급 10kW LVDC 배전계통을 모델링하고, 누설전류의

특성을 평가한다. 이를 바탕으로 다양한 시나리오별로 시물레이션을 수행한 결과, 기생 커패시턴스가 0.15[nF]에서 1.5[nF]으로 증가함에 따라 메인 컨버터의 누설전류가 최대 10.6배 증가함을 알 수 있으며, 절연 저항이 100[MΩ]에서 0.1[MΩ]으로 감소함에 따라 메인 컨버터의 누설전류가 최대 2.1배 증가함을 확인할 수 있고, 기생 커패시턴스가 1.5[nF]이고 절연 저항이 0.1[MΩ]이면 메인 컨버터의 누설전류가 12.5[mA] 이상으로 발생하여 DC 전기설비의 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

2. DC 배전계통의 누설전류 발생 메커니즘

2.1 IGBT 스위칭에 의한 누설전류 발생 메커니즘

일반적으로 DC 배전계통에 사용되는 컨버터는 그림 1과 같이 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, IGBT 모듈은 전력변환을 목적으로 수 kHz의 고주파로 스위칭 동작을 수행하는데, 전력변환 과정에서 방열판과 IGBT 모듈 사이에 존재하는 기생 커패시턴스(C_{str})에 의하여 누설전류가 발생할 수 있다. 즉, 방열판과 IGBT 모듈 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의한 누설전류는 식 (1)과 같이,

시간에 따른 IGBT 스위칭의 전압 변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스(C_{str})에 의해 산정된다. 따라서, 컨버터측의 DC 전압의 크기와 방열판의 구조에 따라 누설전류의 발생에 큰 영향을 미칠 수 있다.

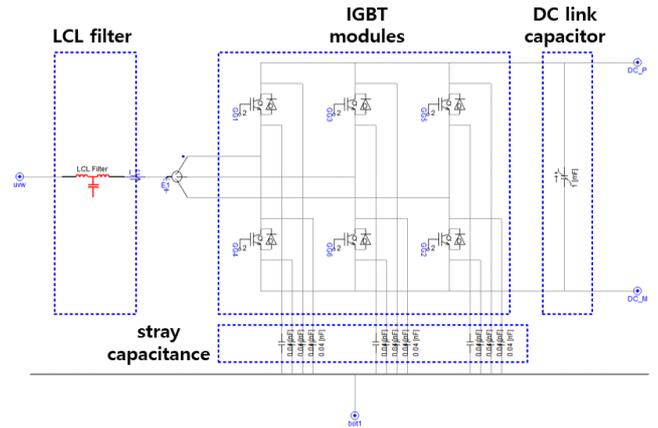
$$i_{leak,ins} = \frac{v}{R_{ms}} \quad (2)$$

여기서, $i_{leak,ins}$: 절연성능 저하에 의한 누설전류, v : DC 전압, R_{ms} : 절연 저항

3. PSCAD/EMTDC에 의한 400V LVDC 배전계통의 모델링

3.1 메인 컨버터

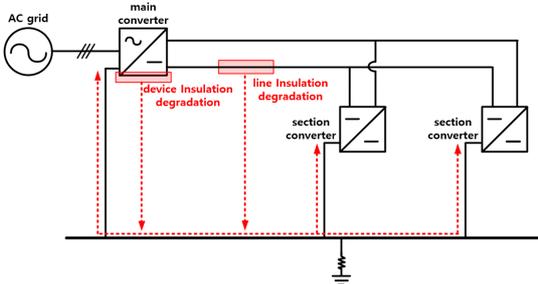
메인 컨버터는 그림 3과 같이, LCL 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터, 기생 커패시턴스 등으로 구성된다. 여기서, LCL 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고주파 스위칭 노이즈를 저감시키기 위해 사용되고, IGBT 모듈은 3상 AC 전력을 DC로 변환하기 위하여 3-leg 형태로 구성되며, DC 링크 커패시터는 출력단의 직류 전압을 안정적으로 유지하는 역할을 수행한다. 한편, IGBT 모듈과 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스는 각 IGBT에 병렬로 구성하여 모델링한다.



[그림 3] 메인 컨버터 모델링

3.2 절연성능 장치부

절연성능 장치부는 그림 4와 같이 절연 저항을 통해 전기 설비 및 선로의 절연성능 저하를 모의할 수 있도록 구성된다. 여기서, 절연 저항은 전기설비 기술기준을 바탕으로 전로 사용전압에 따라 산정된다.



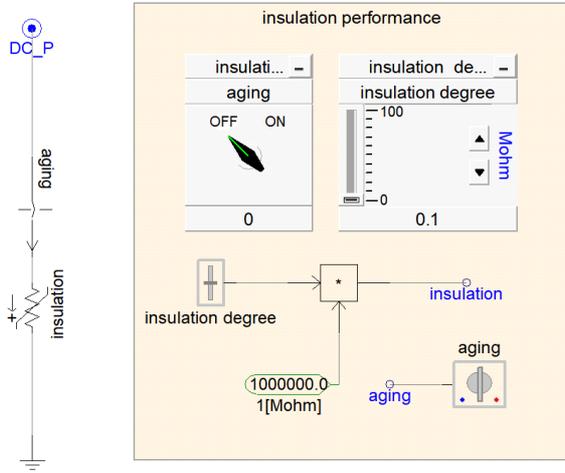
[그림 2] 절연성능 저하에 의한 누설전류 발생 메커니즘

$$i_{leak,str} = C_{str} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

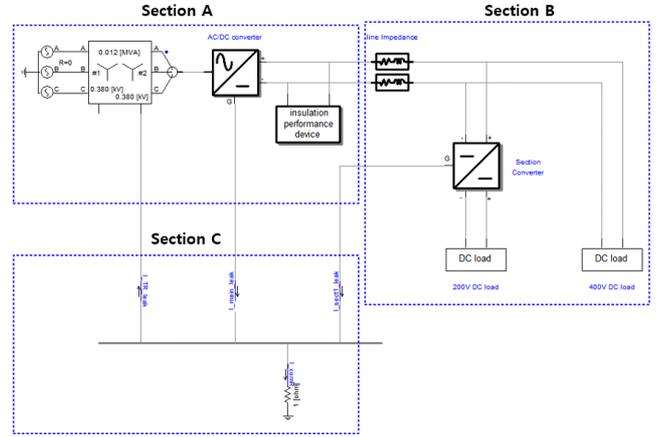
여기서, $i_{leak,str}$: IGBT의 기생 커패시턴스에 의한 누설전류, C_{str} : IGBT의 기생 커패시턴스, v : DC 전압, t : 시간

2.2 절연성능 저하에 의한 누설전류 발생 메커니즘

절연성능 저하에 의한 누설전류는 그림 2와 같이 전기설비와 선로의 절연성능 저하로 발생할 수 있다. 먼저, 전기설비의 절연성능은 과전압 유입 등에 의한 전기적인 요인과 진동, 충격 등에 의한 기계적인 요인과 온도, 습도, 먼지 등의 환경적인 요인으로 인해 저하될 수 있다. 한편, 선로의 절연성능은 가설 시 전선 피복의 손상이나 전선 접속부 및 전기기기 연결부의 노출에 의하여 악화될 수 있으며, 운용 환경에 따라 열열화, 내후성 열화, 균열 등에 의해 악화될 수 있다. 즉, 이러한 절연성능 저하에 의한 누설전류는 식 (2)와 같이, DC 전압과 절연 저항에 의해 산정된다.



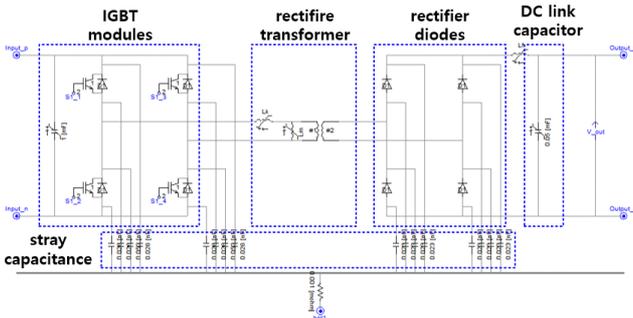
[그림 4] 절연성능 장치부 모델링



[그림 6] 전체 시스템 모델링

3.3 구간 컨버터

구간 컨버터는 그림 12와 같이, full-bridge 형태의 IGBT 모듈과 정류기용 변압기, 정류용 다이오드 모듈, DC 링크 커패시터, 기생 커패시턴스 등으로 구성된다. 여기서, IGBT 모듈 및 다이오드 모듈과 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스는 각 소자에 병렬로 구성하여 모델링한다.



[그림 5] 구간 컨버터 모델링

3.4 전체 시스템

PSCAD/EMTDC를 이용하여 메인 컨버터부, 절연성능 장치부, 구간 컨버터부 등으로 구성된 전체 시스템은 그림 6와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Section A는 변압기와 메인 컨버터부, 절연성능 장치부로 구성되고, Section B는 DC 모의 선로와 구간 컨버터, DC 부하를 나타내며, Section C는 변압기, 메인 컨버터, 구간 컨버터 등의 접지가 연결된 접지부를 나타낸다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

DC 배전계통의 누설전류 특성을 분석하기 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]과 1.5[nF]으로 나타낸다[2]. 한편, 절연성능 장치는 전기설비기술기준을 바탕으로 절연 저항을 0.1[MΩ]과 100[MΩ], 접지 저항은 1[Ω]과 30[Ω]으로 상정한다[3]. 또한, 전기설비기술기준 제27조에 따라 사용전압에 대한 누설전류가 최대 공급전류의 1/2,000을 넘는 경우를 위해 판단하며, 본 연구에서는 12.5[mA]로 상정한다. 즉, 상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 기생 커패시턴스, 절연 저항, 접지 저항 등의 파라미터에 따른 상정 시나리오를 나타내면 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

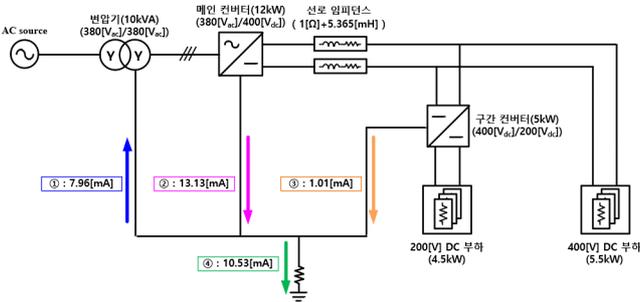
항목	내역	
변압기	결선 방식	Y-Yg
	정격 용량	12[kVA]
	변압비	380[V]/380[V]
메인 컨버터	정격 용량	12[kW]
	변압비	380[V _{AC}]/400[V _{DC}]
	기생 커패시턴스	0.15 [nF], 1.5 [nF]
절연성능 장치	절연 저항	0.1 [MΩ], 100 [MΩ]
구간 컨버터	정격 용량	5[kW]
	변압비	400[V _{DC}]/200[V _{DC}]
DC 선로	저항	1 [Ω]
	인덕턴스	5.365 [mH]
DC 부하	용량	10[kW]
접지 저항		1 [Ω], 30 [Ω]

[표 2] 시뮬레이션 상정 시나리오

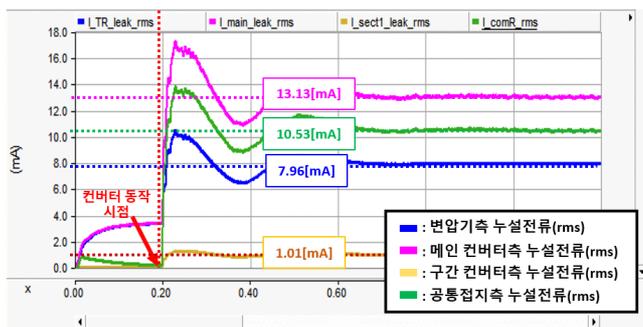
Case	기생 커패시턴스 [nF]	절연 저항 [MΩ]	접지 저항 [Ω]
I	0.15	100	1
II	0.15	100	30
III	0.15	0.1	1
IV	0.15	0.1	30
V	1.5	100	1
VI	1.5	100	30
VII	1.5	0.1	1
VIII	1.5	0.1	30

4.2 400V LVDC 배전계통의 누설전류 특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 가장 가혹한 조건인 Case VIII의 누설전류 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 (a)는 누설전류의 흐름도를 나타내고, 그림 7의 (b)는 400V LVDC 배전계통에서 누설전류의 특성을 나타낸다. 즉, 변압기로 유출되는 누설전류(①)는 7.96[mA]이고, 메인 컨버터(②)와 구간 컨버터(③)로부터 각각 13.13[mA]와 1.01[mA]의 누설전류가 발생하며, 공통접지(④)로 10.53[mA]의 누설전류가 유입되는 것을 알 수 있다.



(a) 누설전류의 흐름도



(b) 누설전류 특성

[그림 7] 400V LVDC 배전계통의 누설전류 특성(Case VIII)

한편, 400V LVDC 배전계통의 시나리오별 누설전류 특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, Case I과 Case V를 비교하면, 기생 커패시턴스가 0.15[nF]에서 1.5[nF]으로 증가함에 따라 메인 컨버터의 누설전류가 10.6배 증가함을 알 수 있다. 또한, Case II와 Case IV를 비교하면, 절연 저항이 100[MΩ]에서 0.1[MΩ]으로 감소함에 따라 메인 컨버터의 누설전류가 2.1배

증가함을 확인할 수 있다. 한편, Case VII와 Case VIII를 통해, 기생 커패시턴스가 1.5[nF]이고 절연 저항이 0.1[MΩ]이면 메인 컨버터의 누설전류가 12.5[mA] 이상으로 발생하여 전기설비 기술기준을 위반하므로, DC 전기설비의 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 3] 시나리오별 누설전류 특성

Case	누설전류 [mA]			
	변압기	메인 컨버터	구간 컨버터	공통접지
I	0.8	1.15	0.94	1.73
II	1.23	1.15	0.95	1.55
III	2.28	2.44	0.94	1.77
IV	2.45	2.45	0.97	1.57
V	5.29	12.17	0.98	11.33
VI	7.17	12.16	0.98	10.01
VII	5.72	12.56	0.98	11.42
VIII	7.96	13.13	1.01	10.53

5. 결 론

본 논문에서는 DC 배전계통의 안전성을 평가하기 위해, 주요한 전기적 위해요인으로 평가되는 누설전류의 IGBT 스위칭 및 절연성능에 의한 발생 메커니즘을 제안하고, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 400V급 10kW LVDC 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 누설전류 특성을 분석한 결과, 메인 컨버터의 기생 커패시턴스와 절연성능에 따라 누설전류가 크게 증가하여 DC 전기설비의 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 이후동 외 4명, “±35kV급 MVDC 하이브리드 배전망의 보호협조 운용방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 24권 제3호, pp.533-542, 2023.
- [2] 김지명 외 4명, “PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 누설전류 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, 22권 제2호, pp.810-818, 2021.2
- [3] 이호중 외 1명, “전기철도 접지시스템에 대한 연구”, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.1,476-1,498, 2007.11