

LVDC 배전계통에서 경사각을 이용한 사고전류 제한장치의 동작 메커니즘에 관한 연구

한병길*, 이나경*, 이후동**, 이명근*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과, **한국전력공사 전력연구원

e-mail: bghan@koreatech.ac.kr

A Operation Mechanism of Fault Current Limiter using Slope Characteristics in LVDC Distribution System

Byeong-Gill Han*, Na-Kyung Lee*, Hu-Dong Lee**, Myung-geun Lee* and Dae-Seok Rho*

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

**Korea University of Technology and Education, KEPCO Research Institute

요약

최근, 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 전력요구 등으로, DC 배전에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 DC 배전은 현재 부분적으로 상용화되고 있지만, 운용 및 보호협조 방안이 부족한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 메인 컨버터의 탈락을 방지하고 수용가에 안정적인 전압을 공급하기 위한, LVDC 배전계통용 사고전류 제한장치의 동작 메커니즘을 제시한다. 즉, LVDC 배전계통에 사고가 발생하는 경우, 제한장치가 사고전류의 경사각 특성을 이용하여 사고의 발생 유무를 정확하게 판단하는 방안과 사고구간이 분리되는 경우, 수용가 측에 발생하는 전압 서지를 저감시키기 위한 운용방안을 제시한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, 메인컨버터부, 사고전류 제한장치부, LVDC 선로 임피던스부, 부하부로 구성된 LVDC 모의 배전계통의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 제안한 사고전류 제한장치의 운용 특성을 분석한 결과, 사고가 발생하는 경우 제한장치가 사고발생을 정확하게 판단하여 사고전류를 제한시켜 사고구간을 분리하고, 제한장치가 동작되는 동안 수용가 측의 전압 서지를 저감시킬 수 있음을 알 수 있었다.

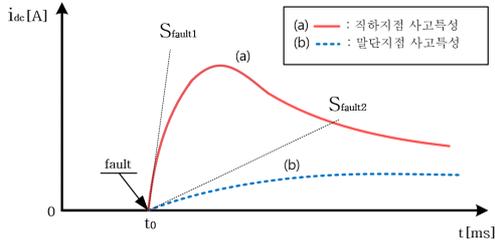
제한장치가 사고전류를 신속하게 제한하여, 사고구간을 분리할 수 있는 시간을 확보하고, 컨버터의 탈락을 방지하여 LVDC 배전계통의 정전을 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 전 세계적으로 신재생에너지 전원의 도입 및 DC 부하의 증가, 고품질, 고신뢰성의 전력요구 등으로, DC 배전에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 DC 배전은 현재 부분적으로 상용화되고 있지만, 운용 및 보호협조 방안이 부족한 실정이다. 특히 DC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, AC 배전계통에 비해 사고전류가 매우 가파르게 증가하게 되어, 내부 소자를 보호하기 위해, 컨버터의 탈락이 발생할 가능성이 있다. 본 논문에서는 LVDC 배전계통에 대하여 컨버터의 탈락을 방지하기 위하여, 사고전류를 제한할 수 있는 LVDC 배전계통용 사고전류 제한장치를 제시한다. 이 장치는 주 통전부와 전류 제한부, 등으로 구성되며, 동작 메커니즘은 초기 동작모드(Mode I), 예비 동작모드(Mode II), 주 동작모드(Mode III), 회복 동작모드(Mode IV)의 4가지 동작모드로 분류된다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 LVDC 배전계통용 사고전류 제한장치의 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 동작 특성을 분석한 결과, 부하측에서 사고가 발생한 경우

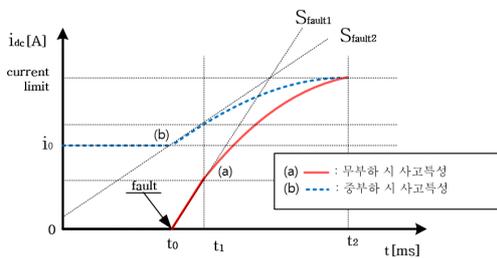
2. LVDC 배전계통에서의 사고전류 경사각 특성

LVDC 배전계통에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 경사각은 사고 지점과 부하의 크기에 따라 서로 다른 선로정수를 가지게 된다. 그림 1은 사고지점에 따른 사고전류 특성을 나타낸 것이고, 그림 1에서 (a), (b)는 각각 LVDC 선로의 직하지점 구간과 말단지점 구간에서 사고가 발생한 경우를 나타낸 것이다. 그림 1의 (a)과 같이, 직하사고의 경우 사고지점까지의 낮은 임피던스로 인하여 사고 발생 시간대인 t_0 를 기준으로 매우 큰 사고전류가 발생하여 큰 변동량을 갖게 되고, 그림 1의 (b)와 같이, 말단사고의 경우에는 선로가 가지는 큰 임피던스 성분에 의해 그림 1의 (a)의 경우보다 상대적으로 작은 사고전류가 흐르고, 그 변동량은 적게 된다.



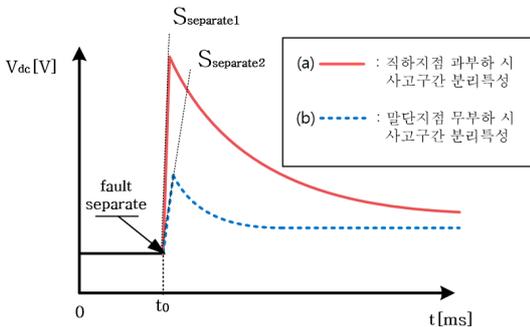
[그림 1] 사고 지점에 따른 사고전류 특성

또한, 그림 2에서 (a)와 (b)는 각각 무부하 시와 과부하 시의 사고전류 특성을 나타낸 것이다. 그림 2의 (a)와 같이 무부하 상태일 경우, 사고전류는 큰 초기 변동량을 갖게 되며, 그림 2의 (b)와 같이 과부하 상태일 경우, 사고전류는 작은 초기 변동량을 갖게 된다. 즉, 부하가 아예 존재하지 않거나 그 부하의 크기가 작을수록, 사고전류의 큰 초기 변동량으로 사고전류의 경사각은 큰 값을 가지게 되며, 부하가 존재하고 그 부하의 크기가 클수록, 사고전류의 작은 초기 변동량으로 사고전류의 경사각은 작아지게 된다.



[그림 2] 부하 크기에 따른 사고전류 특성

LVDC 배전계통에서 보호협조를 통해 사고구간이 분리된 직후, 선로 임피던스 성분에 의해 부하측에서 전압 서지가 발생할 수 있으며, 전압 서지의 경사각은 사고지점과 부하의 크기에 따른 선로정수에 의해 달라진다. 그림 3은 사고 지점 및 부하에 따른 사고구간 분리 특성을 나타낸 것이다. 그림 3의 (a)와 같이 선로 직하지점에서 사고구간이 분리되고 과부하 상태일 경우, 부하측 전압서지가 가장 크게 발생하며, 그림 3의 (b)와 같이 선로 말단지점에서 사고구간이 분리되고 무부하 상태일 경우 전압서지가 가장 작게 발생한다.

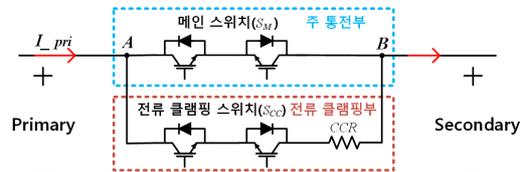


[그림 3] 사고 지점 및 부하 크기에 따른 사고구간 분리 특성

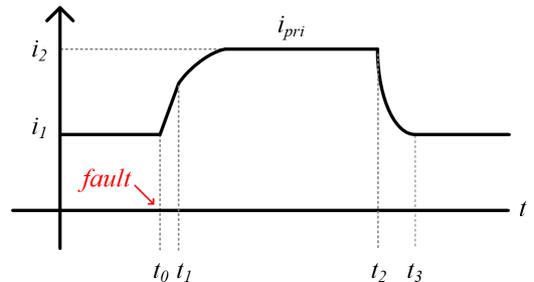
3. 사고전류 제한장치의 구성 및 동작 메커니즘

3.1 사고전류 제한장치의 구성

LVDC 배전계통용 사고전류 제한장치는 그림 4와 같이 주 통전부와 전류 제한부로 구성한다. 여기서, 주 통전부는 2개의 스위치 모듈을 직렬로 연결한 메인 스위치(S_M)로 구성되고, 전류 제한부는 전류제한 스위치(S_{CC})와 제한 저항(CCR)으로 구성되는데, 전류제한부의 스위치는 주 통전부의 메인 스위치와 동일한 형태를 가진다. 또한, 주 통전부와 전류 제한부의 스위치는 높은 내압을 가지고, 수 μs 이내에 빠르게 동작하는 소자인 반도체 스위치(IGBT)를 채용하며, 스위치 모듈은 전류를 양방향으로 제어하기 위하여 2개 스위치의 에미터를 공통으로 접속한다. 사고전류 제한장치의 동작모드는 그림 4와 같이, 초기 동작모드, 예비 동작모드, 주 동작모드, 회복 동작모드의 4가지 모드로 나눌 수 있다.



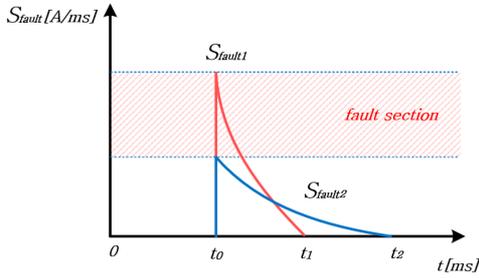
[그림 4] DC 배전계통용 사고전류 제한장치의 구성



[그림 5] 제한 장치에 의한 사고전류 제한 개념

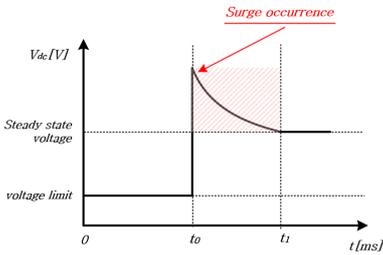
3.2 사고전류 제한장치의 동작 메커니즘

한편, 사고전류 제한장치는 사고의 발생과 사고구간의 분리를 정확하게 판단하여 제한장치를 제어한다. 먼저, 사고가 발생하는 경우, 사고전류 제한장치는 그림 6과 같이 선로 임피던스와 부하전류에 따른 경사각 특성을 고려하여 사고를 판단한다. 즉, S_{fault1} 은 사고 말단 지점에서 최대 부하에서 사고가 발생한 경우의 최소 사고전류 경사각을 의미하고, S_{fault2} 는 사고 직하 지점에서 부하가에서 사고가 발생한 경우의 최대 사고전류의 경사각을 의미한다. 그림 6에서 전류제한 장치는 t_0 에서 사고 발생 직후 사고전류 경사각이 S_{fault1} 과 S_{fault2} 사이일 경우 사고라고 판단하고, 사고전류를 차단하는 제한 동작을 수행하게 된다.



[그림 6] 사고지점 및 부하 유·무에 따른 사고전류 경사각 특성

한편, 사고구간이 분리되는 경우, 사고전류 제한장치는 그림 7과 같이 LVDC 배전계통에서 사고구간 분리 직후 선로 임피던스 성분으로 인하여 2차측 전압 서지가 발생할 수 있다. 따라서, 사고전류 제한장치는 사고구간 분리 직후 빠른 회복 동작 시행 시 서지 발생으로 인해 수용가 측에 위험이 될 수 있으므로, 회복 동작 시행 시 2차측 전압의 기율기와 안정적인 전압 범위를 고려하여 동작을 수행한다.

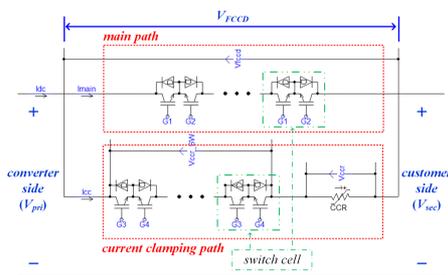


[그림 7] 사고구간 분리 직후의 수용가 전압 특성

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 LVDC 모의 배전계통 모델링

4.1 사고전류 제한장치의 모델링

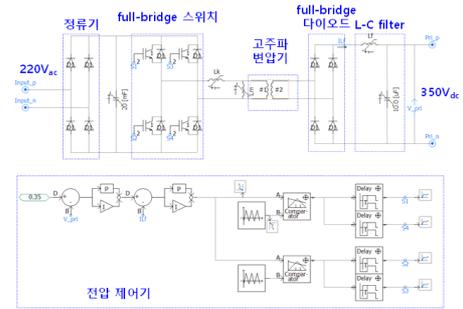
그림 4의 사고전류 제한장치의 구성도를 바탕으로 PSCAD/EMTDC의 모델링을 수행하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 직렬로 연결한 반도체 스위치 모듈 개수 (m)는 사고전류 제한 장치 전압에 스위치 내압 (V_{CE})과 스위치 내압의 사용률(k)을 나눈 값으로 산정하며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 8] 사고전류 제한 장치의 모델링

4.2 메인컨버터 모델링

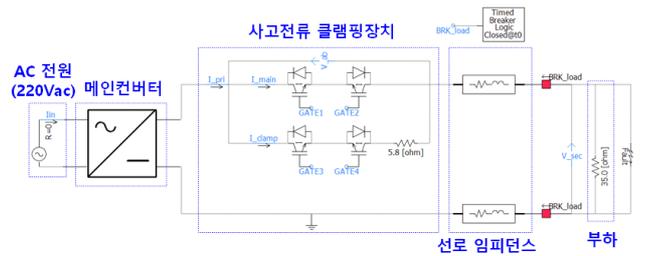
메인컨버터는 그림 9와 같이 정류기, full-bridge 스위치, 고주파 변압기, full-bridge 다이오드, L-C filter, 전압제어기로 구성된다. 여기서, 전압제어기는 단상 220[V]의 교류 전원을 350[Vdc]의 전압으로 변환하기 위하여, PI제어기를 이용하여 구성한다. 또한, full-bridge 스위치는 symmetrical 방식을 채용하여 동작한다.



[그림 9] 메인 컨버터 모델링

4.3 전체시스템 모델링

전체시스템은 그림 10과 같이 AC전원, 메인컨버터, 사고전류 제한장치, 선로 임피던스, 부하로 구성된다. 여기서, 메인컨버터는 단상 220Vac를 입력받아 DC전압 제어 수행하고, 선로 임피던스는 R과 L성분만 고려하고, 부하는 R부하만 고려한다.



[그림 10] 메인 컨버터 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

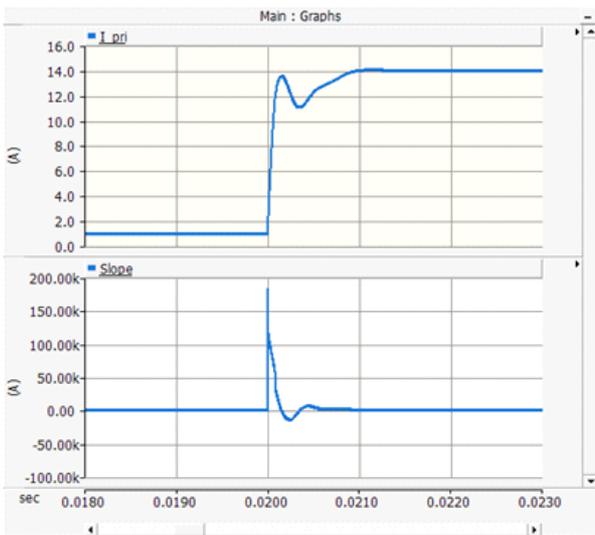
본 논문에서 제시한 LVDC 배전계통용 사고전류 제한장치의 동작 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표 1과 같이 AC계통부의 정격 전압은 380V로 상정한다. AC/DC컨버터부의 정격 용량과 정격 전압은 10.5[kW], 350[V]이고, 정격 전류는 30[A]이다. 제한 장치부의 IGBT모듈 수는 2개로 상정하고, 제한 저항은 5.8[Ω]으로 상정한다. 선로 임피던스부의 선종은 AC 배전선로와 동일한 ACSR 160[mm²]로 산정하고 공장은 10[km]로 산정한다.

[표 1] 상정사고별 시뮬레이션 조건

항 목	내 용	
메인 컨버터	정격 용량	3.5[kW]
	정격 전압	350[V]
	과부하 여유율	150% (15[A])
반도체 스위치	스위치 종류	IGBT
	최대 내압	600[V]
	최대 정격 전류	15[A]
	내압 사용률	60[%]
CCR	저항값	5.8[Ω]
선로 임피던스	선종	ACSR 160[mm ²]
	길이	0.3124[Ω]+1.785[mH], 0.6249[Ω]+3.571[mH], 0.9373[Ω]+5.356[mH]

5.2 사고전류의 경사각 특성

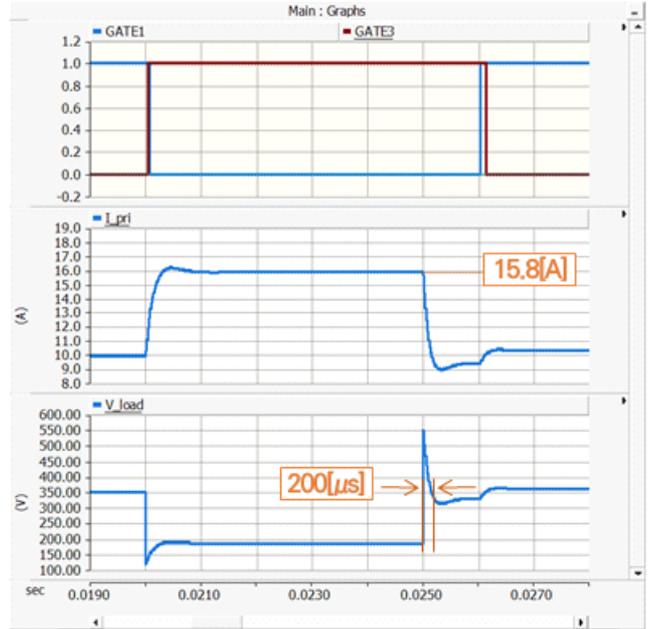
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 사고전류의 특성을 나타내면 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 11의 위의 그림은 사고전류를 나타내고, 아래 그림은 사고전류의 경사각을 나타낸 것이다. 즉, 경부하의 경우, 사고전류의 경사각은 184k[A/us]가 산정됨을 알 수 있고, 사고전류의 경사각이 가장 큰 값을 가짐을 알 수 있다.



[그림 11] 사고전류의 경사각 특성

5.3 사고전류 제한장치의 동작특성

상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 사고전류 제한장치의 동작특성을 나타내면 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 12의 위의 그림은 게이트를 나타내고, 중간은 사고전류를 나타내며, 아래 그림은 수용가측 전압을 나타낸 것이다. 즉, 사고발생 시 사고전류 제한 장치에 의해 사고전류가 15.8[A]로 제한됨을 알 수 있다. 또한, 사고구간 분리 시 수용가측 전압이 550[V]까지 급격하게 상승하지만, 제한 저항에 의해 200[μs]이내 정상상태 전압으로 도달함을 알 수 있었다.



[그림 12] 사고전류 제한장치의 동작특성

6. 결 론

본 논문에서는 사고가 발생할 경우 사고전류를 신속하게 제한하여, 보호협조 시간을 확보할 수 있는 LVDC용 사고전류 제한장치의 동작 매커니즘에 대해 제시하였다. 또한, 사고전류 제한장치의 동작 특성을 분석한 결과, 부하 크기와 공장에 따라 경사각 특성을 이용하여 사고 유무를 정확하게 판단함을 알 수 있었다. 전류제한 저항(CCR)에 의해 제한되어 메인컨버터의 탈락을 방지하고, 보호기에 의해 사고구간을 안정적으로 분리할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, 20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이후동, 태동현, 노대석, 김주용, “20kV급 방사형 MVDC 배전시스템의 보호협조 운용알고리즘에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.69, no.6, pp.869-880, 2020.
- [2] 한병길, 이후동, 태동현, 노대석, “방사형 MVDC 배전시스템에서 사고구간 분리를 위한 클램핑 장치의 구성 및 동작 특성에 관한 연구”, 전기학회논문지, vol.70, no.8, pp.1146-1155, 2021.