

LVDC 배전계통의 보호협조기기 운용 알고리즘에 관한 연구

강민관*, 노대석**

*한국폴리텍대학, **한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail:mkkang@kopo.ac.kr

A Study on Operation Algorithm of Protection Coordination Devices in LVDC Distribution System

Min-Kwan Kang*, Dae-Seok Rho**

*Dept. of Enery&Chemical Processing, KOREA POLYTECHNIS

요 약

본 논문에서는 LVDC 배전계통에서의 정전구간의 범위를 최소화하기 위한 방안으로, 사고전류의 경사각 특성을 이용한 사고구간분리 보호협조 운용방안을 제안하고, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/ EMTDC를 이용하여 1.5kV급 LVDC 배전계통 모델링을 수행한다. 제시한 보호협조 운용방안과 LVDC 배전계통 모델링을 바탕으로 사고지점에 따른 경사각 특성 및 보호협조 운용알고리즘을 분석한 결과, 보호구간별로 동작할 경사각범위를 적절하게 설정하면, 메인 컨버터가 탈락하기 전에 사고구간만을 신속히 분리할 수 있어, 본 논문에서 제안한 사고구간분리 보호협조 운용 알고리즘이 유용함을 확인하였다.

1. 서 론

LVDC 배전계통에서 DC전원의 공급을 위한 컨버터나 DC 차단기의 보호동작은 AC 보호기기 보다 훨씬 빠르기 때문에, 기존의 T-C곡선의 반 한시특성에 의한 보호기기간의 보호협조 운용이 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통에서 사고지점에 따라 다양하게 나타날 수 있는 사고전류의 경사각 개념을 이용하여 컨버터와 보호기기간의 협조동작을 신속 및 정확하게 수행하고, 정전구간의 범위를 최소화할 수 있는 LVDC 배전계통의 사고구간분리 보호협조 방안을 제안한다. 즉, LVDC 배전계통에서의 사고전류가 선로정수에 의해 사고지점에 따라 비례적으로 변하는 경사각의 특성을 이용하면, 메인 컨버터가 탈락되기 전에 사고구간을 선택적으로 분리하여, LVDC 배전계통을 정상적으로 운용할 수 있다. 또한, 본 논문에서는 제안한 보호협조 방안을 검증하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용 변전소, LVDC용 컨버터 그리고 LVDC 배전선로로 구성된 1.5kV급 LVDC 배전계통 모델링을 수행한다. 제시한 사고구간분리 보호협조 알고리즘과 LVDC 배전계통 모델링을 바탕으로 사고지점에 따른 경사각 및 보호협조 운용특성을 분석한 결과, 메인 컨버터가 탈락하기 전에 사고구간만을 신속히 분리하고 정전구간의 수용가에 미치는 영향을 최소화 할 수 있어, 본 논문에서 제안

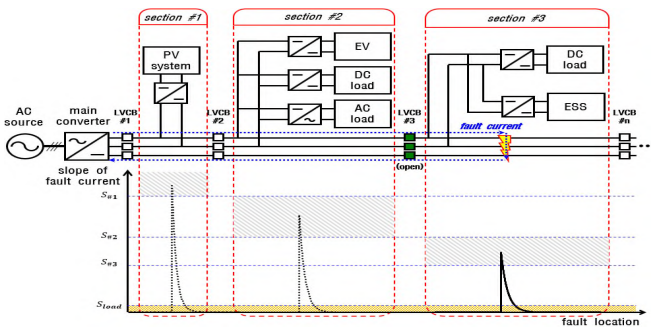
한 사고구간분리 보호협조 방안이 유용함을 확인하였다.

2. 보호협조기기 운용 알고리즘

2.1 사고전류 경사각의 정의

일반적으로, LVDC 배전계통은 3상 AC 전원을 LVDC로 변환하는 AC/DC 메인 컨버터를 중심으로 수지형의 분기선로에 신재생에너지전원, ESS, DC 부하가 DC/DC 컨버터를 통해 연계된 형태이다. 이러한 구성은 사고검출 및 보호가 용이하며 비교적 적은 비용으로 구현이 가능하다. 그러나, 계통전원을 한 대의 메인 컨버터로만 공급하기 때문에, 운용 중에 선로측에서 사고가 발생하면, 메인 컨버터의 공급용량을 초과하는 사고전류가 흘러, 메인 컨버터가 급격하게 탈락할 수 있다. 이것은 전력반도체소자를 사용하는 컨버터의 특성상 내부설비를 보호하기 위하여, 수 ms 단위의 짧은 시간 이내에 보호회로가 동작하기 때문이다. 그러므로, 보호기기간에 협조시간차를 두어 사고구간을 판별할 시간적인 여유가 없어, 기존의 방법으로는 LVDC 배전계통에서의 보호협조가 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전계통에 대하여 사고전류의 시간대비 변화율인 경사각 특성을 이용하여, 신속하게 사고구간을 선택적으로 분리하는 보호협조 운용방안을 그림 1과 같이 제안한다. 이 그림에서와 같이, 각 보호구간에서 발생하는 경사각에 따라, 해당구간의 보호기기가 동작하여

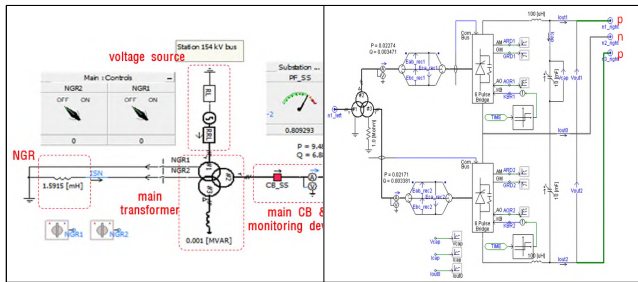
사고구간을 분리하게 된다. 즉, 그림 1의 3번 보호구간(section #3)에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 경사각은 3번 보호기기(CB3)의 동작범위에 들어오지만 1번과 2번 보호기기(CB1, CB2)의 동작범위에는 도달하지 못하므로, 3번 보호기기만 동작하여 선로가 분리되고, 1번과 2번의 보호기기는 동작하지 않아, 사고구간을 분리할 수 있다. 이러한 보호협조 방안은 전위와 후비 보호기기간의 협조를 확실하게 하며, 최대한 빠른 속도로 사고구간을 선택적으로 분리할 수 있어, 전선구간의 수용가들은 안정적으로 전력을 공급받을 수 있다.



[그림 1] 사고전류의 경사각 특성을 이용한 보호협조 운용방안

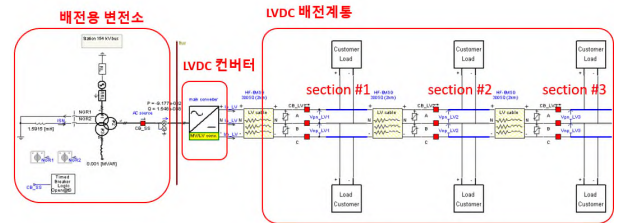
3. PSCAD/EMTDC에 의한 LVDC 배전계통의 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전용 변전소의 모델링을 수행하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전용 변전소의 주변압기는 3권선 Yg-Yg-D 결선방식이며, 3차 권선은 제 3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 채용한다. 한편, 컨버터는 그림 3과 같이 정류기용 변압기, SCR 정류기, L-C 필터 등으로 구성된다. 여기서, 정류기용 변압기는 3권선 Yg-Y- Δ 결선방식을 채용하여, Y측과 Δ 측의 SCR 정류기의 입력은 30°의 위상차를 가지게 된다. 또한, SCR 정류기는 3상 AC전력을 DC로 변환하기 위한 6-pulse bridge의 사이리스터 소자들로 구성되고, L-C 필터는 정류된 DC측 출력의 리플을 저감시키는 역할을 수행한다.



[그림 2] 배전용 변전소의 모델링 [그림 3] LVDC 컨버터의 모델링

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, 배전용 변전소, 컨버터, 선로로 구성된 방사형 구조의 전체 배전계통을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, 배전용 변전소는 기존의 AC 배전계통과 동일하게 22.9kV의 전원을 공급하고, 컨버터는 AC를 DC 전원으로 변환하여 bi-pole, 비접지 방식으로 1.5kV($\pm 750V$)의 전압을 공급한다.



[그림 4] LVDC 배전계통의 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

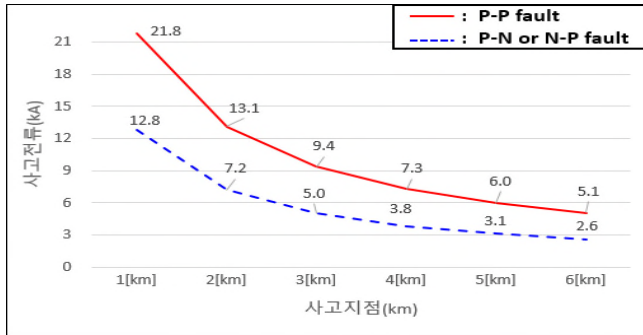
본 논문에서 제안한 LVDC 배전계통에 있어서 사고구간 분리 보호협조 운용방안을 검증하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, LVDC 배전선로의 총 공장은 6[km]이고, 선종은 HF-EMSG 300mm²를 상정한다. 또한, 각 보호구간별 보호기기의 동작범위는 표 1과 같이 각각 430[kA/s] 이상, 215~430[kA/s], 144~215 [kA/s]로 설정하고, 144[kA/s] 이하는 동작하지 않는 것으로 가정한다. 여기서, 부하전류의 경사각은 컨버터의 정격전류가 1,667[A]인 것과 전동기의 기동계수를 고려하여 7배 정도인 11.7[kA/s]로 상정하고, 차단 동작시간은 2[ms]로 가정한다. 한편, 보호구간은 총 공장 6[km]를 각각 2[km]씩 분할하고, 사고 분리를 위한 DC 차단기가 설치되어 있는 것으로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

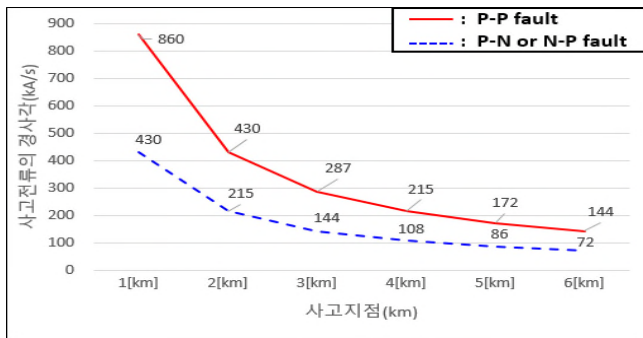
항 목		내 용
선종 및 공장	선종	HF-EMSG 300mm ²
	공장	임피던스: 0.0227[Ω], 0.87[mH] 6[km]
보호기기	동작범위	CB1: 430[kA/s] 이상, CB2: 215~430[kA/s], CB3: 144~215[kA/s]
	부하전류의 경사각	16.7[kA/s] (정격전류: 1,667[A], ramp up time: 100[ms])
	차단시간	2[ms]

4.2 사고지점에 따른 사고전류의 크기 및 경사각 특성
표 1의 시뮬레이션 조건에 따라, LVDC 배전선로에서의 사고지점별 P-P 및 P-N 사고에 대한 사고전류의 크기 및 경사각 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7(a)는 사고지점별 P-P 및 P-N 사고에 대한 사고전류의 크기를 나타낸

것이고, 그림 7(b)는 사고지점별 사고전류의 경사각 특성을 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서와 같이, 사고전류의 크기는 사고지점까지의 임피던스 특성에 따라 2.6~21.8[kA]로 발생하며, 모든 지점에서 구간 컨버터의 과부하내량을 초과하는 사고전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 14(b)에서와 같이, 사고지점별 경사각 크기는 선로공장에 따라 72~860[kA/s]로 산정되며, 각 구간별로 적절하게 보호영역을 설정하면 해당 사고구간만을 선택적으로 분리할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 사고전류 특성



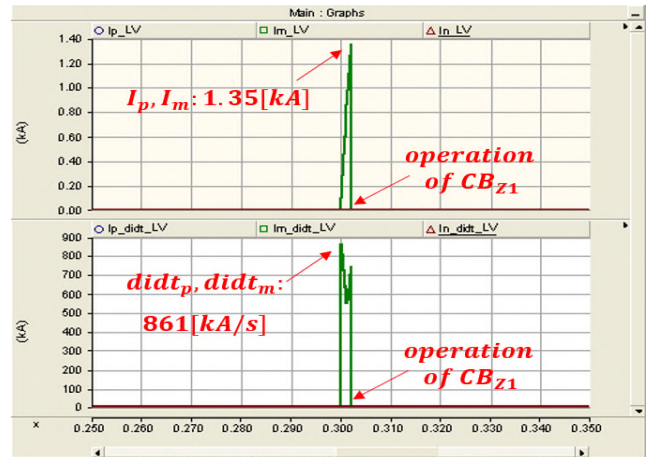
(b) 사고전류의 경사각 특성

[그림 7] 사고지점에 따른 사고전류의 크기 및 경사각 특성

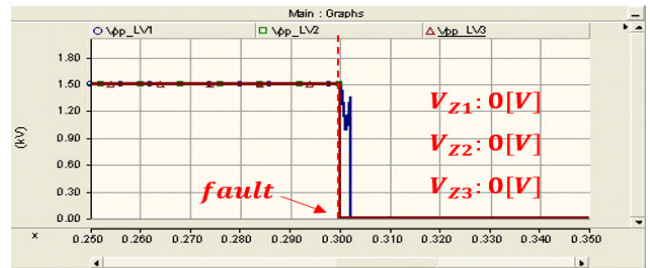
4.3 사고전류의 경사각을 이용한 보호협조 특성

LVDC 선로의 1[km] 지점에서 P-P 사고가 발생한 경우에 대하여, 본 연구에서 제안한 보호협조 및 보호기기의 운용특성은 각각 그림 8과 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 8(a)는 각각 LVDC 선로에서의 사고전류와 경사각 특성을 나타낸 것이고, 그림 8(b)은 구간별 정전 특성을 나타낸 것이다. 그림 8에서와 같이, P-P 사고가 발생하면 사고전류는 급격하게 상승하고, 경사각은 861[kA/s]가 산정된다. 여기서, 그림 9와 같이, 앞에서 산정된 경사각은 CB3의 동작범위에만 들어가 CB3만 동작하고, CB1과 CB2는 동작하지 않으므로 사고구간인 1번 영역(zone 1)을 포함한 다른 구간에서도 전압이 0[V]가 되어, 모든 구간이 정전됨을 알 수 있다. 그림 6-18에서 산정된 경사각은 CB1의 동작범위(144~215[kA/s])에 포함되므로, 그림 6-19와 같이 CB1만 동작하고, CB1과 CB2는 동작하지 않게 된다. 그러나, 방사형의 배전계통 구성상 사고

가 발생한 구간이 아니어도 전단의 차단기 동작으로 인하여 후단의 수용가들은 전력을 계속해서 공급받을 수 없음을 알 수 있다.

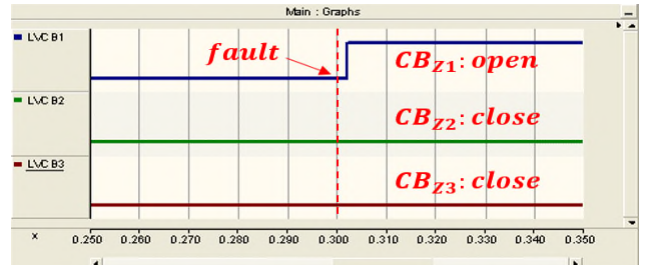


(a) 사고전류 및 경사각 특성



(b) 보호구간별 공급전압 특성

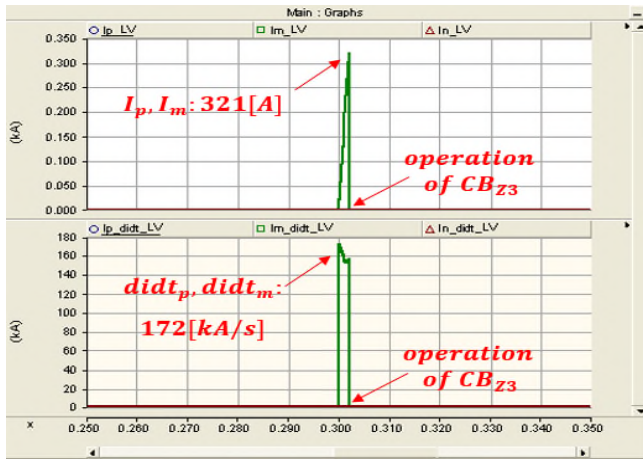
[그림 8] 사고전류의 경사각을 이용한 보호협조 운용특성



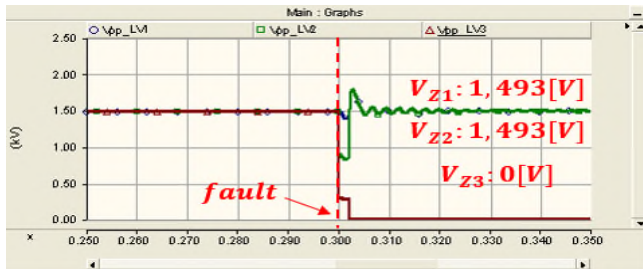
[그림 9] 사고전류의 경사각을 이용한 보호기기 운용특성(1km)

또한, LVDC 선로의 6[km] 지점에서 P-P 사고가 발생한 경우에 대하여, 본 연구에서 제안한 보호협조 및 보호기기 운용특성은 각각 그림 10과 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 10(a)는 각각 LVDC 선로에서의 사고전류와 경사각 특성을 나타낸 것이고, 그림 10(b)은 구간별 정전 특성을 나타낸 것이다. 그림 10과 같이, P-P 사고가 발생하면 사고전류는 급격하게 상승하고, 경사각은 172[kA/s]가 산정된다. 여기서, 그림 11과 같이, 앞에서 산정된 경사각은 CB3의 동작범위(144~215[kA/s])에 포함되므로, 그림 6-19와 같이 CB1만 동작하고, CB1과 CB2는 동작하지 않으므로 사고구간인 3번 영역(zone 3)만을 분리할 수 있게 된다. 이로 인해, 3번 영역(zone 3) 정전되며, 1번과 2번 영역(zone 1, zone 2)은 계속해서 전력을 공급받을 수 있다. 따

라서, 경사각 특성을 이용하는 경우, 최대한 빠른 속도로 사고 구간을 선택적으로 분리할 수 있어, 제한한 보호협조 운용방안이 유용함을 알 수 있다.

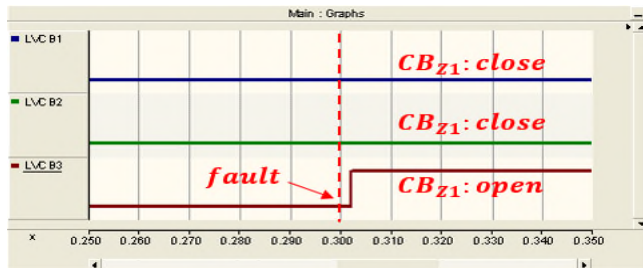


(a) 사고전류 및 경사각 특성



(b) 보호구간별 공급전압 특성

[그림 10] 사고전류의 경사각을 이용한 보호협조 운용특성



[그림 11] 사고전류의 경사각을 이용한 보호기기 운용특성(6km)

5. 결 론

본 논문에서는 LVDC 배전계통에 대하여 사고 시 정전구간을 최소화하기 위하여, 사고전류의 경사각 특성에 의한 보호협조 운용방안을 제안하였으며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 15kV급 LVDC 배전계통의 모델링을 수행하였다. 제시한 방안과 모델링을 바탕으로 사고전류의 경사각 특성을 이용하여 LVDC 배전계통의 보호협조 운용특성을 분석한 결과, 각 보호구간에서 발생하는 경사각에 따라, 해당구간의 보호기기가 동작하여 사고구간을 분리하면, 최대한 빠른 속도로 사고구간만을 선택적으로 분리할 수 있어, 건전구간의 수용가들에게 안정적으로 전력을 공급할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 이경민, 박철원, "LVDC 배전망의 고장 해석과 보호 소개", 조명·전기설비, vol.32, no.4, pp.20-29, 2018.
- [2] G. Bathurst, G. Hwang and L. Tejwani, "MVDC - The New Technology for Distribution Networks," 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, pp. 1-5, 2015.
- [3] M. Monadi, C. Koch-Ciobotaru, A. Luna, J. Ignacio Candela and P. Rodriguez, "Multi-terminal medium voltage DC grids fault location and isolation," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 14, pp. 3517-3528, 2016.