

장거리 및 고저항 사고에 따른 1.5kV급 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 운용 알고리즘에 관한 연구

이민행*, 김혜원*, 강동구*, 김병기**, 노대석*
*한국기술교육대학교 전기공학과, **강원대학교 전기공학과
e-mail:dlalsgod97@koreatech.ac.kr

An Operation Algorithm of Selective Protection Relay with the Long Distance and High Grounding Resistance in 1.5kV Distribution System

Min-Haeng Lee*, Hye-Won Kim*, Dong-Gu Kang*,
Byung-Ki Kim**, Dae-Seok Rho*

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

**Dept. of Electrical Engineering, Kangwon National University

요약

LVDC 배전망의 장거리 선로에서 고저항 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 경사각은 기동전류와 거의 동일한 크기로 감소하여, 선택 보호계전기의 오동작을 발생시킬 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망에서 단지락 저항의 크기와 선로 공장에 따른 사고전류와 기동전류의 경사각 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 장거리 선로에서 고저항 사고를 정확하게 판별할 수 있는 선택 보호계전기의 운용 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반부, 메인 컨버터부, 선택 보호계전기부, 등으로 구성된 1.5[kV]급 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 PSCAD/EMTDC 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 선로 공장과 단지락 저항의 크기에 따라 사고 및 기동전류의 초기 경사각과 특정 시간의 경사각은 서로 상이한 크기로 산정되고, 부하용량에 따라 기동전류의 경사각이 사고전류와 유사할 가능성이 있음을 알 수 있다. 한편, 제안한 선택 보호계전기의 운용 알고리즘을 바탕으로 운용 특성을 평가한 결과, 선택 보호계전기가 장거리 선로의 고저항 조건에서 사고전류와 기동전류를 정확하게 판별할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

1. 서론

LVDC 배전선로용 선택 보호계전기는 전류의 크기와 일정한 시간 구간의 전류 변화량을 바탕으로, 사고 여부를 판별한다. 또한, LVDC 배전선로에서 사고 발생 시, 사고전류는 선로 임피던스와 컨버터의 커패시턴스, 등에 영향을 받음을 알 수 있다. 하지만, 단지락 저항의 크기와 선로 공장에 따라 사고전류와 기동전류의 경사각이 유사하여, 선택 보호계전기의 오동작을 발생시킬 가능성이 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전망에서 단지락 저항의 크기와 선로 공장에 따른 사고전류와 부하용량에 따른 기동전류의 경사각 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 사고감지 향상을 위한 선택 보호계전기의 운용 알고리즘을 제안한다.

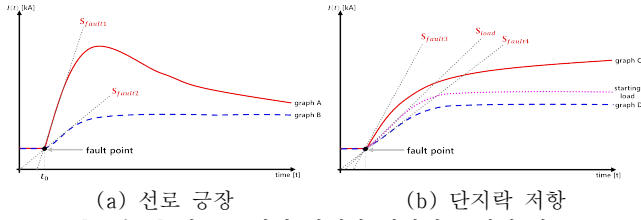
또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수전반부, 메인 컨버터부, 선택 보호계전기부, 등으로 구성된 1.5[kV]급 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에서 제안한 PSCAD/EMTDC 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 단지락 저항의 크기는 선로 공장에 따라 사고전류와 경사각의 크기, 피크 도달 시간, 일정 시간의 경사각, 등에 영향을 미침을 알 수 있고, 부하용량에 따라 기동전류의 경사각이 사고전류와 유사할 가능성을 확인할 수 있다. 또한, 선택 보호계전기의 새로운

보호요소는 기준 시간 $1(t_{ref})$, 기준 경사각 $1(S_{dt1})$, 기준 경사각 $2(S_{dt2})$, 지연 시간 $1(t_{dt1})$, 지연 시간 $2(t_{dt2})$, 피크 도달 시간 (t_{peak})을 제안한다. 상기에서 내용을 바탕으로 제안한 알고리즘의 운용특성을 평가한 결과, 새로운 보호요소를 적용한 선택 보호계전기는 높은 단지락 저항과 장거리에 따른 사고전류와 기동전류를 적절하게 판별할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

2. LVDC 배전망의 사고전류 경사각 특성

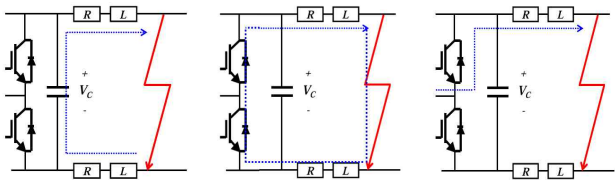
LVDC 배전망에 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 크기와 경사각은 그림 1과 같이, 선로 공장과 단지락 저항의 크기, 전력변환장치의 토폴로지, 등에 따라 서로 다른 특성을 나타낸다. 여기서, 선로 공장에 따른 사고전류의 경사각은 그림 1(a)와 같으며, 직하지점에서 graph A와 같이, 사고지점까지의 낮은 임피던스로 인하여 매우 큰 변화분(S_{fault1})을 가지고, 말단지점에서 graph B와 같이, 상대적으로 낮은 변화분(S_{fault2})을 나타낸다. 또한, 단지락 저항의 크기에 따른 사고전류의 경사각은 그림 1(b)와 같으며, graph C와 같이, 단지락 저항의 크기가 작으면 낮은 변화분(S_{fault3})을 나타내고, graph D와 같이,

단지락 저항의 크기가 크면 상대적으로 높은 변화분(S_{fault4})과 기동전류의 경사각(S_{load})과 유사하게 나타날 가능성이 있다.



(a) 선로 공장 (b) 단지락 저항
[그림 1] 선로 공장과 단지락 저항의 크기에 따른 LVDC 배전망의 사고전류 경사각 특성

한편, LVDC 배전망의 메인 컨버터는 계통의 AC 전압을 DC로 변환하여 배전선로에 전력을 공급하는데, 사고 발생 시, 전류의 흐름은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 2(a)는 사고 발생 순간을 나타내며, DC-Link 커패시터의 방전에 의해 사고전류가 유입됨을 알 수 있다. 또한, 그림 2(b)는 다이오드와 폐회로로 구성되어 사고전류가 흐르는 상태를 나타내며, DC-Link 커패시터가 방전되는 동안 선로 임피던스에 충전된 전류가 방전함을 알 수 있다. 한편, 그림 2(c)는 AC 전원에서 다이오드를 통해 사고전류가 생성되는 상태를 나타낸다. 따라서, LVDC 배전선로에서 사고 발생 시, 사고전류는 선로 임피던스와 컨버터의 커패시턴스, 등에 영향을 받음을 알 수 있다.



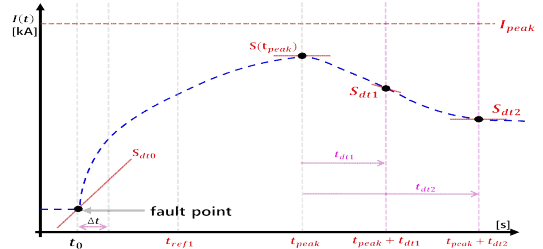
(a) 커패시터 방전 (b) 다이오드 환류 (c) AC 전원측 유입
[그림 2] LVDC 배전망의 사고전류 흐름도

3. 장거리 및 고저항 사고에 따른 선택 보호계전기의 운용 알고리즘

3.1 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 보호요소

LVDC 배전선로용 선택 보호계전기는 사고 유·무를 판단하기 위하여, 전류의 크기와 특정 구간의 경사각(di/dt)을 이용하여 사고 여부를 판별한다. 여기서, 사고를 판별하는 기존 보호요소는 전류의 크기($I(t)$)와 경사각($S(t)$), 최대 전류(I_{peak}), 초기 경사각(S_{dt0}), 기준 경사각(S_{dt1}), 기준 시간 I(t_{dt1}), 등으로 구성된다. 하지만, 사고전류의 경사각은 단지락 저항의 크기와 선로 공장에 따라 기동전류의 경사각과 유사하게 나타날 수 있어, 기존 보호요소에 의한 선택 보호계전기는 오동작을 발생시킬 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 LVDC 배전

망에서 선로 공장과 단지락 저항의 크기에 따른 사고전류와 기동전류의 경사각 특성을 분석하고, 이에 따른 새로운 보호요소인 기준 시간 1(t_{ref}), 기준 경사각 1(S_{dt1}), 기준 경사각 2(S_{dt2}), 지연 시간 1(t_{dt1}), 지연 시간 2(t_{dt2}), 피크 도달 시간 (t_{peak})을 제안한다.



[그림 3] LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 보호요소

3.2 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 운용 알고리즘

상기의 3.1절에서 제안한 선택 보호계전기의 보호요소를 바탕으로, 선로 공장과 단지락 저항의 크기에 따른 사고전류와 기동전류의 경사각 특성을 고려하여, 사고감지 향상을 위한 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 운용 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 선택 보호계전기의 보호요소인 전류의 크기($I(t)$)와 경사각($S(t)$), 최대 전류(I_{peak}), 초기의 기준 경사각(S_{dt0}), 기준 시간 1(t_{ref}), 기준 경사각 1(S_{dt1}), 기준 경사각 2(S_{dt2}), 지연 시간 1(t_{dt1}), 지연 시간 2(t_{dt2}), 피크 도달 시간 (t_{peak})을 상정한다.

[Step 2] 각 시간대 별로 전류($I(t)$)를 측정하고, 최대 전류(I_{peak})보다 큰 경우, 선택 보호계전기는 보호기기를 동작(trip)시키고, 작은 경우 [Step 3]으로 이동한다.

[Step 3] 각 시간대 별로 전류의 경사각($S(t)$)을 측정하여, 초기의 기준 경사각(S_{dt0})과 비교하고, 작은 경우에 [Step 2]로 이동한다.

[Step 4] 초기의 기준 경사각(S_{dt0})을 초과하는 시점(t_0)을 기준으로, t_{ref} 이전에 측정된 최대 전류의 경사각($S(t_{peak})$)과 t_{ref} 에 측정된 전류의 경사각($S(t_{ref})$)을 비교한다. 여기서, $S(t_{peak})$ 가 $S(t_{ref})$ 보다 큰 경우 [Step 5]로 진행하고, 작은 경우, 선택 보호계전기는 단거리 사고로 판단하여 보호기기를 동작(trip)시킨다.

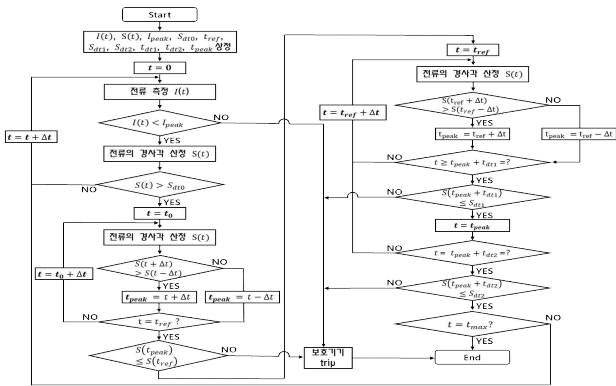
[Step 5] 기준 시간(t_{ref})을 기준으로, t_{peak} 의 지연시간(t_{dt1}) 이후에 측정된 전류의 경사각($S(t_{peak} + t_{dt1})$)

을 기준 경사각(S_{dt1})과 비교한다. 여기서, $S(t_{peak} + t_{dt1})$ 가 S_{dt1} 보다 작은 경우, 선택 보호계전기는 장거리 사고로 판단하여 보호기기를 동작(trip)시키고, 큰 경우, [Step 6]으로 이동한다.

[Step 6] t_{peak} 의 지연시간(t_{dt2}) 이후에 측정된 전류의 경사각($S(t_{peak} + t_{dt2})$)을 기준 경사각(S_{dt2})과 비교한다. 여기서, $S(t_{peak} + t_{dt2})$ 가 S_{dt2} 보다 작은 경우, 선택 보호계전기는 고저항 사고로 판단하여 보호기기를 동작(trip)시키고, 큰 경우, 기동부하로 판단하여 [Step 7]로 이동한다.

[Step 7] 전체 시간대(t_{max})까지 [Step 2]의 과정을 반복한다.

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 4와 같다.

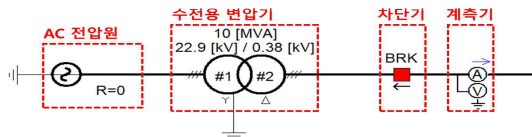


[그림 4] 사고감지 향상을 위한 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 운용 알고리즘

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 1.5kV급 LVDC 배전망의 모델링

4.1 수배전반부

수배전반부는 그림 5와 같이, AC 전압원과 수전용 변압기, 차단기, 계측기 등으로 구성된다. 여기서, AC 전압원은 AC 22.9[kV] 3상 4선식으로 구성되며, 수전용 변압기는 Y- Δ 결선 방식을 채용하여 22.9[kV]/380[V]의 변압비를 적용한다.

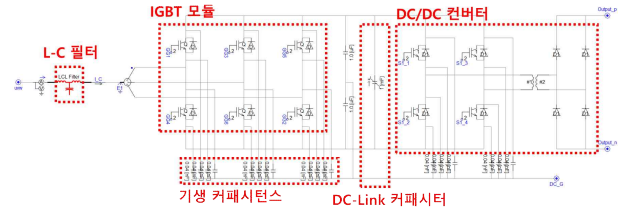


[그림 5] 수배전반부의 모델링

4.2 메인 컨버터부

메인 컨버터는 그림 6과 같이, IGBT 모듈, L-C 필터, DC-Link 커패시터, 기생 커패시턴스, DC/DC 컨버터, 등으로 구성된다. 여

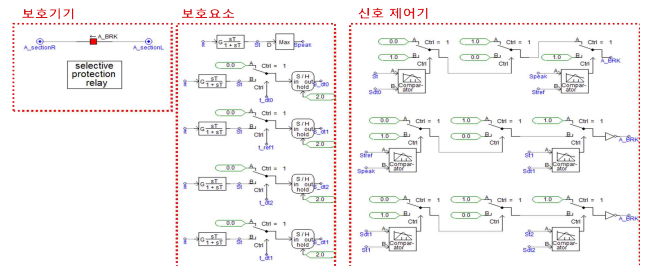
기서, IGBT 모듈은 3상 AC 380[V]를 DC 전압으로 변환하는 3-leg 구조를 상정한다. 또한, L-C 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고조파와 노이즈를 저감시키며, DC-Link 커패시터는 출력단의 DC 전압을 안정적으로 유지하는 역할을 수행한다. 한편, DC/DC 컨버터는 full-bridge 토폴로지를 채용하고, DC 전압을 강압하기 위하여 사용된다. 단, 기생 커패시턴스는 각 IGBT에 0.04[nF]의 값으로 병렬로 배분된다.



[그림 6] 메인 컨버터부의 모델링

4.3 선택 보호계전기부

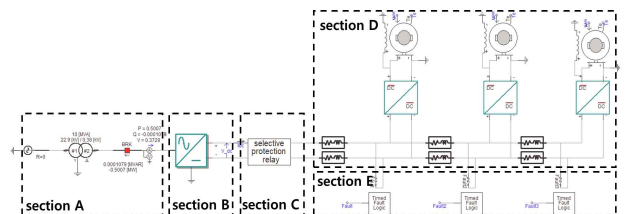
1.5kV급 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기는 그림 7과 같이, 보호기와 신호 제어기, 보호요소, 등으로 구성된다. 여기서, 선택 보호계전기의 신호 제어기는 보호요소를 바탕으로 사고를 판단하여 신호를 출력한다. 단, 차단기 개방 및 투입 저항은 각각 1[M Ω]과 1[$\mu\Omega$]으로 상정한다.



[그림 7] 선택 보호계전기의 모델링

4.4 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로 1.5kV급 LVDC 배전망의 전체 시스템을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, section A는 3상 4선식, Y-Yg 결선 방식, 연계용 변압기로 구성된 수배전반부이며, section B는 AC 전압을 DC 1.5[kV]로 변환하는 메인 컨버터를 나타낸다. 또한, section C는 선택 보호계전기이고, section D는 1.5[kV]급 DC 부하와 선로 저항, section E는 사고발생장치를 나타낸다.



[그림 8] 전체 시스템

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

상기의 4장에서 제시한 모델링을 바탕으로, 사고감지 향상을 위한 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 운용 알고리즘을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전선로의 선종은 FCV 120[mm²]으로 상정하고, 선로 저항은 0.253[Ω/km], 선로 인덕턴스는 0.8412[mH/km]를 적용한다. 또한, 계통의 운용조건을 고려하여, 선로의 공장은 0.2[km], 0.6[km], 1.0[km]으로 상정하고, 각 구간의 수용가는 500[kW]의 모터성 부하를 고려한다. 단, 단지락 저항의 크기는 선로 조건에 따라 산정된 0.5[Ω], 1.0[Ω], 2.0[Ω], 3.0[Ω]을 적용하고, 메인 컨버터의 DC 링크 커패시터는 9,800[μF]으로 상정한다.

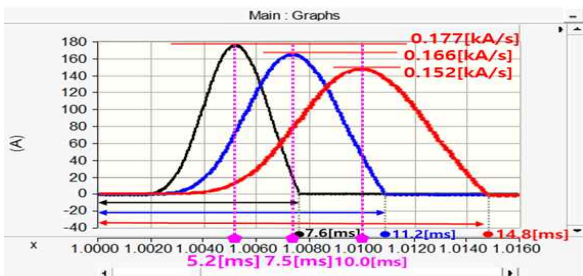
[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내역	항목		내역
선로 임피던스	저항 [Ω/km]	0.253	선로 길이[km]	0.2, 0.6, 1.0	
			부하 용량[kW]	200, 800	
	인덕턴스 [mH/km]	0.812	단지락 저항[Ω]	0.5, 2.0	
			DC 링크 커패시터[μF]	9,800	

5.2 1.5kV급 선택 보호계전기의 운용특성

5.2.1 LVDC 배전망의 기동 및 사고전류 경사각 특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, 단지락 저항이 0.5[Ω]인 경우의 사고지점별(0.2[km], 0.6[km], 1.0[km]) 사고전류의 경사각 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 사고전류의 경사각은 선로 구간별 각각 0.177[kA/s], 0.166[kA/s], 0.152[kA/s] 정도로 발생하며, 0[kA/s] 이내로 감소하는데 걸린 시간이 각각 7.6[ms], 11.2[ms], 14.8[ms], 피크까지 도달 시간은 각각 5.2[ms], 7.5[ms], 10.0[ms]임을 알 수 있다.



[그림 9] 선로 공장에 따른 LVDC 배전선로의 사고전류 경사각 특성

한편, 1.5kV급 LVDC 배전망에서 단지락 저항의 크기와 선로 공장에 따른 사고전류와 부하용량에 따른 기동전류의 경사각 특성을 종합하면 표 2와 같다. 여기서, 단거리 사고전류는 짧은 시간 동안 급격히 상승하고, 장거리 사고전류는 오랜 시간동안 상대적으로 작은 폭으로 상승함을 알 수 있다. 또한, 단지락 저항이 높은 경우, 사고전류 경사각이 매우 빠르게 감소하고, 기동전류의 경사각과 유사할 가능성이 있음을 알 수 있다.

[표 2] LVDC 배전망의 기동 및 사고전류 경사각 특성

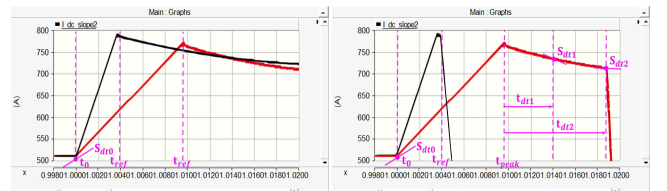
항목		사고전류 경사각[kA/s]		
내역	선로 공장 부하 용량	0.2[km]	0.6[km]	1.0[km]
		단지락 저항 [Ω]	0.5	200
800	0.177			0.166
1.0	200		0.118	0.114
	800		0.111	0.105
2.0	200		0.070	0.067
	800		0.064	0.061
기동 부하[W]	500	200	0.049	0.048
		400	0.045	0.043
		600	0.044	0.043
		800	0.042	0.041

5.2.2 LVDC 배전선로용 선택 보호계전기의 운용특성

상기의 5.2.1절에서 제시한 기동 및 사고전류 경사각 특성을 바탕으로, 사고감지 향상을 위한 선택 보호계전기의 보호요소를 산정하면 표 3과 같다. 이를 바탕으로 단지락 저항이 3.0[Ω]인 경우의 시뮬레이션을 수행한 결과, 선택 보호계전기는 그림 10과 같이, 사고지점별(0.2[km], 0.6[km], 1.0[km])로 사고전류를 적정하게 판별할 수 있음을 알 수 있다.

[표 3] 선택 보호계전기의 사고감지 향상을 위한 보호요소

항목	내역	항목	내역
전류의 경사각 측정	$S(t)$	지연 시간 1 (t_{dt1})	5.0[ms]
초기 기준 경사각 (S_{dt0})	0.03[kA/s]	지연 시간 2 (t_{dt2})	13.0[ms]
기준 시간 1 (t_{ref})	6.0[ms]	기준 경사각 1 (S_{dt1})	0.1[kA/s]
피크 도달 시간	t_{peak}	기준 경사각 2 (S_{dt2})	0.02[kA/s]



(a) 사고전류의 크기 (b) 선택 보호계전기의 동작특성 [그림 10] LVDC 배전선로의 공장별 사고전류 경사각 특성

6. 결론

본 논문에서는 LVDC 배전망에서 단지락 저항의 크기와 선로 공장에 따른 사고전류와 부하용량에 따른 기동전류의 경사각 특성을 분석하고, 사고감지 향상을 위한 선택 보호계전기의 운용 알고리즘을 제안한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 선택 보호계전기가 높은 단지락 저항과 장거리에 따른 사고전류와 기동전류를 적정하게 판별할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 강민관, 최성식, 이후동, 김기영, 노대석, “경전철용 LVDC 배전계통의 보호기기 운용방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 20, No. 4, pp. 25–34, 2019.