

LVDC 배전망에서 사고전류 경사각 특성을 고려한 선택 보호계전기의 구현 및 운용 특성에 관한 연구

김혜원*, 이민행*, 이강유*, 이수용*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:khw8805@koreatech.ac.kr

An Implementation and Operation Characteristics of Selective Protection Relay Using Fault Current Slope in LVDC Distribution System

Hye-Won Kim*, Min-Haeng Lee*, Gang-You Lee*,
Soo-Yong Lee*, Dae-Seok Rho*

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

요약

DC 배전선로용 선택 보호계전기는 전류의 크기와 일정 구간의 전류 변화량 등의 보호요소를 바탕으로 사고 여부를 판별한다. 하지만, 사고전류의 경사각은 사고 위치, 선로 임피던스, 단지락 저항, 부하 등과 같은 계통 조건에 따라 상이하게 나타날 수 있어, 기존 보호요소만을 적용할 경우, 선택 보호계전기는 오동작할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 선로 임피던스와 단지락 저항의 크기에 따른 DC 배전망의 사고전류 경사각 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 사고전류를 정확하게 판별하는 lab-scale 규모의 선택 보호계전기를 구현한다. 여기서, 선택 보호계전기는 전압 및 전류센서로 구성된 계측부와 CCS S/W 기반의 감시제어부, 모의 DC 배전망은 메인 컨버터, 모의선로 임피던스, DC 부하, 사고 모의장치 등으로 구성된다. 상기의 내용을 바탕으로 운용 특성을 분석한 결과, 본 연구에서 구현한 선택 보호계전기는 기동전류와 사고전류를 정확하게 판별하여 오동작을 방지할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 전 세계적인 탄소중립 정책과 신재생에너지의 보급 확대 등으로 인하여, 수용성 한계를 극복하기 위한 방안 중의 하나로 DC 배전망이 주목받고 있지만, 안정적인 운용과 보호협조에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, DC 배전망에서 사고가 발생하는 경우, 선택 보호계전기는 사고 유·무를 판단하기 위하여, 전류의 크기와 특정 구간의 경사각(di/dt)을 측정하고, 이를 보호요소와 비교하여 사고 여부를 판별한다. 하지만, 사고전류의 경사각은 사고 위치, 선로 임피던스, 단지락 저항, 부하 등에 따라 상이하게 나타날 수 있어, 기존 보호요소만을 적용할 경우, 선택 보호계전기는 오동작할 가능성이 있다[1]. 따라서, 본 논문에서는 선로 임피던스와 단지락 저항의 크기에 따른 DC 배전망의 사고전류 경사각 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 사고전류를 판별하는 이를 바탕으로 사고전류를 정확하게 판별하는 선택 보호계전기를 구현한다.

한편, 상기의 내용을 바탕으로 선택 보호계전기의 운용 특성을 평가하기 위하여, lab-scale로 축약한 1[kW], 200[V]급 선택 보호계전기와 모의 DC 배전망으로 구성된 시험장치를 구현한다. 여기서, 선택 보호계전기는 전압 및 전류센서로 구성된 계측부와

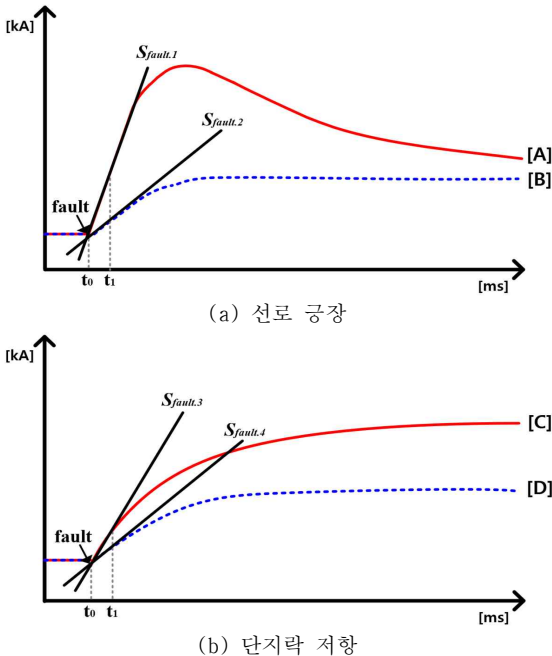
CCS S/W 기반의 감시제어부 등으로 구성된다. 또한, 1[kW], 200[V]급 모의 DC 배전계통부는 메인 컨버터, 모의선로 임피던스, DC 부하, 사고모의장치 등으로 구성된다. 상기의 내용을 바탕으로 시험을 수행한 결과, 사고전류의 경사각은 기동전류 경사각보다 높게 나타나고, 선로 임피던스의 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있다. 또한, 제안한 사고 검출방식을 바탕으로 선택 보호계전기의 운용 특성을 평가한 결과, 선택 보호계전기가 기동전류와 사고전류를 구별하여 차단기의 트립 신호를 출력함을 확인할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

2. DC 배전망에서 선택 보호계전기의 운용특성

2.1 DC 배전망의 사고전류 경사각 특성

일반적으로, LVDC 배전망에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 경사각은 선로 임피던스, 단지락 저항의 크기, 전원 및 컨버터, 등에 따라 다른 특성을 나타낸다[2]. 먼저, 그림 1은 선로 임피던스와 단지락 저항의 크기에 따른 사고전류의 경사각 특성을 나타낸다. 여기서, 그림 1의 (a)는 선로 임피던스에 따른 사고전류의 경사각 특성을 나타내며, 직하 지점에서 사고가 발생한 경우, 사고전류는 graph A와 같이, 매우 큰 변화분(S_{fault1})을

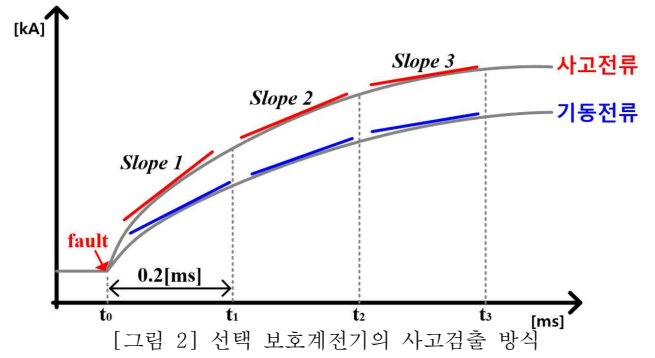
나타냄을 알 수 있다. 또한, 말단지점에서 사고가 발생한 경우, 사고전류는 graph B와 같이, 높은 선로 임피던스에 의해 작은 변화분(S_{fault2})을 나타낸다. 한편, 그림 1의 (b)는 단지락 저항의 크기에 따른 사고전류의 경사각 특성을 나타내며, 단지락 저항의 크기가 큰 경우, 사고전류의 경사각은 graph C와 같이, 큰 변화분(S_{fault3})을 가지고, 작은 경우 graph D와 같이, 작은 변화분(S_{fault4})을 나타냄을 알 수 있다.



[그림 1] LVDC 배전망의 사고전류 경사각 특성

2.2 선택 보호계전기의 사고 검출방식

DC 배전망에서 선택 보호계전기는 사고 유·무를 판단하기 위하여, 전류의 크기와 특정 구간의 경사각(di/dt)을 측정하고, 이를 보호요소와 비교하여 사고 여부를 판별한다. 하지만, 사고전류의 경사각은 사고 위치, 선로 임피던스, 단지락 저항, 부하 등에 따라 상이하게 나타날 수 있어, 기존 보호요소만을 적용할 경우, 선택 보호계전기는 오동작할 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 선로 임피던스와 단지락 저항의 크기에 따른 DC 배전망의 사고전류 경사각 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 그림 2와 같이, 사고전류를 판별하는 선택 보호계전기를 구현한다. 여기서, 그림 2는 사고 판별을 위한 측정구간을 나타내는데, 사고 또는 기동부하 발생 이후 일정 시간 간격으로 전류의 크기와 변화량을 반복적으로 측정하고, 각 구간별 전류의 경사각을 산정한다. 즉, 구간별 측정된 경사각의 평균값을 바탕으로, 보호요소를 산정하고, 이를 측정값과 비교하여 사고전류를 판별한다.

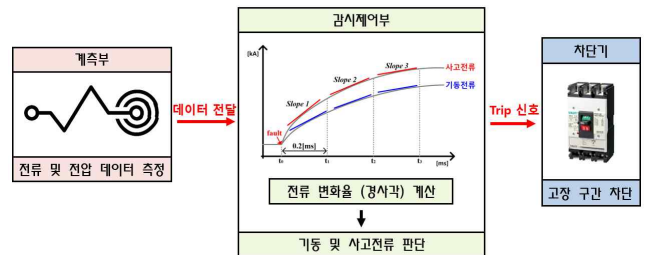


[그림 2] 선택 보호계전기의 사고검출 방식

3. 사고전류 경사각 특성을 고려한 선택 보호계전기의 구현

3.1 1kW 200V급 선택 보호계전기

상기의 2.2절에서 제시한 사고검출 방식을 평가하기 위한 선택 보호계전기는 DC 배전망을 lab-scale로 축약하여 1[kW], 200 [V]급으로 구현하며, 그림 3과 같이 계측부, 감시제어부 등으로 구성된다. 여기서, 감시제어부는 전압 및 전류 센서, 등으로 구성된 계측부를 통해 전류의 크기와 일정한 시간 구간의 전류 변화량을 반복적으로 측정하며, 산정된 평균값을 보호요소로 상정한다. 즉, 감시제어부는 판단 결과를 기반으로 트립(trip)신호를 생성하고, 차단기는 이를 통해 동작한다.

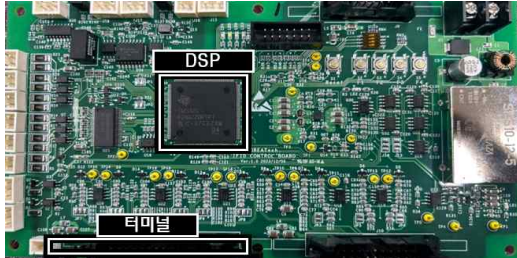


[그림 3] 선택 보호계전기의 구성도

구체적으로, 선택 보호계전기의 계측부는 그림 4의 (a)와 같이, 전압 및 전류 센서 등으로 구성되어, 컨버터 측과 수용가 측의 전압과 전류를 측정한다. 또한, 감시제어부는 그림 4의 (b)와 같이, 제어 및 통신을 담당하는 제어 보드와 CCS(code composer studio) S/W로 구성된다. 여기서, 제어 보드는 DSP(digital signal processor)를 통해 변환된 ADC 데이터를 바탕으로, CCS S/W를 통해 보호요소를 산정하고, 기동 및 사고전류를 구분하여 차단기의 트립 신호를 출력한다.



(a) 계측부

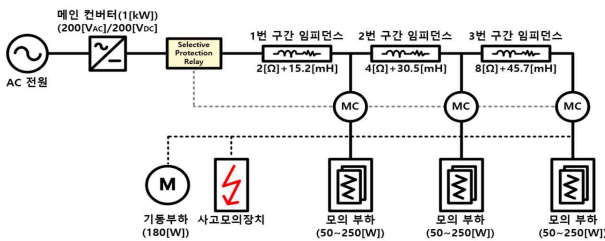


(b) 감시제어부

[그림 4] 선택 보호계전기의 구성

3.2 모의 DC 배전망

상기에서 제시한 1[kW], 200[V]급 선택 보호계전기의 운용 특성을 평가하기 위한 모의 DC 배전계통은 그림 5와 같이, 메인 컨버터, 모의선로 임피던스, DC 부하, 사고모의장치 등으로 구성된다. 여기서, 메인 컨버터는 AC/DC 컨버터로 상정하고, 모의선로 임피던스는 저항 및 리액턴스 성분의 조합으로 MC를 통해 가변할 수 있도록 구성한다. 또한, DC 부하는 선로 구간을 고려하여 최대 250[W]까지 가변할 수 있도록 구현하고, 기동 부하는 모터성 부하를 적용한다. 단, 사고모의장치는 계통의 운용조건을 고려하여 상정한다.



[그림 5] 모의 DC 배전망의 구성도

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서 제안한 시험장치를 바탕으로, 선택 보호계전기의 운용 특성을 평가하기 위한 시험 조건을 나타내면 표 1과 같다. 여기서, 메인 컨버터는 1[kW] 용량으로 상정하고, 모의선로 임피던스는 선로의 전압강하 5[%], 10[%], 15[%]을 고려하여, 각각 2[Ω]+15.2[mH], 4[Ω]+30.5[mH], 8[Ω]+45.7[mH]으로 가변할 수 있도록 구성한다. 또한, DC 부하는 각 구간당 최대 250[W]로

상정한다. 단, 기동 부하는 계통의 운용조건을 고려하여 180[W]의 모터성 부하를 적용하고, 사고모의장치는 단지락 저항의 크기를 20[Ω]으로 결정한다.

[표 1] 시험 조건

항 목	내 역	
메인 컨버터	정격 용량[kW]	1
	입력 전압[V]	220
	출력 전압[V]	200
모의선로 임피던스	1번 구간	2[Ω]+15.2[mH]
	2번 구간	4[Ω]+30.5[mH]
	3번 구간	8[Ω]+45.7[mH]
DC 부하	250[W]	
기동 부하	180[W]	
단지락 저항	20[Ω]	

한편, 사고전류와 기동전류의 경사각 특성을 평가하기 위한 상정 시나리오는 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Case I ~ Case III은 기동 부하의 투입 조건을 나타낸 것으로, 1번 구간, 2번 구간, 3번 구간으로 상정한다. 한편, Case IV ~ Case VI은 사고의 발생 조건을 나타낸 것으로, 기동 부하와 동일하게 상정한다.

[표 2] 기동 및 사고전류 상정 시나리오

시나리오	선로 구간
Case I	1번 구간
Case II	2번 구간
Case III	3번 구간
Case IV	1번 구간
Case V	2번 구간
Case VI	3번 구간

4.2 1kW 200V급 모의 DC 배전망에서 기동 및 사고전류의 경사각 특성

상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로, 선로 임피던스와 단지락 저항의 크기에 따른 기동 및 사고전류의 경사각 특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 1번 구간의 경우, 기동전류의 경사각은 0.2[ms]를 간격으로, 각각 3.26[A/ms], 3.19[A/ms], 2.45[A/ms]로 산정된다. 또한, 사고전류의 경사각은 0.2[ms]를 간격으로, 각각 9.98[A/ms], 9.97[A/ms], 3.51[A/ms]으로 측정됨을 알 수 있다.

[표 3] 각 구간별 기동 및 사고전류의 경사각 특성

구 분		slope 1 [A/ms]	slope 2 [A/ms]	slope 3 [A/ms]	평균값 [A/ms]
1번 구간	기동전류	3.26	3.19	2.45	2.97
	사고전류	9.98	9.97	3.51	7.82
2번 구간	기동전류	1.73	1.81	1.72	1.75
	사고전류	3.63	2.75	2.19	2.86
3번 구간	기동전류	0.75	1.12	1.05	0.97
	사고전류	1.79	1.42	1.38	1.53

한편, 모든 구간에서 사고전류의 경사각은 기동전류 경사각보

다 높게 나타나고, 선로 임피던스의 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 구간별 보호요소는 상위구간 기동전류류의 평균값과 해당 구간 사고전류류 평균값의 중간값을 상한 영역, 해당 구간의 사고전류류와 기동전류류의 중간값을 하한 영역으로 고려하여 산정한다. 따라서, 1번 구간에서 정정치의 상한 및 하한값은 각각 0[A/ms], 5.4[A/ms]이며, 2번 구간은 각각 2.92[A/ms], 2.31[A/ms], 3번 구간은 각각 1.64[A/ms], 1.25[A/ms]로 산정됨을 알 수 있다.

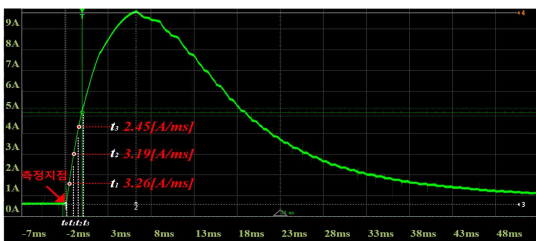
[표 4] 각 구간별 사고 판단을 위한 보호요소

구분	정정치의 상한 [A/ms]	정정치의 하한 [A/ms]
1번 구간	-	5.40
2번 구간	2.92	2.31
3번 구간	1.64	1.25

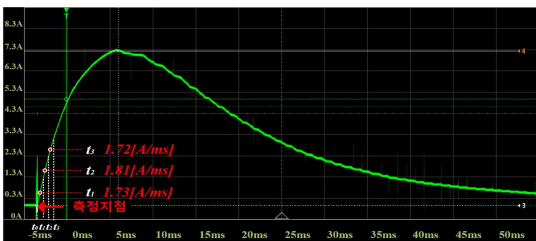
4.3 1kW 200V급 선택 보호계전기의 운용 특성

4.3.1 기동전류에 의한 선택 보호계전기의 운용 특성

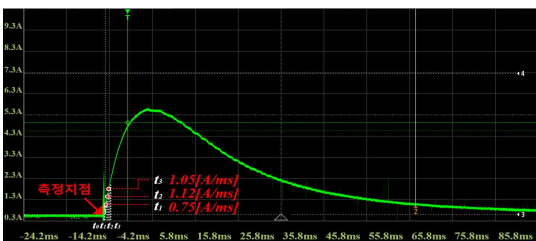
상기의 표 1에서 제시한 기동전류류 상정 시나리오를 바탕으로, 선택 보호계전기의 운용 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 (a), (b), (c)는 각각 case I, case II, case III의 경우를 나타낸다. 즉, 상기의 표 4에서 제시한 보호요소를 바탕으로, 선택 보호계전기는 기동전류로 판별하여, 보호기기의 트립 신호를 출력하지 않음을 확인할 수 있다.



(a) case I의 기동전류



(b) case II의 기동전류

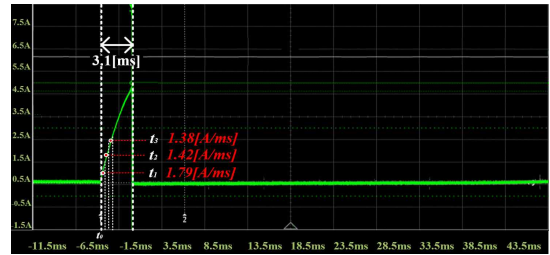


(c) case III의 기동전류

[그림 7] 기동전류에 의한 선택 보호계전기의 운용 특성

4.3.2 사고전류에 의한 선택 보호계전기의 운용 특성

상기의 표 1에서 제시한 사고전류류 상정 시나리오를 바탕으로, 선로 임피던스가 가장 큰 조건인 case VI의 선택 보호계전기의 운용 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 사고전류류의 경사각은 사고 발생 이후 0.2[ms] 간격으로 각각 1.79[A/ms], 1.42[A/ms], 1.38[A/ms]로 산정된다. 즉, 측정된 사고전류류의 경사각은 3번 구간의 보호요소 동작 범위 내에 포함되어 사고로 판별함을 알 수 있다. 따라서, 선택 보호계전기는 사고 발생 후 약 4[ms] 이내에 사고전류류와 기동전류류를 정확하게 판별함을 알 수 있다.



[그림 8] 사고전류에 의한 선택 보호계전기의 운용 특성

5. 결 론

본 논문에서는 선로 임피던스와 단지락 저항의 크기에 따른 DC 배전망의 사고전류류 경사각 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 사고전류류를 정확하게 판별하는 선택 보호계전기와 lab-scale 규모의 모의 DC 배전망을 구현한다. 상기의 내용을 바탕으로 시험을 수행한 결과, 선택 보호계전기는 기동전류류와 사고전류류를 정확하게 판별하여 선택 보호계전기의 오동작을 방지할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2026년도 정부(산업통상부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00409639, 2026년 산업혁신인재성장지원사업)

참고문헌

- [1] 강민관, 최성식, 이후동, 김기영, 노대석, “경전철용 LVDC 배전계통의 보호기기 운용방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 20, No. 4, pp. 25-34, 2019.
- [2] 한병길, 박재범, 김윤호, 이나경, 최성문, 노대석, “DC 배전계통에서 사고전류류 경사각을 이용한 지능형 사고구간 분리용 보호장치의 제어 알고리즘에 관한 연구”, 대한전기학회논문지, vol. 25, No. 11, pp. 18-31, 2024.