

# 고 저항, 장거리 LVDC 배전선로용 선택계전기의 운용 방안에 관한 연구

이민행\*, 김혜원\*, 김윤호\*, 김지명\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:dlalsgod97@koreatech.ac.kr

## An Operation Method of Selective Protection Relay in High Resistance and Long Length LVDC Distribution System

Min-Haeng Lee\*, Hye-Won Kim\*, Yun-Ho Kim\*,

Ji-Myung Kim\*, Dae-Seok Rho\*

\*Dept. of Electrical, Electronic, Korea University of Technology and Education

### 요 약

최근, DC 배전망은 신재생에너지의 수용성 한계를 극복하기 위한 방안 중의 하나로 주목받고 있지만, 전기설비 기술 기준과 안전 운용절차의 미흡으로, DC 배전망에 관한 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 특히, DC 배전망에서 사고가 발생하는 경우, 단시간에 높은 상승률을 나타내는 사고전류의 경사각이 단락 저항과 선로 공장에 따라 부하전류의 경사각과 유사하게 나타날 수 있어, 선택계전기의 부동작을 발생시킬 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점을 해결하기 위하여, 단락 저항과 선로 공장에 따른 LVDC 배전망의 부하 및 사고전류의 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 사고감지 향상을 위한 선택계전기의 운용 방안을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 메인 컨버터, 사고발생장치, 선택계전기, DC 부하, 등으로 구성된 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 상기에 서 제안한 PSCAD/EMTDC 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 본 논문에서 제안한 사고감지 향상을 위한 선택계전기의 운용방안이 기존의 운용 방안과 달리, 높은 단락 저항과 장거리 사고인 경우에도 사고전류와 부하전류를 적절하게 판별할 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서 론

최근, 정부는 친환경 에너지 정책의 일환으로 신재생에너지 보급을 확대하고 있지만, 기존 AC 배전망의 수용성 한계로 인하여 신재생에너지 전원의 효율적인 계통 연계가 어려운 상황이다[1]. 이를 극복하기 위한 방안 중의 하나로 DC 배전망이 주목을 받고 있지만, 기존 AC 배전망과 달리 DC 배전망의 안정적인 운용 및 보호협조에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, LVDC 배전망에서 단거리 사고는 커패시터의 방전과 낮은 임피던스에 의하여 짧은 시간 동안 높은 사고전류를 발생시키는데, 단락저항이 크거나, 장거리 지점에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류는 부하전류와 비슷하거나 더 작게 나타날 수 있어, 이에 대한 적절한 운용 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점을 해결하기 위하여, LVDC 배전망의 부하 및 사고전류의 특성을 분석하고, 새로운 보호요소인 경사각  $I(S_{end2})$ , 지연시간  $I(t_{exp})$ 을 적용하여, 사고감지 향상을 위한 선택계전기의 운용 방안을 제시한다.

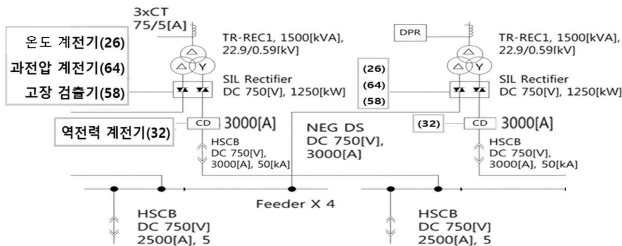
이용하여 메인 컨버터, 사고발생장치, 선택계전기, DC 부하, 등으로 구성된 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 구체적으로, 선택계전기는 사고를 판별하기 위하여 최대 부하전류 ( $I_{peak}$ ), 초기 경사각( $S_{start}$ ), 경사각 II( $S_{end1}$ ), 지연시간  $II(t_r)$ 의 기존 보호요소와 경사각 I( $S_{end2}$ ), 지연시간  $I(t_{exp})$ 의 새로운 보호요소를 적용한다. 상기에서 제안한 PSCAD/EMTDC 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 단락저항이 0.1[Ω]인 경우, 사고전류는 사고지점에 관계없이 기존 보호요소만으로 정상적으로 차단됨을 알 수 있다. 하지만, 단락저항이 3[Ω]인 경우, 사고전류는 기존 보호요소만을 적용한 선택계전기로 검출하기 어렵지만, 본 논문에서 제시한 운용방안에 따른 새로운 보호요소( $S_{end1}$ ,  $t_{exp}$ )를 적용하면, 고저항 단락사고로 판단하여 사고전류가 정상적으로 차단됨을 알 수 있다. 따라서, 사고지점의 단락 저항이 높거나 장거리 선로인 경우에도, 선택계전기가 사고전류와 부하전류를 적절하게 판별할 수 있어, 본 논문에서 제안한 사고감지 향상을 위한 운용 방안의 유용성을 알 수 있었다.

또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/ EMTDC를

### 2. LVDC 배전망의 보호기기 특성분석

## 2.1 LVDC 배전망의 보호기기 구성

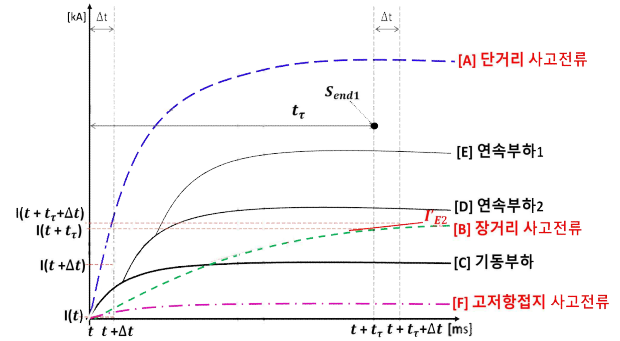
1.5[kV] 경전철용 LVDC 배전망에서 배전선로의 보호기기는 그림 1과 같이 온도 계전기(26), 고장 검출기(58), 역전력 계전기(32), 단락 과전압 계전기(64), 직류고장 선택계전기(50F), 등으로 구성된다. 여기서, 온도 계전기(26)는 배전선로나 전력장치의 과열을 감지하여 기기의 열적 손상을 방지하기 위해 동작하며, 역전력 계전기(32)는 전력변환기기 내부의 스위칭 소자들을 역방향 전력 유입으로부터 보호하기 위해 사용된다. 또한, 고장 검출기(58)는 단락이나 지락, 등의 이상 전류 발생 시, 이를 신속히 감지하여 회로 차단을 통해 전체 시스템을 보호한다.



[그림 1] 1.5[kV] 경전철용 직류급전시스템의 구성도

## 2.2 기존 선택계전기의 운용 방안

1.5[kV] 경전철용 LVDC 배전망에서 부하와 사고전류의 특성을 나타내면 그림 2와 같다. 여기서, 사고전류는 단거리[A], 장거리[B], 고저항 접지[F], 등 다양한 조건에 의해 발생하는 유형으로 분류되고, 기동전류는 (C), (D), (E)의 3가지 형태로 구분된다. 먼저, 단거리 사고전류는 짧은 시간 동안 급격히 상승하고, 장거리 사고전류는 오랜 시간동안 상대적으로 작은 폭으로 상승하는 특성을 나타내는데, 이는 기존 보호요소인 최대 부하전류( $I_{peak}$ ), 초기 경사각( $S_{start}$ ), 경사각 II( $S_{end1}$ ), 지연시간 II( $t_r$ )를 이용하여, 사고를 구분한다. 즉, 선택계전기(50F)는 사고를 판별하기 위하여 일정한 시간 구간에서 전류의 변화량을 나타내는 전류 경사각( $di/dt$ )를 이용하여, 단거리 및 장거리 고장에 의한 사고전류와 기동 및 부하전류를 판별할 수 있다. 하지만, 고저항접지 사고(F)는 단거리 사고(A)와 기동부하(C, D, E) 변동의 전류 크기와 변화량보다 작아질 가능성이 있어, 기존 보호요소만으로 사고를 감지하기 어려움을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 새로운 보호요소인 경사각 I( $S_{end2}$ ), 지연시간 I( $t_{exp}$ )을 적용하고, 사고감지 향상을 위한 선택계전기의 운용 방안을 제안한다.

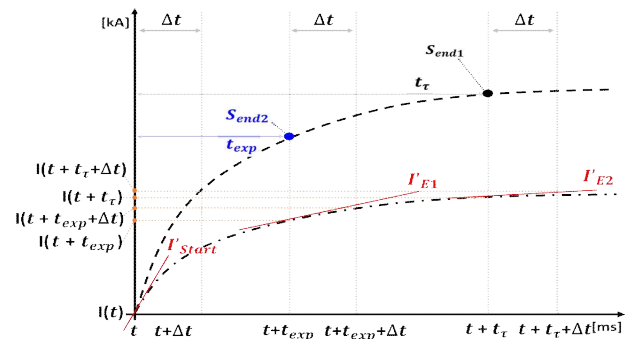


[그림 2] 1.5[kV] 경전철용 LVDC 배전망의 부하와 사고전류의 특성

## 3. 고 저항, 장거리 LVDC 배전선로용 선택계전기의 운용 방안

### 3.1 제안한 선택계전기의 보호요소

2.2절에서 제시한 사고 감지를 위한 기존 선택계전기의 운용 방안을 바탕으로, 본 논문에서는 1.5[kV] LVDC 배전망의 사고 감지 향상을 위한 선택계전기의 새로운 운용방안을 제안한다. 먼저, 선택계전기는 그림 3과 같이, 전류의 크기와 일정한 시간 구간의 전류 변화량을 측정하며, 보호요소별 정정치와 비교하여 사고 여부를 결정한다. 여기서, 기존 보호요소는 최대 부하전류( $I_{peak}$ ), 초기 경사각( $S_{start}$ ), 경사각 II( $S_{end1}$ ), 지연시간 II( $t_r$ )로 구성되는데, 사고 감지를 향상시키기 위하여, 경사각 I( $S_{end2}$ ), 지연시간 I( $t_{exp}$ )의 새로운 보호요소를 적용한다. 즉, 사고감지 향상을 위한 선택계전기는 최대 부하전류( $I_{peak}$ ), 초기 경사각( $S_{start}$ ), 경사각 I( $S_{end2}$ ), 경사각 II( $S_{end1}$ ), 지연시간 I( $t_{exp}$ ), 지연시간 II( $t_r$ )으로 구성된다. 따라서, 본 논문은 단거리, 장거리, 고저항, 등의 단락사고에서 나타나는 전류의 경사각 특성을 바탕으로, 선택계전기의 사고 감지를 향상하기 위하여, 기존 지연시간( $t_r$ ) 이전의  $t_{exp}$  시점에서 산정한 전류 경사각( $S_{end1}$ )을 추가적인 보호요소로 제시한다.



[그림 3] LVDC 배전망용 선택계전기의 보호요소

### 3.2 제안한 선택계전기의 운용 방안

상기의 3.1절에서 제안한 선택계전기의 구성을 바탕으로 부하와 사고전류를 적절하게 판별하기 위하여, 본 논문에서는 사고감지 향상을 위한 LVDC 배전선로용 선택계전기의 운용 방안을 제시한다. 여기서, 선택계전기는 실시간으로 전류( $I(t)$ )를 측정하며, 측정된 전류( $I(t)$ )가  $I_{peak}$ 를 초과하면 사고로 판단한다. 또한, 측정된 전류( $I(t)$ )가  $I_{peak}$ 보다 작은 경우, 운용 조건에 따라 선택계전기가 사고전류를 감지하지 못할 수 있으므로, 식 (1)과 같이, 각 시간대 별로 전류의 경사각( $I'_s$ )을 측정한다. 한편,  $I'_s$ 값이  $S_{start}$ 보다 큰 경우, 식 (2)에 의해 산정된  $t_{exp}$  이후의 전류 경사각( $I_{E1}'$ )을  $S_{end1}$ 과 비교하고, 그 값이  $S_{end1}$ 보다 작은 경우, 고저항접지 사고로 판단한다. 또한,  $I'_s$ 값이  $S_{start}$ 보다 작거나,  $I_{E1}'$ 값이  $S_{end1}$ 보다 큰 경우, 식 (3)에 의해 산정된  $t_r$  이후의 전류 경사각( $I_{E2}'$ )을  $S_{end2}$ 와 비교하고, 그 값이  $S_{end2}$ 보다 크면 장거리 사고로, 작으면 부하전류로 판단한다.

$$I'_s(t) = \frac{I(t+\Delta t) - I(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

$$I_{E1}'(t) = \frac{I(t+t_{exp}+\Delta t) - I(t+t_{exp})}{\Delta t} \quad (2)$$

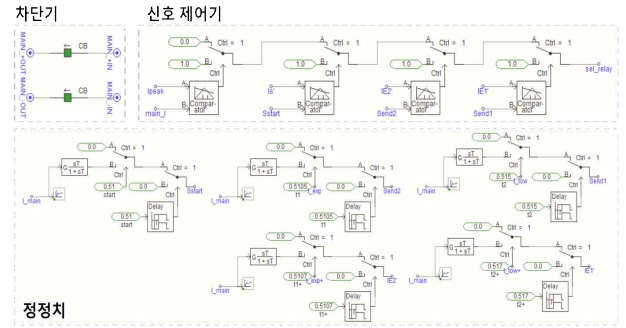
$$I_{E2}'(t) = \frac{I(t+t_r+\Delta t) - I(t+t_r)}{\Delta t} \quad (3)$$

여기서,  $I'_s$  : 전류 경사각,  $I_{E1}'$  :  $t_{exp}$  이후의 전류 경사각,  $I_{E2}'$  :  $t_r$  이후의 전류 경사각

#### 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 LVDC 배전선로용 선택계전기의 모델링

##### 4.1 선택계전기 모델링

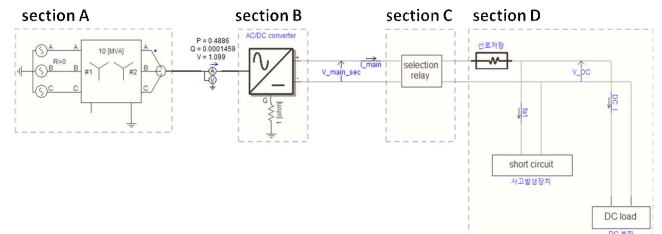
LVDC 배전망에서 사고감지 향상을 위한 선택계전기는 그림 4와 같이, 차단기와 신호 제어기, 정정치, 등으로 구성된다. 여기서, 선택계전기의 동작 신호를 받는 차단기는 LVDC 배전선로에 위치하며, 차단기 개방 및 투입 저항은 각각  $1[M\Omega]$ 과  $1[\mu\Omega]$ 으로 상정한다. 또한, 선택계전기의 신호 제어기는 정정치를 바탕으로 사고를 판단하여 신호를 출력하는데, 정정치는 기존 보호요소인 최대 부하전류( $I_{peak}$ ), 초기 경사각( $S_{start}$ ), 경사각 II( $S_{end1}$ ), 지연시간 II( $t_r$ ), 등을 고려하고, 3.2절에서 제시한 식 (1) ~ 식 (3)을 바탕으로 새로운 보호요소인 경사각 I( $S_{end2}$ ), 지연시간 I( $t_{exp}$ )을 적용한다.



[그림 4] 선택계전기의 모델링

##### 4.2 LVDC 배전망의 모델링

상기의 3.2.2절에서 제시한 사고감지 향상을 위한 선택계전기의 운용 방안을 평가하기 위하여, 선택계전기를 적용한 LVDC 배전망의 모델링을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서, section A는 3상 4선식, Y-Yg 결선 방식, 연계용 변압기로 구성된 수배전반부이며, section B는 AC 전압을 DC 1.5[kV]로 변환하는 AC/DC 컨버터를 나타낸다. 또한, section C는 차단기와 신호 제어기로 구성된 선택계전기이고, section D는 1.5[kV]급 DC 부하와 선로 저항, 사고발생장치 등으로 구성된다.



[그림 5] LVDC 배전망의 모델링

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

##### 5.1 시뮬레이션 조건

상기의 4장에서 제시한 모델링을 바탕으로 사고감지 향상을 위한 LVDC 배전선로용 선택계전기의 운용 방안을 평가하기 위하여, 시뮬레이션 조건을 나타내면 표 1과 같다. 여기서, 배전선로의 선종은 ACSR 120[mm<sup>2</sup>]으로 상정하여 선로 저항을 0.253[ohm/km]을 적용한다[2]. 또한, 선로의 공장은 최대 10[%]의 전압강하를 고려하여 0.1[km], 1.0[km], 2[km]로 상정하고, 부하용량은 500[kW]를 적용한다. 단, 단락 저항은 선로 조건에 따라 산정된 0.1[Ω], 3.0[Ω]으로 상정한다.

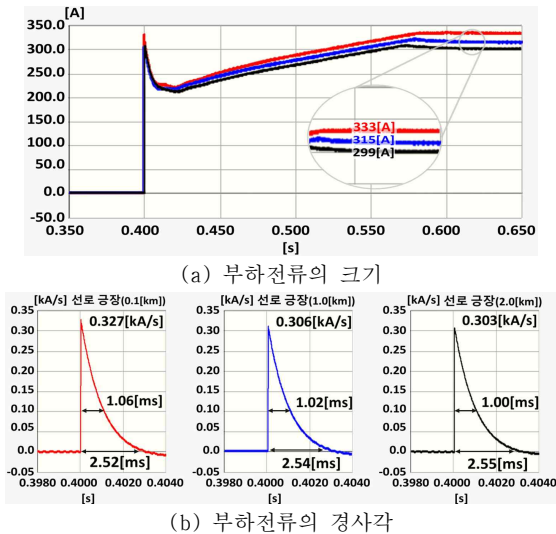
[표 1] 시뮬레이션 조건

| 항 목           | 내 역           |
|---------------|---------------|
| 선로 저항[ohm/km] | 0.253         |
| 선로 길이[km]     | 0.1, 1.0, 2.0 |
| 부하 용량[kW]     | 500           |
| 단락 저항[Ω]      | 0.1, 3.0      |

## 5.2 LVDC 배전망에서 선택계전기의 운용특성

### 5.2.1 선로 공장에 따른 부하전류 특성

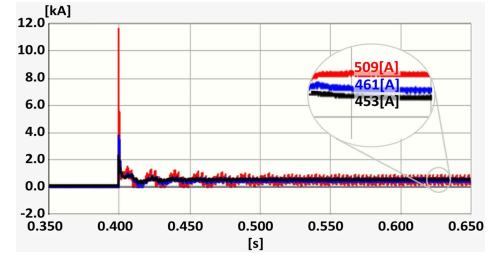
LVDC 배전망에서 선로 공장에 따른 부하전류의 크기와 경사각 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6(a)는 선로 공장별(0.1[km], 1.0[km], 2.0[km]) 전류의 크기를 나타내는데, 부하의 전류가 각각 333[A], 315[A], 299[A]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, 그림 6(b)는 부하전류의 경사각 특성을 나타내는데, 부하의 경사각이 각각 0.327[kA/s], 0.306[kA/s], 0.303[kA/s]이며, 0.1[kA/s] 이내 도달 시간이 각각 1.06[ms], 1.02[ms], 1.02[ms]임을 알 수 있다. 또한, 경사각이 0[kA/s] 이내 도달하는데 각각 2.52[ms], 2.54[ms], 2.55[ms] 소요됨을 알 수 있다.



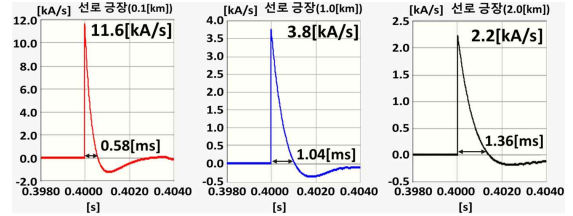
[그림 6] LVDC 배전망의 부하전류 특성

### 5.2.2 선로 공장과 단락 저항의 크기에 따른 사고전류 특성

LVDC 배전망에서 선로 공장과 단락 저항의 크기에 따른 사고전류 특성을 분석하기 위하여, 단락 저항이 0.1[Ω]인 경우의 선로 공장별 사고전류 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 선로 공장(0.1[km], 1.0[km], 2.0[km])에 따른 사고전류는 각각 509 [A], 461[A], 453[A]이고, 경사각은 각각 11.6[kA/s], 3.8[kA/s], 2.2[kA/s]임을 알 수 있다. 또한, 경사각이 0.1[kA/s] 이내 도달하는데 각각 0.58[ms], 1.04[ms], 1.36[ms] 소요됨을 알 수 있다.



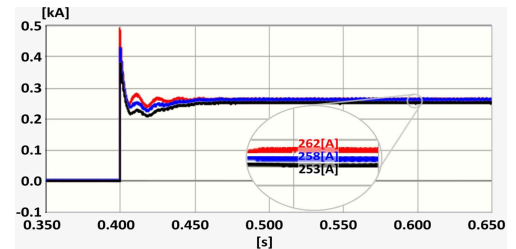
(a) 사고전류의 크기



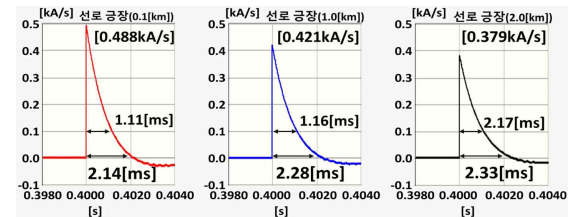
(b) 사고전류의 경사각

[그림 7] 단락저항(0.1[Ω])에 따른 선로공장별 사고전류 특성

한편, 단락 저항이 3.0[Ω]인 경우의 선로공장별 사고전류 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 선로 공장(0.1[km], 1.0[km], 2.0[km])에 따른 사고전류는 각각 262[A], 258[A], 253[A]이고, 경사각은 각각 0.488[kA/s], 0.421[kA/s], 0.379[kA/s]이며, 0.1[kA/ms] 이내 도달 시간이 각각 1.11[ms], 1.16[ms], 2.17[ms]임을 알 수 있다. 또한, 경사각이 0[kA/s] 이내 도달하는데 각각 2.14[ms], 2.28[ms], 2.33[ms] 소요됨을 알 수 있다.



(a) 사고전류의 크기



(b) 사고전류의 경사각

[그림 8] 단락저항(3.0[Ω])에 따른 선로공장별 사고전류 특성

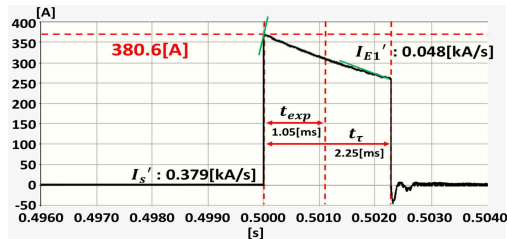
### 5.2.3 제안한 선택계전기의 운용특성

상기의 5.2.1절과 5.2.2절에서 제시한 부하 및 사고전류 특성을 바탕으로, 선택계전기의 정정치를 산정하면 표 2와 같고, 이에 따른 선택계전기의 운용특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 선택계전기는  $t_{exp}$  만큼의 지연시간(1.05[ms])을 가지며, 이에 따른  $I_{E1}'$ 은 0.048[kA/s]로 산정된다. 따라서, 사고전류는 산정된  $I_{E1}'$ 의 값이  $S_{end1}$ 의 설정값 미만을 만족하

여, 고저항 단락사고로 판단되어 차단됨을 알 수 있다.

[표 2] LVDC 배전망용 선택계전기의 정정치

| 항 목                       | 내 역       | 항 목                    | 내 역       |
|---------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| 최대 부하전류<br>( $I_{peak}$ ) | 600[A]    | 경사각<br>$\Pi(S_{end2})$ | 1.0[kA/s] |
| 초기 경사각( $S_{start}$ )     | 11[kA/s]  | 지연시간<br>$I(t_{exp})$   | 1.05[ms]  |
| 경사각 $I(S_{end1})$         | 0.1[kA/s] | 지연시간 $\Pi(t_{\tau})$   | 2.25[ms]  |



[그림 9] 사고감지 향상을 위한 선택계전기의 운용특성

## 5. 결 론

본 논문에서는 단락 저항과 선로 공장에 따른 LVDC 배전망의 부하 및 사고전류의 특성을 분석하고, 부하와 사고를 적정하게 판별하는 선택계전기의 운용 방안을 제안한다. 또한, PSCAD/ EMTDC를 이용하여 선택계전기와 LVDC 배전망의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 단락 저항이 높거나 장거리 사고의 경우에도, 선택계전기가 사고전류와 부하전류를 적정하게 판별할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 강민관, 최성식, 이후동, 김기영, 노대석, “경전철용 LVDC 배전계통의 보호기기 운용방안에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 20, No. 4, pp. 25–34, 2019.
- [2] 김명현, 이경태, 김재철, “내열 도체가 적용된 가공 배전선의 적용 영향에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회, pp. 243–244, 2015