

## 경전철용 LVDC 배전계통의 보호기기 운용 방안에 관한 연구

강민관, 최성식, 이후동, 김기영, 노대석\*  
한국기술교육대학교 전기공학과

### A Study on Operation Method of Protection Device for LVDC Distribution Feeder in Light Rail System

Min-Kwan Kang, Choi-Sung Sik, Hu-Dong-Lee, Gi-Yung Kim, Dae-Seok Rho\*

Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**요약** 최근, 출력전압의 제어가 가능하고 양방향 운용이 가능한 PWM(Pulse Width Modulation) 정류기가 도입되고 있다. 그러나, PWM 정류기가 적용될 경우, 전력계통측에서 사고발생하면, 회생전력에 의한 사고전류 공급으로 기존의 사고전류 크기 및 방향이 바뀔 가능성이 있다. 또한, 경전철용 급전시스템에서는 장거리 지점에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 크기가 크게 감소되고, 부하전류와 비슷하거나 더 작은 경우가 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 적절한 보호협조 운용 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위하여, 경전철용 LVDC 배전선로의 보호기기 운용 방안을 제안한다. 구체적으로는 LVDC 배전선로에서의 거리 및 단락저항별 사고특성을 분석하여, 다양한 조건에서 사고를 적절하게 판별하는 직류선택계전기의 보호협조 운용방안을 제안한다. 또한, 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 계통, PWM 정류기, LVDC 배전선로로 구성된 경전철용 급전시스템의 모델링을 제시한다. 한편, 제안한 보호협조 알고리즘과 모델링을 이용하여 LVDC 배전선로의 보호기기 특성을 분석한 결과, 제안한 운용방식에서는 전류 경사각의 급격한 감소를 판정하는 보호요소를 추가한다. 따라서, 사고지점의 단락저항이 높거나 장거리 선로인 경우에도, 보호기기가 사고전류와 부하전류를 적절히 판별할 수 있어, 본 논문에서 제안한 보호협조 운용알고리즘의 유용성을 확인하였다.

**Abstract** Recently, when a fault occurs at a long-distance point in a LVDC (low voltage direct current) distribution feeder in a light rail system, the magnitude of the current can decrease to less than that of the load current of a light rail system. Therefore, proper protection coordination method to distinguish a fault current from a load current is required. To overcome these problems, this paper proposes an optimal algorithm of protection devices for a LVDC distribution feeder in a light rail system. In other words, based on the characteristics of the fault current for ground resistance and fault location, this paper proposes an optimal operation algorithm of a selective relay to properly identify the fault current compared to the load current in a light rail system. In addition, this paper modelled the distribution system including AC/DC converter using a PSCAD/EMTDC S/W and from the simulation results for a real light rail system, the proposed algorithm was found to be a useful and practical tool to correctly identify the fault current and load current.

**Keywords** : Light Rail System, LVDC, PSCAD/EMTDC S/W, Selection Protection Relay, Fault Current

### 1. 서론

최근, 국내의 경전철용 급전시스템의 공급방식은 전

력계통으로부터 수전받은 교류(AC)전력을 직류(DC)로 변환하기 위하여 전력변환장치들이 설치되어 있으며, 대부분의 경전철용 정류설비에는 다이오드와 싸이리스터

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20172410100030)와 한국에너지기술평가원의 연구(No.20182410105070)에 의하여 수행되었음.

\*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)

Tel: +82-41-560-1167 email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received March 12, 2019

Revised March 26, 2019

Accepted April 5, 2019

Published April 30, 2019

정류기가 사용되고 있다. 그러나, 이런 방식의 정류기는 출력전압의 제어가 어렵고 역방향 도통이 불가능하여, 경전철에서 발생하는 회생전력을 활용하지 못하는 단점을 가지고 있다[1, 2]. 이러한 문제점을 보완하기 위하여, 최근 출력전압의 제어가 가능하고 양방향 운용이 가능한 PWM(Pulse Width Modulation) 정류기가 도입되고 있다. 그러나, PWM 정류기가 적용될 경우, 전력계통측에서 사고발생하면, 회생전력에 의한 사고전류 공급으로 기존의 사고전류 크기 및 방향이 바뀔 가능성이 있다 [3-6]. 또한, 경전철용 급전시스템에서는 장거리 지점에서 사고가 발생하는 경우, 사고전류의 크기가 크게 감소되고, 부하전류와 비슷하거나 더 작은 경우가 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 적절한 보호협조 운용 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 해결하기 위하여, 경전철용 LVDC 배전선로의 보호기기 운용방안을 제안한다. 구체적으로는 LVDC 배전선로에서의 거리 및 단락저항별 사고특성을 분석하여, 다양한 조건에서 사고를 적절하게 판별하는 직류선택계전기의 보호협조 운용방안을 제안한다. 또한, 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 계통, PWM 정류기, LVDC 배전선로로 구성된 경전철용 급전시스템의 모델링을 제시한다. 한편, 제안한 보호협조 알고리즘과 모델링을 이용하여 LVDC 배전선로의 보호기기 특성을 분석한 결과, 제안한 운용방식에서는 전류 경사각의 급격한 감소를 판정하는 보호요소를 추가한다. 따라서, 사고지점의 단락저항이 높거나 장거리 선로인 경우에도, 보호기기가 사고전류와 부하전류를 적절히 판별할 수 있어, 본 논문에서 제안한 보호협조 운용알고리즘의 유용성을 확인하였다.

## 2. 경전철용 LVDC 배전선로의 보호기기 특성분석

경전철용 LVDC 배전선로의 보호기기는 Fig. 1과 같이 온도계전기(26), 정류기 고장검출기(58), 단락과전압계전기(64), 역전력계전기(32) 그리고 직류고장 선택계전기(50F) 등으로 구성되어 있다[7]. 이 그림에서와 같이, DC측의 보호동작은 정류기의 보호를 위하여, 정류기의 온도가 비정상적인 경우에는 온도계전기(26)가 동작하며, 고장이 발생하면 정류기 고장검출기(58)가 회로를

보호하고, 회생전력이 발생한 경우에는 정류기의 내부 스위칭 소자들을 보호하기 위해 역전력계전기(32)가 동작된다. 한편, 경전철용 LVDC 배전선로의 보호기기는 장거리 사고의 경우, 사고전류의 크기가 사고지점 거리에 따라 기동부하 전류크기 보다 작아지므로 부하전류와 사고전류를 판별하기 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위하여, 현재 경전철용 LVDC 배전선로에서는 전류의 경사각(일정한 시간에 대한 전류의 변화분)을 이용하여 사고를 판별하는 직류선택계전기(50F)를 사용하고 있다[8-10].

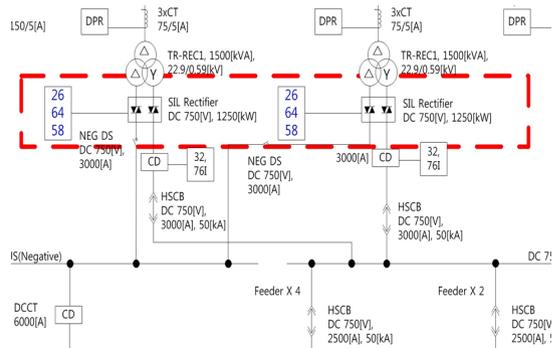


Fig. 1. Protection Coordination diagram in LVDC

## 3. 경전철용 LVDC 배전선로의 보호기기 운용 알고리즘

### 3.1 선택보호계전기의 동작특성 분석

경전철용 직류급전시스템의 기동부하 및 사고 특성을 나타내면 Fig. 2와 같다. 이 그림에서와 같이, 단거리 사고전류는 큰 값을 가지고 짧은 시간동안 급격하게 상승하므로, 쉽게 사고전류를 판별 할 수 있다. 그러나, 장거리 사고전류는 부하전류의 크기와 유사하고 상대적으로 오랜 시간동안 작은 폭으로 상승함으로, 사고전류를 판별하기 어려운 특성을 가지고 있다[11]. 또한, 장거리 사고전류는 연속적인 부하변동과 기동부하보다 더 작은 경사각과 전류 변화량을 가질 수 있으므로 적절하게 판별하여 차단하는 것이 요구된다. 한편, 전철이 거의 동시에 출발할 경우 발생하는 연속적인 부하변동은 단거리 사고전류의 파형과 유사하게 나타나기 때문에 단거리 사고와 적절하게 판별하는 것이 필요하다.

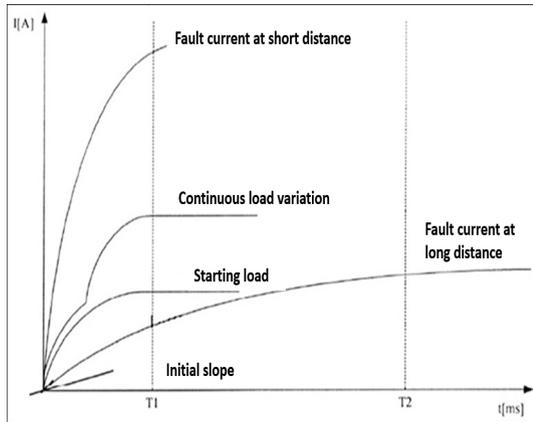
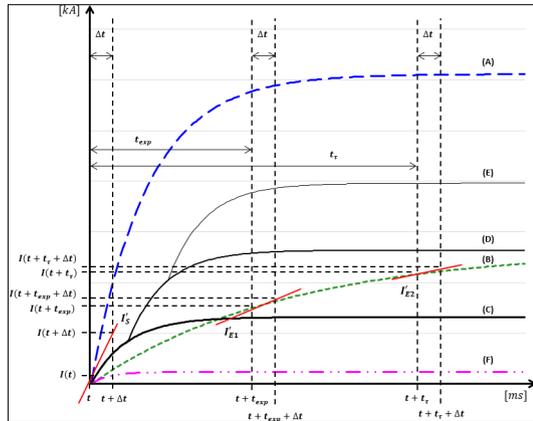


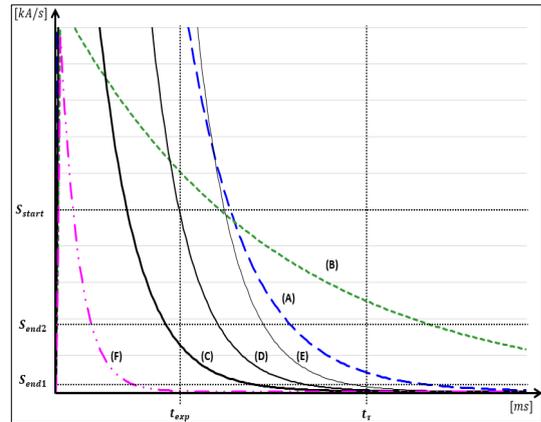
Fig. 2. Concept of fault and load currents

### 3.2 선택보호계전기의 보호협조 운용 방안

본 논문에서는 상기의 경전철용 부하특성을 고려하여, 부하전류와 사고전류를 적절하게 판별하는 직류선택계전기의 운용방안을 제안하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 3(a)는 경전철용 기동부하전류와 경전철용 배전선로의 사고전류 특성을 나타낸 것이고, Fig. 3(b)는 기동부하전류와 사고전류의 경사각 특성을 나타낸 것이다. 또한, 이 그림에서 (A), (B), (F)는 각각 단거리, 장거리, 단락저항 사고전류의 일반적인 파형을 나타내며, (C), (D), (E)는 3가지 종류의 기동부하의 변동특성을 나타낸 것이다.



(a) Characteristics of load and fault current



(b) Gradient characteristics of load and fault current

Fig. 3. Operation plan of LVDC selection protection relay

Fig. 3(a)와 같이, 단거리 사고(A)의 경우에는 부하전류보다 매우 큰 전류가 발생하므로, 전류의 크기에 의하여 사고를 쉽게 판단할 수 있다. 그러나, 장거리 사고(B)의 경우, 사고전류의 크기는 사고지점의 거리에 따라 기동부하(C, D, E)의 전류크기 보다 작아질 가능성이 있다. 또한, 단락저항이 매우 큰 경우(F), 사고전류는 장거리 사고전류 또는 기동부하전류 보다 작아질 가능성이 있다. 따라서, 사고전류의 크기만으로는 부하전류와 사고전류를 구분하기 어려우므로, 전류의 경사각을 고려해야 한다.

한편, 사고전류의 경사각은 Fig. 3(b)와 같이, 사고지점의 거리와 단락저항에 따라 크기와 지속시간이 다양한 값을 가지게 된다. 여기서, 단거리 사고(A)의 경우는 사고전류가 매우 크기 때문에 쉽게 차단할 수 있다. 또한, 장거리 사고(B)의 경우에는 전류 경사각이 비교적 완만한 특성을 가지고 있어, 기존의 보호요소인  $t_\tau$ 와  $S_{end2}$ 를 이용하여 사고전류를 검출할 수 있다. 그러나, 단락저항이 높은 경우(F)의 사고전류 경사각은 단거리 사고전류(A)나 기동부하(C, D, E) 보다 매우 빠르게 감소하므로, 기존의 보호요소만으로는 검출하기 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점을 해결하기 위하여, 새로운 보호요소인  $t_{exp}$ 와  $S_{end1}$ 를 제시하여, 장거리 사고와 단락저항 사고에 대해서도 적절히 판별할 수 있는 보호기기 운용알고리즘을 제안한다. 즉, 기존의  $t_\tau$ 보다 작은 구간의  $t_{exp}$ 와 그때의 경사각인  $S_{end1}$ 를 설정하여, 경사각의 크기가 급격히 감소하는 단락저항 사고를 판단하도록 한다.

### 3.3 선택보호계전기의 운용 알고리즘

상기의 사고전류 및 기동부하특성을 바탕으로 경전철용 LVDC 배전선로의 사고전류를 적절하게 판별하는 선택보호계전기의 운용 알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 직류선택계전기의 최대 부하전류( $I_{peak}$ ), Start slope( $S_{start}$ ), End slope 1( $S_{end1}$ ), End slope 2( $S_{end2}$ ), Time delay 1( $t_{exp}$ ), Time delay 2( $t_r$ )를 상정한다. 여기서, Fig. 3과 같이 Start slope( $S_{start}$ )은 초기 전류의 경사각이고, End slope 1( $S_{end1}$ )은 Time delay 1( $t_{exp}$ ) 이후의 경사각이며, End slope 2( $S_{end2}$ )는 Time delay 2( $t_r$ ) 이후의 경사각이다.

[Step 2] 각 시간대 별로 전류( $I(t)$ )를 측정하여, 이 값을  $I_{peak}$ 와 비교한다. 만약,  $I(t)$  값이 큰 경우에는 사고로 판단하여 트립시키고,  $I_{peak}$  보다 작은 경우에는 보호기기가 사고전류를 차단하지 못하는 오부동작이 발생할 수 있으므로 [Step 3]로 이동한다.

[Step 3] 각 시간대 별로  $I_S'$ 를 산정하고, 만약,  $I_S'$  값이  $S_{start}$  보다 큰 경우에는  $t_{exp}$  이후의 전류 경사각인  $I_{E1}'$ 을  $S_{end1}$ 과 비교한다. 만약,  $I_{E1}'$ 이  $S_{end1}$ 보다 작은 경우에는 높은 단락저항 사고로 판단하여 트립시킨다.

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

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

여기서,  $I_S'$ 는 t 시간대의 초기 전류경사각이고,  $I_{E1}'$ 는 Time delay 1( $t_{exp}$ )이후의 전류경사각이다.

[Step 4]  $I_S'$  값이  $S_{start}$  보다 작거나,  $I_{E1}'$  값이  $S_{end1}$  보다 큰 경우에는  $t_r$  이후의 전류 경사각인  $I_{E2}'$ 를  $S_{end2}$ 와 비교한다. 만약,  $I_{E2}'$  값이 큰 경우에는 완만한 경사각을 가지는 장거리 사고로 판단하여 트립시킨다.

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

여기서,  $I_{E2}'$ 는 Time delay 2( $t_r$ ) 이후의 전류 경사각이다.

[Step 5]  $I_{E2}'(t)$ 가  $S_{end2}$  보다 작은 경우에는 [Step 2]로 돌아가서 해당 과정을 반복하고, 설정한 최대시간( $t_{max}$ )에 도달하면 반복을 종료한다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 4와 같다.

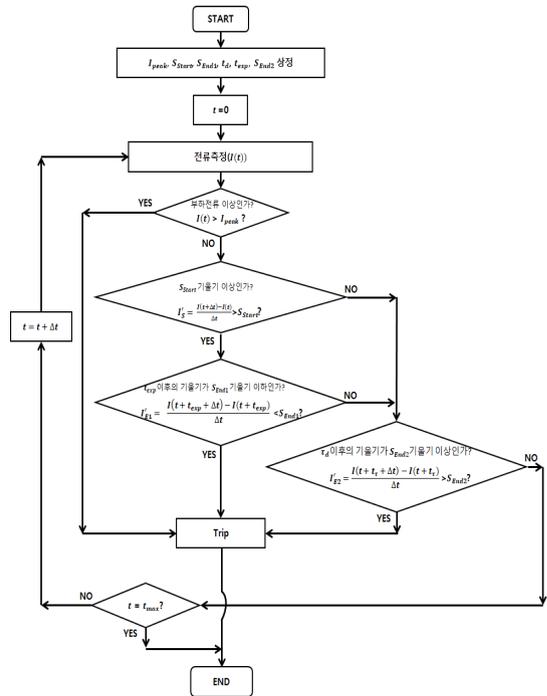


Fig. 4. Operation algorithm of selection protection relay

## 4. PSCAD/EMTDC를 이용한 경전철용 LVDC 배전계통의 모델링

### 4.1 배전계통 모델링

본 연구에서는 경전철용 급전시스템의 사고특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용 해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전용변전소, 고압선로 그리고 정류용변압기로 구성된 급전시스템의 AC 계통을 모델링하면 Fig. 5과 같다. 이 그림에서와 같이, 배전용 변전소는 154kV/22.9kV의 1차측과 2차측 전압, 45/60MVA 용량의 주변압기, 모션임피던스로 구성된다. 또한, 배전용 변전소의 주변압기는 Y-Yg-D 결선으로 구

성된다. 여기서, 배전용 변전소와 정류용 변압기의 임피던스는 Table 1과 같이 나타낼 수 있으며, 영상 및 정상분 %임피던스는 Table 1(a)과 Table 1(b)와 같이 상정한다. 한편, 고압배전선로의 선종은 전력선과 중성선 각각 ACSR 160mm<sup>2</sup>이며, 임피던스는 Table 1(c)와 같다.

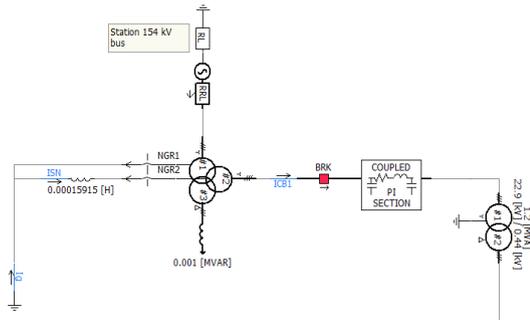


Fig. 5. Modeling of power distributions

### 4.2 PWM 정류기 모델링

정류용 변압기로부터 AC 전력을 DC로 공급하기 위하여, PWM 정류기를 모델링 하면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서와 같이, PWM 정류기는 경전철 부하와 6개의 IGBT, DC 전압을 평활하기 위한 인덕터 및 커패시터로 구성된다. 여기서, PWM 정류기의 용량은 1MW이고, 공급전압은 DC 1500[V]이다.

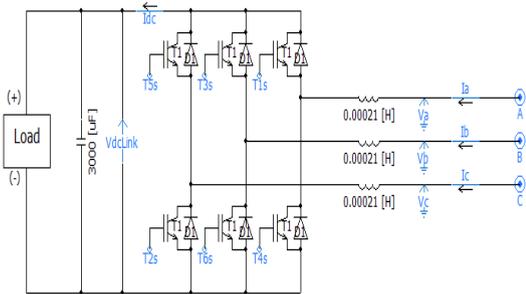


Fig. 6. Modeling of MW scaled PWM rectifier

### 4.3 전체 경전철용 LVDC 배전계통 모델링

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 경전철용 정류용 변압기, PWM 정류기, 직류(DC) 선로, 경전철부하로 구성된 전체 급전시스템을 나타내면 Fig. 7과 같다.

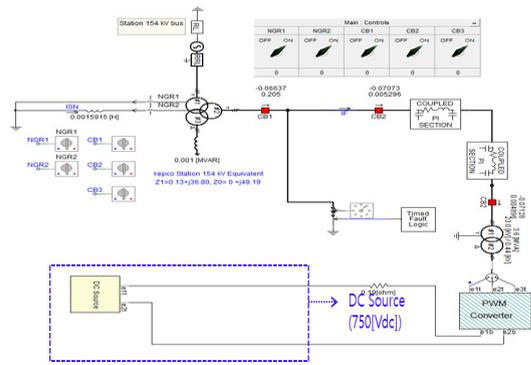


Fig. 7. Entire modeling of power system

## 5. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제시한 경전철용 급전시스템의 보호협조 운용 알고리즘과 모델링을 바탕으로 변압기 절선방식에 따른 사고특성을 분석하기 위하여, Table 1과 같이 계통 모의조건을 상정하였다.

Table 1. Detailed parameters

(a) Positive sequence 22.9kV bus line impedances

Source impedance			Transformer impedances		Bus impedances		
%R	%X	%ZS1	MVA	%ZHM	%R	%X	%ZB1
0.13	1.31	1.32	45	35.49	0.13	36.8	36.8

(b) Zero sequence bus impedances

Transformer impedances		NGR impedances	Bus impedances
MVA	%ZML	%ZNGR×3	%Z B0
45	14.867	34.323	49.190

(c) Distribution line % impedances

Items	Cables	R(%/km)	jX(%/km)
Positive sequence	ACSR 160	3.47	7.46
Zero sequence	ACSR 160	11.9	29.26

또한, 장·단거리 사고전류에 따른 선택보호계전기의 안정적인 운용기준을 제시하기 위하여, Table 2와 같이 선로길이를 1[km], 5[km], 8[km]로 상정하였고, 선로저

항은 0.0248[ohm/km]이고, 거리에 따른 단락저항 값은 0[Ω], 3[Ω]으로 상정하였다.

Table 2. Simulation conditions of Protection relay

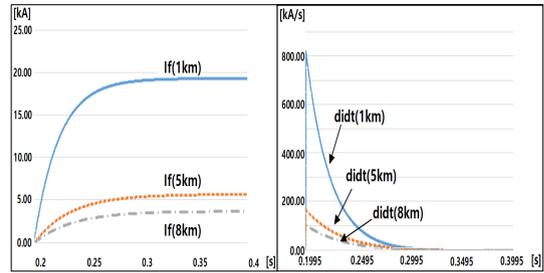
Items	Contents
Line length[km]	1, 5, 8
Pick-up 전류( $I_{peak}$ )	8 [kA]
Start slope( $S_{start}$ )	50 [kA/s]
End slope 1( $S_{end1}$ )	1 [kA/s]
End slope 2( $S_{end2}$ )	18 [kA/s]
Time delay 1( $t_{exp}$ )	10 [ms]
Time delay 2( $t_{\tau}$ )	30 [ms]

## 5.2 PSCAD/EMTDC에 의한 사고특성 분석

### 5.2.1 LVDC 배전선로의 사고지점별 사고전류 특성

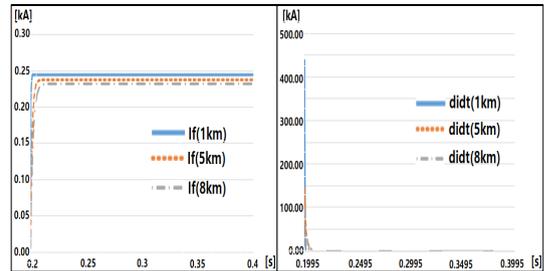
DC 배전선로의 사고지점별 사고전류 특성을 분석하기 위하여, 본 논문에서 제시한 모델링과 시뮬레이션 조건을 바탕으로 단락저항이 0[Ω]인 경우의 사고지점별 (1[km], 5[km], 8[km]) 특성을 나타내면 Fig. 8와 같다. 여기서, Fig. 8(a)는 사고전류 특성을 나타낸 것이고, Fig. 8(b)는 사고전류의 경사각 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 선로의 공장이 1[km], 5[km], 8[km]지점에서 발생한 사고전류는 각각 33[kA], 6.6[kA], 4.13[kA] 정도로 사고지점에 따라 크기가 감소함을 알 수 있다. 또한, 사고전류의 경사각 특성은 상기의 사고지점별로 각각 824.4[kA/s], 170.1[kA/s], 106.7[kA/s]이며, 경사각이 1[kA/s] 이내로 감소하는데 걸린 시간은 각각 156ms, 174ms, 165ms임을 알 수 있다.

한편, 단락저항이 3[Ω]인 경우의 사고지점별(1[km], 5[km], 8[km]) 특성을 분석하면 Fig. 9과 같다. 여기서, Fig. 9(a)는 사고전류 특성을 나타낸 것이고, Fig. 9(b)는 사고전류의 경사각 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 선로의 공장이 1[km], 5[km], 8[km]지점에서 발생한 사고전류는 각각 0.25[kA], 0.24[kA], 0.23[kA] 정도로 사고지점에 따라 크기가 감소함을 알 수 있다. 또한, 사고전류의 경사각 특성은 상기의 사고지점별로 각각 441.6[kA/s], 148.7[kA/s], 97.9[kA/s]이며, 경사각이 1[kA/s] 이내로 감소하는데 걸린 시간은 각각 1.7ms, 7ms, 10ms임을 알 수 있다.



(a) fault current (b) Gradient

Fig. 8. Fault characteristics of ground resistance(0[Ω])



(a) fault current (b) Gradient

Fig. 9. Fault characteristics of ground resistance(3[Ω])

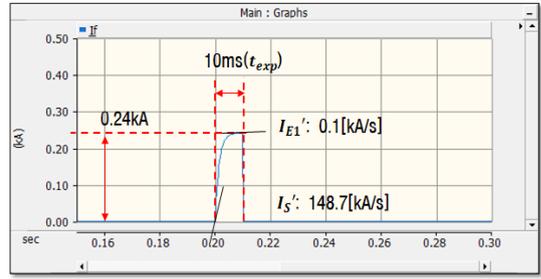
### 5.2.2 LVDC 배전선로의 보호기 운영특성

본 논문에서 제시한 선택보호계전기의 운용알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여, PSCAD/ EMTDC 모델링을 이용하여 사고지점별(5[km], 8[km]) 사고가 발생한 경우, 사고전류의 특성을 나타내면 Fig. 10, Fig. 11과 같다. 여기서, Fig. 10(a)는 5[km]지점에서의 기존의 보호기기에 의한 사고전류 특성 중 단락저항이 0[Ω]일 경우를 나타내며, Fig. 10(b)는 5[km]지점에서의 기존의 보호기기에 의한 사고전류 특성 중 단락저항이 3[Ω]일 경우를 나타낸 것이다. 또한, Fig. 10(c)는 5[km]지점에서의 선택보호계전기의 알고리즘을 적용한 사고전류 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 기존의 보호방식에서는 단락저항이 3[Ω]인 경우, 사고전류가 차단되지 않고 계속 공급되지만, 본 연구에서 제시한 보호방식에 의하면 일정시간 이내에 사고전류가 차단됨을 알 수 있다.

구체적으로, 단락저항이 0[Ω]인 경우 단락사고가 발생하면, Fig. 10(a)와 같이  $I_S'$ 는  $S_{start}$  설정값인 50[kA/s]를 초과한 170.2[kA/s]가 산정되고, 선택보호계전기는 사고유무를 판단하기 위하여,  $t_{\tau}$  만큼의 지연시간(30ms)을 가지게 된다. 이때의 사고전류는 3.56[kA]

이고,  $I_{E2}'$ 는  $S_{end2}$ 의 설정값인 18[kA/s]를 초과하는 70.1[kA/s]가 발생되어, 완만한 경사각을 가지는 장거리 사고로 판단하여 사고전류가 정상적으로 차단됨을 알 수 있다.

그러나, 단락저항이 3[Ω]인 경우에는, Fig. 10(b)와 같이  $I_S'$ 는  $S_{start}$  설정값인 50[kA/s]를 초과한 148.7[kA/s]가 산정되고, 선택보호계전기는 사고유무를 판단하기 위하여,  $t_r$  만큼의 지연시간(30ms)을 가지게 된다. 이때의 사고전류는 부하전류보다 작은 0.24[kA]가 발생되고,  $I_{E2}'$ 는 급격히 감소하여,  $S_{end2}$ 의 설정값인 18[kA/s] 보다 작은 0[kA/s]가 되어, 사고임에도 불구하고 사고전류가 차단되지 않음을 알 수 있다. 즉, 단락저항이 높은 경우에는 사고전류 경사각이 단거리 사고전류나 기동부하 보다 매우 빠르게 감소하므로, 기존의 보호요소만으로는 검출하기 어려움을 알 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제시한 알고리즘에 의하면, Fig. 10(c)와 같이 상기와 동일한 조건에서 지연시간(10ms)인  $t_{exp}$ 에 대하여  $I_{E1}'$ 는 0.1[kA/s]가 산정되므로,  $S_{end1}$ 의 설정값인 1[kA/s] 미만을 만족하므로, 높은 단락저항 사고로 판단하여 사고전류가 정상적으로 차단됨을 알 수 있다.



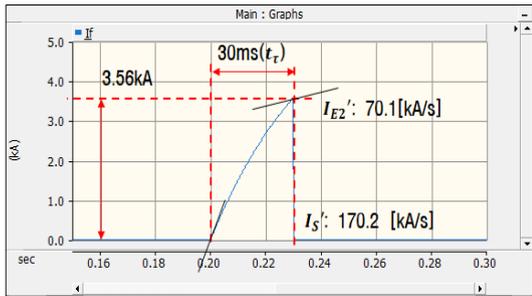
(c) Proposed selection protection relay (3[Ω])

Fig. 10. Fault current characteristics of 5km distance

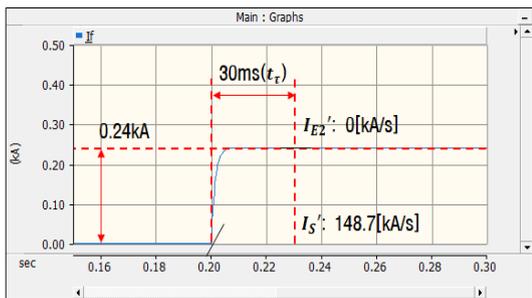
또한, Fig. 11(a)는 8[km]지점에서의 기존의 보호기기에 의한 사고전류특성 중 단락저항이 0[Ω]인 경우를 나타내며, Fig. 11(b)는 8[km]지점에서의 기존의 보호기기에 의한 사고전류특성 중 단락저항이 3[Ω]일 경우를 나타낸 것이고, Fig. 11(c)는 8[km]지점에서의 선택보호계전기의 알고리즘을 적용한 사고전류 특성을 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 기존의 보호방식에서는 단락저항이 3[Ω]인 경우, 사고전류가 차단되지 않고 계속 공급되지만, 본 연구에서 제시한 보호방식에 의하면 일정시간 이내에 사고전류가 차단됨을 알 수 있다.

구체적으로, 단락저항이 0[Ω]인 경우 단락사고가 발생하면, Fig. 11(a)와 같이  $I_S'$ 는  $S_{start}$  설정값인 50[kA/s]를 초과한 107.2[kA/s]가 산정되고, 선택보호계전기는 사고유무를 판단하기 위하여,  $t_r$  만큼의 지연시간(30ms)을 가지게 된다. 이때의 사고전류는 2.23[kA]이고,  $I_{E2}'$ 는  $S_{end2}$ 의 설정값인 18[kA/s]를 초과하는 49.3[kA/s]가 발생되어, 완만한 경사각을 가지는 장거리 사고로 판단하여 사고전류가 정상적으로 차단됨을 알 수 있다. 그러나, 단락저항이 3[Ω]인 경우에는, Fig. 11(b)와 같이  $I_S'$ 는  $S_{start}$  설정값인 50[kA/s]를 초과한 98.4[kA/s]가 산정되고, 선택보호계전기는 사고유무를 판단하기 위하여,  $t_r$  만큼의 지연시간(30ms)을 가지게 된다. 이때의 사고전류는 부하전류보다 작은 0.23[kA]가 발생되고,  $I_{E2}'$ 는 급격히 감소하여,  $S_{end2}$ 의 설정값인 18[kA/s] 보다 작은 0[kA/s]가 되어, 사고임에도 불구하고 사고전류가 차단되지 않음을 알 수 있다.

그러나, 본 논문에서 제시한 알고리즘을 바탕으로 보호기기의 동작특성을 분석한 결과, 상기와 동일한 조건에서 제한한 보호요소인  $t_{exp}$ 와  $I_{E1}'$ 를 추가하여, Fig. 11(c)와 같이 선택보호계전기는  $t_{exp}$  만큼의 지연시간

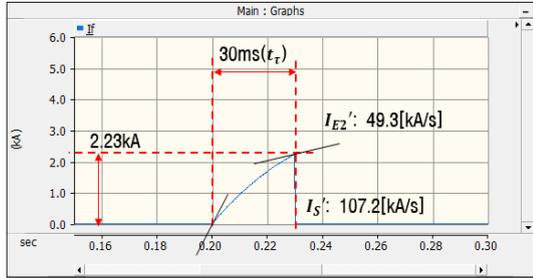


(a) Existing selection protection relay(0[Ω])

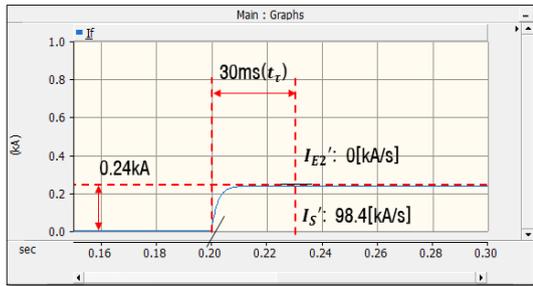


(b) Existing selection protection relay(3[Ω])

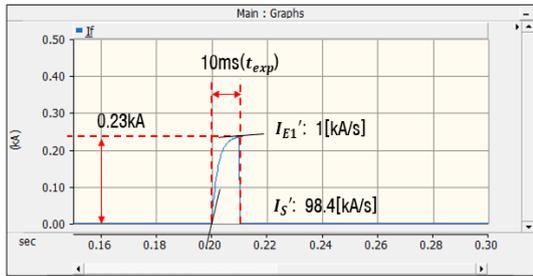
(10ms)을 가지게 된다. 이때의  $I_{E1}'$ 는  $S_{end1}$ 의 설정값인 1[kA/s] 미만을 만족하므로, 높은 단락저항 사고로 판단하여 사고전류가 정상적으로 차단됨을 알 수 있다.



(a) Existing selection protection relay(0[Ω])



(b) Existing selection protection relay(3[Ω])



(c) Proposed selection protection relay (3[Ω])

Fig. 11. Fault current characteristics of 8km distance

## 6. 결론

본 논문에서는 경전철용 LVDC 배전선로에서의 거리 및 단락저항별 사고를 적절하게 판별하는 직류선택계전기의 보호협조 운용방안을 제안하고, PSCAD/EMTDC를 이용하여 기존의 보호협조 방식과 제안한 보호협조 방식의 운용 특성을 비교 분석하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 보호협조 운용 방식에서는 단락저항이 0 [Ω]인 경우 단락사고가 발생하면,  $I_S'$ 는  $S_{start}$  설정값인 50[kA/s]를 초과한 값이 산정되고, 선택 보호계전기는 사고유무를 판단하기 위하여,  $t_r$  만큼의 지연시간(30ms)을 가지게 된다. 이때의  $I_{E2}'$ 는  $S_{end2}$ 의 설정값인 18[kA/s]를 초과한 값이 발생되어, 완만한 경사각을 가지는 장거리 사고로 판단하여 사고전류가 정상적으로 차단됨을 알 수 있다.
- (2) 기존의 보호협조 운용 방식에서는, 단락저항이 3 [Ω]인 경우 단락사고가 발생하면, 선택보호계전기는 사고유무를 판단하기 위하여,  $t_r$  만큼의 지연시간(30ms)을 가지게 된다. 이때의 사고전류는 부하전류보다 작은 값이 발생되고,  $I_{E2}'$ 는 급격히 감소하여,  $S_{end2}$ 의 설정값인 18[kA/s] 보다 작은 0[kA/s]가 되어, 사고임에도 불구하고 사고전류가 차단되지 않음을 알 수 있었다. 즉, 단락저항이 높은 경우에는 사고전류 경사각이 단거리 사고전류나 기동부하 보다 매우 빠르게 감소하므로, 기존의 보호요소만으로는 검출하기 어려움을 알 수 있었다.
- (3) 제안한 보호협조 운용방식을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 단락저항이 3[Ω]인 경우 단락사고가 발생하면, 지연시간(10ms)인  $t_{exp}$ 에 대하여  $I_{E1}'$ 는  $S_{end1}$ 의 설정값인 1[kA/s] 미만이 산정되므로, 높은 단락저항 사고로 판단하여 사고전류가 정상적으로 차단됨을 알 수 있었다. 따라서, 사고지점의 단락저항이 높거나 장거리 선로인 경우에도, 보호기기가 사고전류와 부하전류를 적절히 판별할 수 있어, 본 논문에서 제안한 보호협조 운용알고리즘의 유용성을 확인하였다.

## References

- [1] Joorak Kim, Kijun Park, Chang-reung Park, Eun-Sang Choo, Jun-Young Lee, "Analysis on Voltage and Cost of Substation with PWM Rectifier in DC Traction Power Supply System" The Transactions of the KIEE, Vol. 64, No. 4, pp.640-645, 2015  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.4.640>
- [2] Joorak Kim, Chang-reung Park, Kijun Park, Joo-Uk

- Kim, "A Study on DC Traction Power Supply System Using PWM Converter", J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng. Vol. 29, No. 4, pp.250-254, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.4.250>
- [3] Sung-Yeol Kwon, Hyun-Chang Lee, Kyu-Tae Lee, "A Study on Performance Improvement of Detecting Current of the Norton Amplifier", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 18, No. 3, pp.185-191, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.3.185>
- [4] Joorak Kim, "A Study on Power Flow Analysis of DC Traction Power Supply System with PWM Rectifier", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 11, pp.1919-1924, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.11.1919>
- [5] Go-Woon Jeon, Hyeong-Jun Yoo, Jae-Sae Park, "Improving Regenerative Break Energy Efficiency and Voltage Regulation Capability of DC Electric Railway by Coordination of VSC and EDLC", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 64, No. 1, pp.176-181, 2015.  
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.1.176>
- [6] Kim Yong-Ki, Bae Chang-Han, Han Moon-Seob, Yang Young-Chul, Jang Su-jin, "Direction for Development of Energy Regeneration Device for DC Electric Railway System", Korean Society for Railway, pp.5, 2005.
- [7] Joorak Kim, Moonseob Han, Yong-Ki Kim, Jung-Hoon Kim, "Development and Test of Inverter for Regenerative Power of DC Traction Power Supply System", Journal of the Korean Society for Railway. Vol. 12, No. 2, pp.254-259, 2009.  
DOI: <http://uci.or.kr/G704-001404.2009.12.2.009>
- [8] Chang-Yong Lee, Jinho Kim, "The Prediction and Analysis of the Power Energy Time Series by Using the Elman Recurrent Neural Network", Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 41, No. 1, pp.84-93, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.11627/jkise.2018.41.1.084>
- [9] Jae-Wan Yang, Young-Doo Lee, In-Soo Koo, "Sensor Fault Detection Scheme based on Deep Learning and Support Vector Machine", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 18, No. 2, pp.185-195, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.2.185>
- [10] Min-Seop So, Hong-Bae Jun, Jong-Ho Shin, "Failure Analysis to Derive the Causes of Abnormal Condition of Electric Locomotive Subsystem", Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 41, No. 2, pp.84-94, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.11627/jkise.2018.41.2.084>
- [11] Sung-Hee Park, Kee-Hong Um, "A Study on Development and Diagnosis Factors of On-Line DC Leakage Current System for Junctions of High-Voltage Cables in Operation at Thermoelectric Power Station", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 18, No. 6, pp.187-193, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.6.187>
- [12] Byung-San Baek-Jae-Chul Kim, "A Study on the Development and Application of Digital Protective Relay for DC Feeding System of Light Rail Transit System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 19, No.2, pp.77-86, 2005.  
DOI: <http://uci.or.kr/G704-000642.2005.19.2.016>
- [13] Yun-Sik Oh, Joon Han, Gi-Hyeon Gwon, Doo-Ung Kim, Chul-Ho Noh, Tack-Hyun Jung, Chul-Hwan Kim, "Analysis of Human Safety and System Effect according to Grounding Scheme in LVDC Distribution System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 5, pp.608-614, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.5.608>
- [14] Chan-Ki Kim, "A Study on the Algorithm Detecting DC Line Faults", HE The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 9, No. 5, pp.498-506, 2004.  
DOI: <http://uci.or.kr/G704-000449.2004.9.5.012>
- [15] Sang-Gi Chung, Rag-Gyo Jeong, Hong-Sik Cho, Ahn-Ho Lee, Sam-Young Kwon, "Development of Ground Fault Protective Relaying Schemes for DC Traction Power Supply System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 54, No. 9, pp.427-433, 2005.  
DOI: [http://uci.or.kr/G704-A00119.2005.54.9\(A\).002](http://uci.or.kr/G704-A00119.2005.54.9(A).002)
- [16] No-Geon Jung, Jae-Moon Kim, "An Experimental Study on Operation Setting Optimization of Circuit Breaker for Improving Safety on DC Railroad Feeder System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 3, pp.526-531, 2016.  
DOI: <http://uci.or.kr/G704-001404.2009.12.2.009>

강민관(Min-Kwan Kang)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2007년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, Micro-grid, ESS, MVDC

최성식(Sung-Sik Choi)

[정회원]



- 2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

**이 후 동(Hu-Dong Lee)**

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 박사 과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, Micro-grid, MVDC

---

**김 기 영(Gi-Yung Kim)**

[정회원]



- 2011년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2015년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2017년 8월 ~ 현재 : 동대학원 박사 과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, Micro-grid, MVDC

---

**노 대 석(Dae-Seok Rho)**

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석