

# 직류철도 급전계통의 안전성 향상을 위한 차단기 동작 최적 설정의 실험적 고찰

## An Experimental Study on Operation Setting Optimization of Circuit Breaker for Improving Safety on DC Railroad Feeder System

이재봉\* · 정노건\* · 김재문\*  
(Jae-Bong Lee · No-Geon Jung · Jae-Moon Kim)

**Abstract** - This paper presents an experimental study on the optimal settings for the selected DC fault relay (50F) to improve the operating performance for the high-speed circuit breaker on DC feeding system which ensure safety within rolling stock maintenance depot. In this study, current supplied to overhead contact wire was calculated on 1 ms interval to analyze the correction values of DC fault selective relay for the operation of current supply cutout. Particularly, standards for the accurate detection of accidents between an electric railway vehicle and the electric power facilities are shown by investigating the optimal correction values for detection of fault current, and the results indicated that it takes about 213 ms for the DC fault selective relay(50F) to fully open. In the future, the correction values of DC fault selective relay suggested in this paper will be used as the reference values of protective relay for the safe operation of DC electric railroad system such as urban railway.

**Key Words** : Selected DC fault relay, Electric railway vehicle, High-speed circuit breaker, DC feeding system

### 1. 서론

전기철도는 전기철도차량에 전기에너지를 전달하는 전철·전력설비와 전기에너지로 운행된다. 이중 전철 설비는 전기철도차량에서 전기에너지를 전달 받는 팬터그래프와 직접 접촉하여 운행하기 때문에 기계적 특성에 민감하게 반응하게 된다[1]. 팬터그래프와 전차선간의 기계적 상호작용은 전차선의 마모, 이선, 팬터그래프의 압상, 피로 등 다양하게 나타나며 집전성능이라는 지표로 나타낸다[2, 3]. 그러나 전력설비는 전기철도차량과의 기계적 접촉은 하지 않지만 전기적으로 상호 연결되어 있어 차량에 안정적인 전원을 공급하기 위한 다양한 설비들이 존재하고 있다[4]. 전기철도차량에 전기에너지를 공급하기 위한 전력설비는 직류 방식은 유도장애가 없고 낮은 전압에서 전기철도차량을 운행할 수 있어 지하구간 전철 방식에서 사용되고 있다[5]. 특히 직류급전방식은 전기철도차량의 운행시각이 조밀하여 부하사용량이 많아 안정적인 전기에너지 공급이 필요하다. 그러나 전기철도차량과 전력설

비사이에 단락 사고발생에 따라 급격하게 전류 상승한다.

본 논문에서는 직류급전계통의 사고전류에 대하여 수식적으로 고찰하였으며, 차량기지 내에 설치된 보호계통의 안정성을 확보하기 위해 전차선에 공급되는 전류가 설정값 이상으로 상승하여 일정시간을 초과 하거나 대전류의 흐름 발생 시, 차단기 동작을 위한 직류고장선택계전기의 설정값을 분석하였다. 특히, 고장전류 검출을 위한 설정값을 분석하여 전기철도차량과 전력설비 사이에 사고유무를 판단할 수 있는 최적의 보호동작시간과 전류값을 분석하였다. 본 논문에서 제안한 직류고장선택계전기의 설정값은 향후 도시철도 급전계통에서 전기철도차량의 안정적인 운영을 위한 보호계전기 기준값으로 활용될 것으로 기대된다.

### 2. 본론

#### 2.1 차단기 설치현황 및 특성 분석

본 논문에서는 현재 운용 중인 직류고속도차단기의 특성을 분석하기 위해 도시철도 철도차량기지 전동차 파워시험, 차량고장 등 장애발생 시 발생고장전류를 검출하여 급전용 직류고속도차단기 트립(Trip) 및 전차선로 단전시키는 직류고장선택계전기(50F) 동작특성을 고찰하였다. 도시철도 운영기관의 차량기지에 설치되어 운영되고 있는 급전구역별 직류고속도차단기 설치현황 일례를 표 1에서 보여준다.

\* Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr

\* Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

Received : January 28, 2016; Accepted : February 28, 2016

표 1 기지 구내용 직류고속도차단기 설치현황

Table 1 Installation status of high speed DC circuit breaker for rolling stock maintenance depot

차단기명	54C1	54C2	54C3	54C4	54C5	54C6
공급선로	입,출 고선	북부 유치선	남부 (상)	남부 (하)	신설 유치선	검수 고선
정격 (제조사)	DC1800V 3600A, Secheron(스위스)					

직류고속도차단기의 직류고장선택계전기는 전차선에 공급되는 전류를 1ms 단위로 모니터링 및 연산하여 전류가 설정기준 이상으로 상승할 시 일정시간을 초과하거나 설정된 전류값 기준이상으로 전류가 흐를 경우 사고전류로 판단하여 급전차단기를 트립(Trip)시킨다. 표 2는 직류고장선택계전기(50F)의 급전계통을 보호하는 명칭 및 이에 따른 내용을 기술하였다.

표 2 용어 및 설정치 기준

Table 2 Terminology and setting value criteria

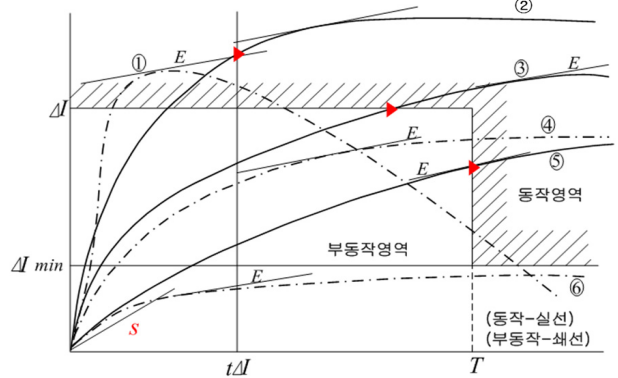
용어	설정치	내용
Start Slope	72kA/s	초당 72kA의 기울기로 상승 시 연산 시작
End Slope	18kA/s	시작기울기 및 유지시간 전에 종료기울기에서 연산 종료
delta I max	3,000A	tΔI와 연동하여 차전류 발생 시 Trip 발생
t delta I max	0ms	시작기울기부터 정정시간까지 전류변화량 연산처리, ΔI와 연동
duration Time	35ms	ΔI 및 종료기울기가 검출되지 않으면 지속시간 후 Trip 발생
delta I min	700A	최소 기준전류 내의 전류와 시간은 무시함

2.1.1 직류고장선택계전기 동작특성

직류고속도차단기를 내구연한 도래 또는 급전 부하용량의 증가에 대비하여 사고전류 검출능력이 우수한 스위스 Secheron社 디지털복합계전기(SEPCOS)에 내장된 직류고장선택계전기(50F)의 전류와 시간변화량에 대한 동작특성 곡선을 그림 1에서 보여준다.

①번과 같은 동작특성을 보이는 경우 Start Slope 이상으로 전류가 상승하고 차(差)전류 설정치(ΔI<sub>max</sub>)를 초과 하였으나, 초기 기울기부터 정정시간까지 전류변화 연산시간(tΔI) 이내에 End Slope가 나타나기 때문에 계전기는 동작하지 않는다.

반면, ②번의 경우는 Start Slope 이상으로 전류가 상승하여 차(差)전류 설정값 (ΔI<sub>max</sub>)를 초과 하였으며, 초기 기울기부터 정정 전류변화 연산시간 (tΔI)에 차단기 트립 (Trip)신호를 송출하고, 전류변화 연산시간 (tΔI) 이후에 End Slope가 검출되어도



\* S : 연산시작 di/dt, E : 연산종료 di/dt, ▶ : Trip출력시점

그림 1 직류고장선택계전기(50F) 동작특성

Fig. 1 Operating characteristics of DC fault selective relay (50F)

계전기는 동작한다.

③번 동작특성을 보이는 경우는 Start Slope 이상으로 전류가 상승하여 전류변화 연산시간 (tΔI)이후, 차(差)전류 설정값 (ΔI<sub>max</sub>)를 초과하였을 때 차단기 트립 (Trip)신호를 송출한다.

그러나 ④번의 경우는 Start Slope 이상으로 전류가 상승하여 전류변화 연산시간(tΔI)을 초과하여 차(差)전류 설정값 (ΔI<sub>max</sub>) 이하로, 차(差)전류(ΔI)의 전류기울기가 유지시간(T) 이내에 End Slope가 검출되어 계전기는 동작하지 않는다.

⑤번의 경우, Start Slope 이상으로 전류가 상승하여 전류변화 연산시간(tΔI) 설정치를 초과하고, 차(差)전류 설정값 (ΔI<sub>max</sub>) 이내 이지만, 차(差)전류(ΔI)의 전류기울기가 유지시간(T)까지 End Slope 설정값 이상이므로 차단기 Trip신호를 송출한다. ⑥번의 전류기울기 곡선은 최소 기준전류(ΔI min) 이내이므로 계전기는 동작하지 않는다.

2.1.2 직류고속도차단기(HSCB) Trip회로

직류고속도차단기반의 보호시스템에서 고장전류를 검출하여 직류고장선택계전기(50F)가 동작할 경우에 대해서 직류고속도차단기의 주접점이 개방되는 순서를 그림 2에서 보여준다.

전기철도 직류급전계통의 사고전류는 근거리 및 저저항의 큰 사고전류인 경우 직류과전류계전기(76F), 원거리 및 고저항 사고전류인 경우 직류고장선택계전기(50F)로 급전계통을 보호하고 있다. 직류과전류계전기(76F)는 동작 설정값(I<sub>ds</sub>) 이상의 사고전류가 발생할 때 보조릴레이(Aux Ry)와 트립 코일(Trip Coil)의 동작순서와 상관없이 순시 동작하여 전류기울기 20kA/ms, 15ms 이하에서 차단기가 동작하게 되고 SEPCOS는 그림 2와 같이 사고전류 감지 및 저장 성능이 갖고 있다.

직류고장선택계전기(50F)는 전류 설정값을 감지 및 연산하여 고장으로 판단하여 Trip 신호를 송출할 때 보조릴레이(Aux Ry)까지 시간은 154ms 이내이며, 보조릴레이가 반응하여 트립 코일까지 시간이 29ms이고, 트립 코일이 반응하여 직류고속도차단기

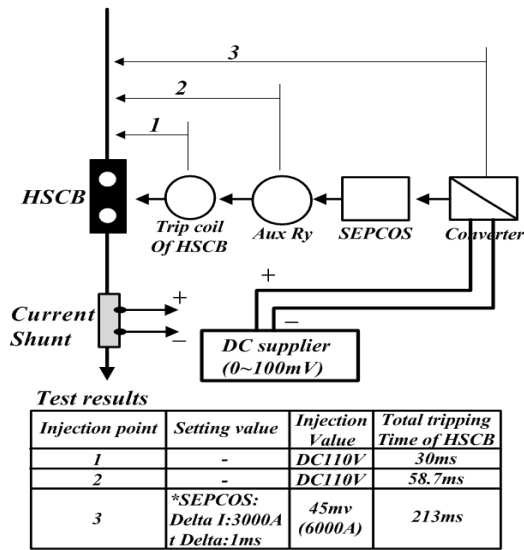


그림 2 직류고속도차단기 트립회로의 시퀀스 로직  
Fig 2 Sequence logic of HSCB trip circuit

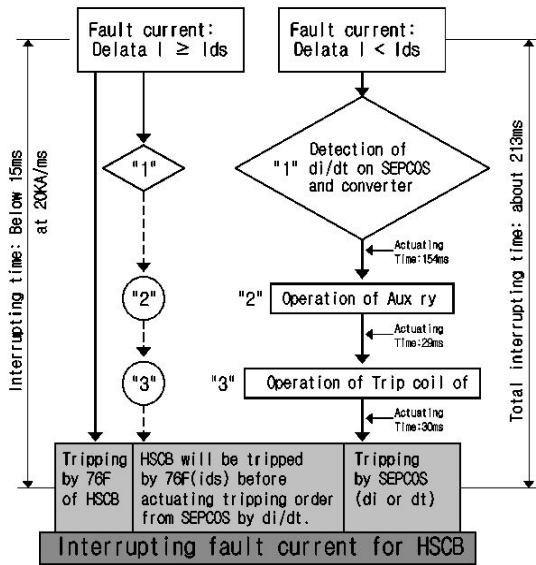


그림 3 트립 로직 및 동작시간  
Fig 3 Tripping logic & operating time

주접점이 개방되는 시간이 30ms이다. 따라서 직류고장선택계전기가 동작하여 그림 3과 같이 직류고속도차단기 주접점이 개방되는 전체 시간은 약 213ms가 된다.

### 2.2 차량기지 내 직류급전 계통에서 사고전류 수식적 고찰

차량기지 내의 직류급전 계통은 차량을 운행하는 급전계통과 마찬가지로 정류기를 통한 직류전원, 전차선, 차량으로 구성된다. 사고전류를 고찰하기 위해 차량기지 내 직류급전 계통에 대한 등

가회로를 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 직류고속도차단기에 대한 전기적 회로를 저항  $R_c$ 와 커패시턴스  $C_c$ 로 표현하고, 급전선을 포함한 전차선은 저항  $R_t$ 와 인덕턴스  $L_t$ , 귀환회로인 선로 임피던스는 저항  $R_r$ 과 인덕턴스  $L_r$ , 철도차량 부하  $R_L$ , 그리고 단락되었을 때의 저항은  $R_g$ 로 나타내었다. 한편 Fujimura와 Honda가 제안한 직류 변전소의 저항 및 인덕턴스는 환경에 따라 다르기 때문에 고려하지 않고 단지 변전소의 직류전원  $V_{dc}$ 로 나타내었다.

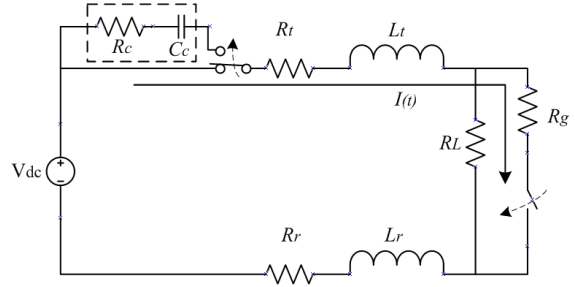


그림 4 차량기지 내의 급전시스템 단락시 등가회로  
Fig 4 Equivalent short circuit of feeding system in rolling stock maintenance depot

정상적인 상태에서는 철도차량 부하  $R_L$ 을 통해 전류가 흐르다가 단락사고가 발생할 경우 단락전류  $i(t)$ 는 저항  $R_g$ 을 통해 흐르게 된다. 이 때의 수식을 표현하면 식 (1)과 같다[6].

$$i(t) = I_m (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (1)$$

여기서,  $R = R_t + R_r + R_g$ ,  $L = L_t + L_r$ ,  $I_m = V_{dc}/R$

단락사고에 대해 과전류가 흐르게 되면 직류고장선택계전기가 차단기가 트립(Trip)될 수 있도록 신호를 보내면, 회로가 차단되면서 직류고속도차단기에 대한 전기적 회로인 저항  $R_c$ 와 커패시턴스  $C_c$ 로 회로가 구성하게 된다.

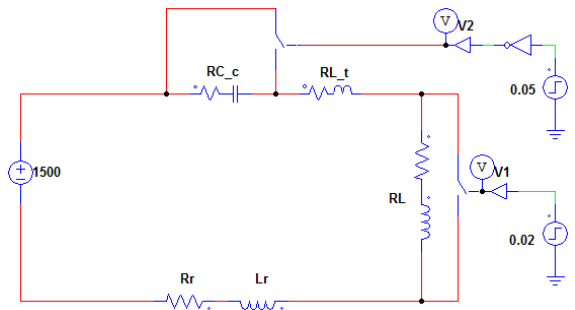


그림 5 그림 4의 급전시스템 단락시 시뮬레이션 회로  
Fig 5 Simulation circuit in case of short at DC feeding system on fig 4

직류고장선택계전기는 시뮬레이션을 통하여 그 동작특성을 예측할 수 있고 실제 특성비교로 정정의 정확성을 상승할 수 있다. 그림 5는 그림 4에 대한 시뮬레이션 회로를 보여준다. 그림 5에서 철도차량 부하  $R_L$ 에 전류를 공급하다가 0.02초에서 단락사고가 발생하게 되면 그림 6에서 보듯이 식 (1)과 같이 시정수에 의해 단락전류가 상승하게 된다. 이후 단락전류가 지속적으로 흐르다가 0.05초에서 차단기가 동작하면 시정수에 따라 전류가 흐르지 않는 것을 보여준다. 급전선 및 레일 임피던스에 따라 시정수가 상이하며 이로 인해 단락전류의 상승기울기 및 하강 기울기가 변하게 된다.

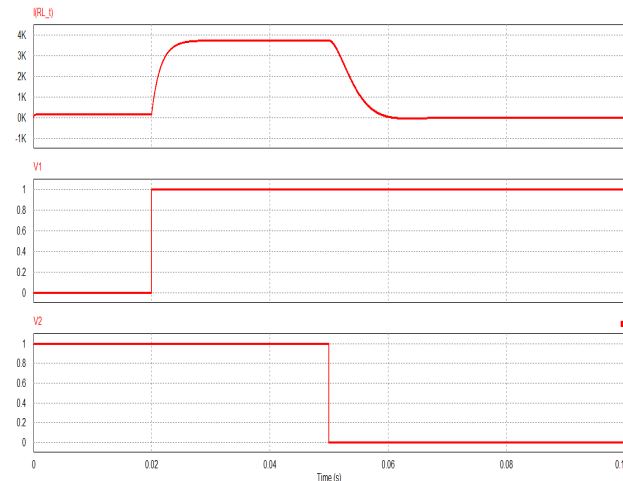


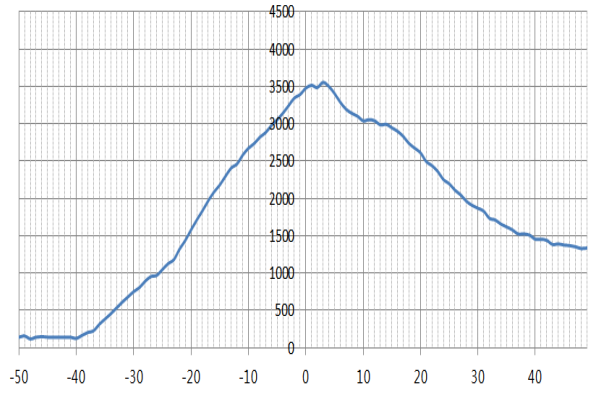
그림 6 그림 5에 대한 단락시의 전류 파형  
 Fig 6 Current waveform in case of short on fig. 5

### 2.3 실험적 고찰을 통한 동작특성분석

표 1과 같이 도시철도 운영기관의 차량기지에 설치되어 운영되고 있는 직류고속도차단기 설치 일례를 통해 1년간 직류고속도차단기 직류고장선택계전기(50F)의 Trip을 살펴보았다. Trip을 구분하면 급격한 전류( $\Delta I_{max}$ )에 의해 68회 동작과 과전류가 지속적으로 흘러 유지시간(T)에 의해 13회 동작하였다. 따라서 SEPCOS에 저장된 45회의 동작특성 데이터를 분석하여 전차선로 급전계통 안전성 향상과 전동차 운행관리에 저해되는 비정상적인 차단요소를 제거하기 위해서는 직류고속도차단기 (HSCB)에서 전동차 주차단기까지 사고와 전동차 주차단기 이후의 시스템 사고를 구분하여야 한다.

직류고속도차단기 동작을 분석하기 위해 급전구역(54C1~54C6)의 직류고속도차단기에 대한 계전기의 동작기록시간이 저장된 45회의 데이터의 그래프를 좌,우 각 50ms로 100ms로 나타내었다. 전기철도차량 고장에 의한 LBTL(Line Breaker Trouble Lamp)이 동작할 때 사고 전류를 분석하였으며, 직류고장선택계전기(50F)의 동작은 급격한 전류( $\Delta I_{max}$ )에 의해 35회, 과전류가 지속적으로 흐른 유지시간(T)으로 10회의 Trip이 발생하였다.

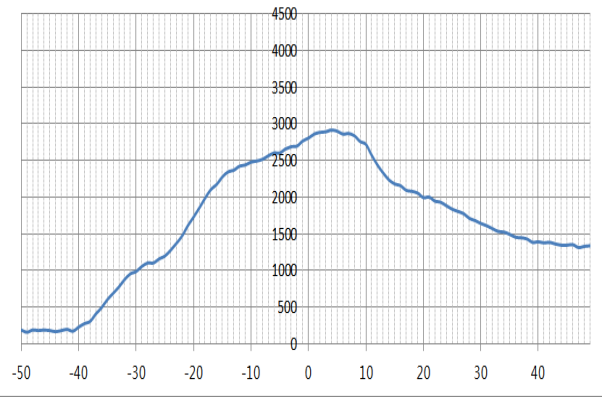
그림 7은 검수선에 설치된 54C6의 직류고장선택계전기 동작 특성으로 그림 1의 ㉓번과 같은 특성을 보였다. Start Slope 이상으로 전류가 상승하여 End Slope, 유지시간 35ms 등이 만족하였으나, 전류변화 연산시간 ( $t_{\Delta I}$ )이후 최대 차(差)전류( $\Delta I_{max}$ )의 설정값 3,000A 이상인 3,023A가 흘러 차단기 트립 (Trip)신호에 따라 차단기가 동작하였다.



2014-01-01 23:03:43:72 Fault detected : DDL Positive (Delta I)

Nb detec I :	14	Nb detec T :	1	Slope E :	72 kA/s
Slope F :	18 kA/s	delta I max :	3000 A	t delta I max :	0 ms
duree T :	35 ms	delta I min :	700 A	DELTA I :	3023 A
T mes. :	34 ms				

그림 7 차전류에 의한 직류고장선택계전기의 동작 특성  
 Fig 7 Operating characteristic of DC FDR by differential current (54C6)



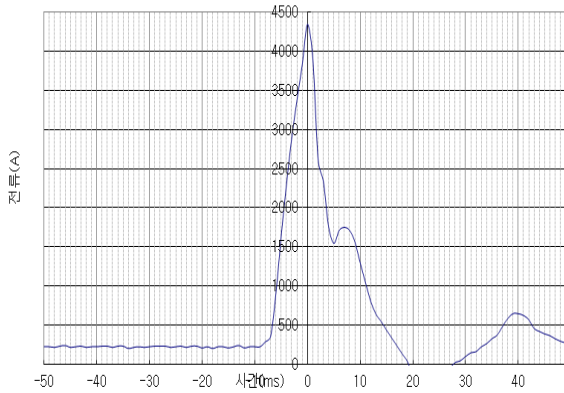
2014-01-03 11:39:06:35 Fault detected : DDL Positive (Delta T)

Nb detec I :	6	Nb detec T :	4	Slope E :	72 kA/s
Slope F :	18 kA/s	delta I max :	3000 A	t delta I max :	0 ms
duree T :	35 ms	delta I min :	700 A	DELTA I :	2203 A
T mes. :	35 ms				

그림 8 유지시간에 의한 직류고장선택계전기의 동작 특성  
 Fig 8 Operating characteristic of DC FDR by duration time (54C2)

그림 8은 그림 1의 ㉔번과 같은 동작특성으로 직류고장선택계 전기는 Start Slope 이상으로 전류가 상승하여 전류변화 연산시간( $t\Delta I$ ) 설정치를 초과하고, 차(差)전류 설정치( $\Delta I_{max}$ ) 이내 이지 만, 전류기울기 유지시간(T)이 35ms 이상 지속되어 차단기 Trip 신호에 의해 차단기가 동작하였다.

그림 9는 그림 1의 ㉕번과 같은 동작특성으로 Start Slope 이 상으로 전류가 상승하여 차(差)전류 설정치( $\Delta I_{max}$ )를 초과한 3437[A]가 흘렀으며, 초기 기울기부터 정정 전류변화 연산시간( $t\Delta I$ )에 차단기 Trip 신호를 발생시킨다. 전류변화 연산시간( $t\Delta I$ ) 이후, End Slope가 검출되어도 직류고장선택계전기에 의해 차단 기가 동작하였다.



2014-01-23 17:30:53:33 Fault detected : DDL Positive (Delta I)

Nb detec I :	16	Nb detec T :	1	Slope E :	72 kA/s
Slope F :	18 kA/s	delta I max :	3000 A	t delta I max :	0 ms
duree T :	35 ms	delta I min :	700 A	DELTA I :	3437 A
T mes. :	6 ms				

그림 9 차전류에 의한 직류고장선택계전기의 동작 특성

Fig 9 Operating characteristic of DC FDR by differential current (54C6)

직류고장선택계전기(50F)는 전류변화량을 감지 및 연산하여 과부하 고장으로 판단한 후 직류고속도차단기가 완전히 개방될 때까지 걸리는 시간이 약 213ms이며, 직류고속도차단기반의 보호시스템으로 차단기 개방 전에 전류의 변화가 하향하여 전류가 소멸되는 것으로 기록되었다. 차(差)전류의 크기는 표 3과 같이 4kA 이내가 93.3%로 나타났다. 그리고 차(差)전류에 대한 시작기 울기(Start Slop) 유지시간은 표 4와 같이 55 ms 이내가 98%로 서 자연적으로 소멸함을 보였다.

표 3 차전류( $\Delta I$ )에 대한 직류고속도차단기의 동작분포

Table 3 Operation distribution of HSCB on differential current( $\Delta I$ )

단위(kA)	계	3 미만	3~3.5	3.5~4	4~4.5	4.5 이상
횟수	45	7	20	15	2	1

표 4 시작기울기 유지시간(T)에 대한 동작분포

Table 4 Operation distribution of HSCB on start slop holding time(T)

단위(ms)	계	35 미만	35~40	40~45	45~55	55 이상
횟수	45	4	28	10	2	1

### 2.4 직류급전계통 안전성을 위한 DC FSR(50F) 설정

급전계통 보호와 시스템간의 인터페이스 등을 고려할 때 차량 기지 선로별 급전용량과 전동차의 효율적인 분산유치 운용실태 등을 고려하여 추가로 설정치 조정시행을 판단하여야 한다.

본 논문에서는 표 5와 같이 직류고장선택계전기(50F) 설정값 을 기존대로 하였을 경우 불필요한 동작 빈도가 자주 발생하였 다. 1차로 상향조정된 결과 수 회의 직류고속도차단기가 불필요 한 과부하 트립(Trip)현상이 발생하여 2차 상향조정으로 원활한 급전계통을 유지할 수 있었다.

표 5 직류고장선택계전기(50F) 설정치 변경

Table 5 Setting values of DC FSR (50F)

구 분	기 존	변 경		비 고
		1차	2차	
시작 기울기	72kA/s	72kA/s	72kA/s	
종료 기울기	18kA/s	18kA/s	18kA/s	
차(差)전류( $\Delta I_{max}$ )	3,000A	3,500A	4,000A	상향설정
전류변화연산시간( $t\Delta I$ )	0ms	10ms	10ms	상향설정
유지시간(T)	35ms	45ms	55ms	상향설정
최소 기준전류	700A	700A	700A	

### 3. 결 론

도시철도 차량기지 내의 급전계통을 통해 검수선(54C6) 등에 전력을 공급하게 된다. 그러나 전동차를 경정비한 후, 성능확인 Power시험 중에 불필요한 과부하 Trip 현상이 빈번하게 발생하 였다.

본 논문에서는 직류 급전을 공급받는 도시철도 차량기지 내의 급전계통 안전성 확보를 위해 고속도차단기 동작성능을 향상시키 도록 직류고장선택계전기(50F)의 최적 설정값에 대한 실험적 고 찰을 하였다. 즉, 전류변화량을 감지 및 연산하여 과부하 고장으 로 판단한 후 직류고속도차단기가 완전히 개방될 때까지 걸리는 시간이 약 213ms이었다. 이 같은 결과를 고려하여 직류고장선택 계전기의 설정값에 반영하였다. 이로 인한 인접선로로의 과급방 지와 차단기 동작성능 향상 및 빈번한 차단기 동작에 따른 직류 고속도차단기 내구수명에 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다. 다 만 다른 구간 또는 노선에서는 해당 노선의 특성을 고려한 보호 계전기 설정값 변경이 필요할 것으로 보인다.



**감사의 글**

본 연구는 2015년도 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 연구사업 중 '철도 핵심부품 및 장치 기술개발 2단계(철도부품창의연구센터)' 과제의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

**References**

- [1] Yonghan Yoon, Nakkyung Kim, Taesoo Kim, "The Affection on Spring Type Tensioning Device Due to Spring Breakage of Spring Type Tensioning Device", Autumn Conference&Annual Meeting of the KSR, pp. 487-493, 2014.
- [2] Yong Hyeon Cho, "Analysis of the Major Design Parameters of a Pantograph-Railway Catenary System for Improving the Current Collection Quality", Journal of the KSR, Vol. 17, No. 1, pp. 7-13, 2014.
- [3] Jae-Bong Lee, Jae-Moon Kim, "Theoretical Study of Neutral Section Considering the Driving Characteristics of ATO Urban Railway Vehicle", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 10, pp. 1470-1474, 2013.
- [4] Ho-Sung Jung, Young Park, Hyun-Il Kang "Implementation of Prediction Program for Deterioration Judgment on Substation Power Systems in Urban Railway", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 6, pp. 881-885, 2013
- [5] Wong-Ki Cho, Kyu-Hyoung Choi "Modeling for the Analysis of Rail Potential in the DC Railway Power System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 24, No. 6, pp. 138-146, 2010.
- [6] 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", urnal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 77-86, 2005.

**저 자 소 개**



**이 재 봉 (Jae-Bong Lee)**

2007년 서울과기대 전기신호공학과 졸업(석사). 1984년~현재 서울메트로 근무. 2014년~현재 한국교통대 교통대학원 교통정책 교통시스템공학과 박사과정



**정 노 건 (No-Geon Jung)**

2012년 한국철도대 철도차량전기와 졸업. 2015년 한국교통대 교통대학원 교통시스템공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 교통시스템 공학과 박사과정



**김 재 문 (Jae-Moon Kim)**

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 교수  
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr