

경전철 직류급전계통을 위한 디지털 보호제어장치의 개발 및 적용에 관한 연구

(A Study on the Development and Application of Digital Protective Relay for DC Feeding System of Light Rail Transit System)

백병산* · 김재철

(Byung-San Baek · Jae-Chul Kim)

요 약

본 논문은 경전철 급전시스템을 위한 직류보호제어장치의 개발 및 적용에 관한 것이다. 이를 위하여 직류급전계통의 단락특성을 이론과 실측자료를 이용하여 분석하였으며, 사고전류를 검출하는 기법의 개선안을 제시하여 직류 보호계전장치를 개발하였다. 특히 계전기능 중 가장 중요한 고장선택계전기(50F)의 계전알고리즘을 개선하여 개발하였고, 이를 경북 경산 경전철 시험선에 설치하여 운전 중이다.

직류 보호계전기를 현장에 적용하기 위하여 그동안 불분명하고 명확하지 않았던 규정 및 규격을 개발과정에서 명확하게 정리하였다. 또한 특성시험과 EMC 시험 규정 중 일부항목에 대해 시험방법이 제정되어있지 않아 IEC 규정의 분석을 통하여 객관적이고 타당한 시험회로, 방법 및 평가방법을 제안하였다.

Abstract

The DC protection and control device for the feeding system of a Light Rail Transit(LRT) system is developed. For the development, the short circuit characteristics in the system are analyzed. As a result, a protection algorithm for the DC fault selective relay (50F) is newly proposed, and principles of the DC fault selective relay, Line Test Device (LTD), DC Over Current Relay (DC OCR) are introduced. From the development, the specifications and codes used to be unclear have become clarified and summarized. Moreover, the methods to examine the protective characteristics and Electromagnetic Compatibility (EMC) are established. Finally, the performance and the effectiveness of the developed protective relay have been verified with the test based on IEC. For the reliability of the system, the relay has been installed and is being operated at the test track of the LRT system at Gyeong-San.

Key Words : DC fault selective relay(50F), Line Test Device, Short circuit, DC Over Current Relay

* 주저자 : 현대중공업(주) 기전연구소 책임연구원

Tel : 031-289-5190, Fax : 031-289-5150

E-mail : bsbaek@hhi.co.kr

접수일자 : 2004년 12월 8일

1차심사 : 2004년 12월 10일

심사완료 : 2004년 12월 23일

1. 서 론

전기철도 전기시스템에서 교류계통의 보호는 그

기술과 관련규정이 보편화 되었으나, 직류계통의 보호 및 제어는 그렇지 못하다. 특히 몇몇 선진 제조사만이 보유하고 있는 기술로, 그의 설치 및 적용을 시행사 또는 건설사들도 제조사에 의존하고 있는 실정이다. 신뢰성과 안전성이 중요한 보호계전계통에 대하여 관련 기관의 동의된 국제적인 규정 또는 규격이 존재하지 않아 세계적으로 다양한 모습을 보인다 [1].

외국의 경우도 비슷하지만 특히 국내의 경우는 그 적용에 있어서 기술의 정확한 이해와 적용 규정 및 규격에 대하여 근거 없이 선진사에서의 적용사례를 모두 인정하여 설치 및 운영하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 직류보호계통의 발전과정, 보호개념을 분석하여 직류전기철도 급전보호계통에서 가장 중요하고, 필수적으로 적용되는 고장선택계전기가 탑재된 직류보호제어장치를 개발한 내용의 전반에 대하여 기술하였다. 고장선택계전기의 계전알고리즘을 도출하기 위하여 급전회로의 이론적 분석 및 실측된 데이터에 의한 사고전류를 분석하였으며, 고장 검출 개념 및 알고리즘을 도출하여 보호계전장치를 개발하였다. 이 과정에서 관련된 필수 요구조건, 규정 및 규격 등을 포함하여 특성시험과 EMC 시험 규정 중 일부항목에 대해 시험방법이 제정되어있지 않아 IEC 규정의 분석을 통하여 객관적이고 타당한 시험장비 및 시험방법을 제안하였다.

2. 직류전기철도의 보호제어장치의 적용 현황

직류 급전의 경우는 고장시 차단 및 보호측면에서 교류의 경우보다 쉽지 않다. 전기철도가 개발되어 상용화 된 이후에 여러 가지의 시행착오를 거친 후 직류회로의 차단현상에 대한 관심이 높아지고, 특히 고장전류의 조기검출과 차단에 대한 연구가 활발하게 되었다[2].

이러한 연구 결과로서 1960년대 이후 고속도 차단기가 개발이 되었다. 고속도 차단기의 가장 큰 특징은 고장전류가 최대치에 도달하기 전에 차단하는 성능으로, 전류 상승율이 빠른 경우에는 정정치 이하의 전류에서도 검출 차단하는 것이다. 매우 큰 고장

전류를 한류차단하기 위한 한 가지 수단으로서 선택성에 의해 차단기의 정정치보다 작은 고장전류도 결과적으로 검출차단을 가능하게 하는 것이다. 이러한 효과를 얻기 위하여 개발되어 적용된 것이 직류 급전용 고속도 차단기이며, 그림 1은 고속도 차단기의 특성을 잘 보여준다.

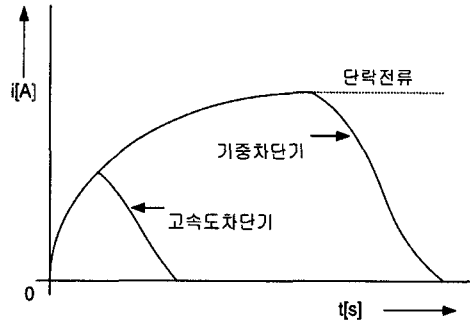


그림 1. 고속도 차단기의 차단특성
Fig. 1. High speed circuit breaker characteristic

고속도 차단기가 실용화된 이후 많이 적용되어 왔으나, 고속도 차단기만에 의한 보호는 부하전류 증대에 동반하여 고속도차단기의 정정치 상승으로 점점 곤란하게 되었다. 즉, 사고전류가 작은 경우(원거리 사고, 고저항 접지사고)와 수송량의 증대로 인하여, 부하전류의 증가는 고속도차단기만으로 확실한 보호가 되지 않아 정정치와 선택율로 정해진 일정치 이상의 전류에서는 고장을 검출하는 단점을 보완하게 되었다. 즉 그 결과로서 선택고장 보호장치(이하 50F 계전기라고 칭함)는 선로전류의 절대치에 무관하게 고장시의 전류변화를 검출하는 것으로, 고속도차단기의 정정치가 단위 부하전류보다 크게 될수록 그의 성능을 발휘하게 되는 것이다.

이 선택특성을 적용하려는 노력은 철도 선진국인 영국의 Whipp & Bourne, 독일의 Adtranz, 스위스의 Secheron 등을 중심으로 이루어 졌으며, 일본의 경우 국가적 차원(전철 직류회로 차단연구위원회)에서 고장선택차단장치를 개발하여 적용해 왔다. 전자산업과 디지털산업의 발전과 함께 오늘의 디지털보호계전기로 발전하여 전 세계적으로 적용되고 있다.

3. 직류급전 운전 및 사고전류의 특성 분석

3.1 이론적 분석

급전시스템은 직류전원인 정류기와 전차선 그리고 차량으로 구성되어 있다. 차량에 대한 운전전류의 전형적인 모양은 그림 2와 같이 여러 단계를 거쳐 최대부하전류에 이른다. 이러한 변화의 모양은 부하인 차량 특성 및 운전패턴에 기인된다.

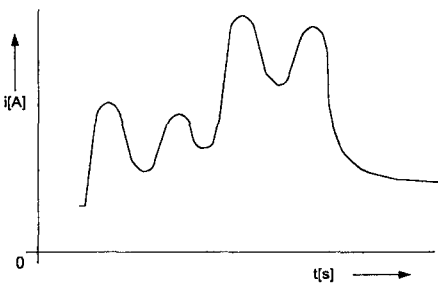


그림 2. 전형적인 운전전류의 파형
Fig. 2. Typical operating current waveform

사고전류를 살펴보기 위하여 급전시스템에서 단락이 발생한 경우의 등가회로를 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 각각의 기호로서 E_s 및 E_a 는 각각 소스의 전원과 사고시의 아크전압, R_s 및 L_s 는 각각 전원측의 등가 저항과 인덕턴스, R_f 및 L_f 은 각각 급전선의 저항과 인덕턴스이며, R_a 는 사고 점의 저항을 표현한 것이다. 또한 R_r 및 L_r 은 직류 변전소의 저항 및 인덕턴스이다. Fujimura와 Honda가 제안한 전원측의 등가 저항 및 인덕턴스 값을 보다 상세히 기술하면 아래 식(1)과 같이 표현할 수 있다. E_a 및 R_a 는 사고시 마다 정확히 산정하기 쉽지 않으나 급전전압이 1500[V]이고 가급급전의 경우에는 각각 약 300[Vdc], 0~0.1[Ω]이 적용되고 있으며, 차량에 전원을 공급하는 급전선이 강체도선 및 제3제조일 경우에는 고려하지 않고 있다[2-4].

$$R_s = \frac{3}{2} \times R_r + \frac{3}{\pi} \times w \times L_r \quad L_s = \frac{3}{2} \times L_r \quad (1)$$

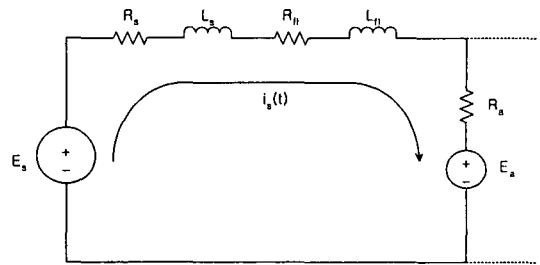


그림 3. 급전시스템 단락시 등가회로
Fig. 3. Equivalent short circuit of feeding system

고장점의 저항 및 아크전압이 고려되지 않을 경우의 사고시 단락전류는 식(2)과 같이 표현할 수 있으며, 일반적인 사고전류의 파형은 그림 4와 같다. 수식에서 알 수 있듯이 사고전류의 파형은 저항성분과 인덕턴스 성분에 따라 기울기 및 단락전류의 정상치와 도달시간이 달라짐을 알 수 있다.

$$i_s(t) = I_m(1 - \exp(-\frac{R}{L}t)) \quad (2)$$

여기서 관련 약어를 간략히 기술하면 아래와 같다.

$$R = R_s + R_f,$$

$$L = L_s + L_f$$

$$I_m = \frac{E}{R}; \text{ 단락전류의 최대치,}$$

$$T = \frac{L}{R}; \text{ 시정수}$$

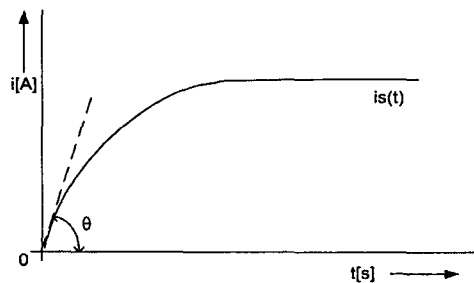


그림 4. 전형적인 직류 사고전류의 파형
Fig. 4. Typical DC fault current waveform

3.2 실측자료에 의한 고장전류 특성분석

실제 사고전류에 의한 특성을 정확히 파악하고자 첫 번째 자료로서 홍콩의 MTRC 경전철의 시운전시

경전철 직류급전계통을 위한 디지털 보호제어장치의 개발 및 적용에 관한 연구

전원으로부터 2.28[km] 지점의 사고전류를 분석하였으며 실측 파형은 그림 5와 같다[5]. 표 1을 통하여 상세히 알 수 있듯이 시간대별로 시정수가 달라지며 사고전류의 지속시간은 약 42.5[ms]로 나타났다.

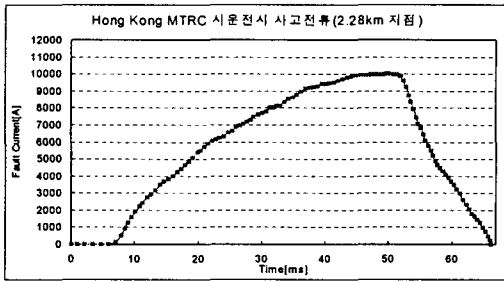


그림 5. 홍콩 MTRC 사고전류(2.28(km) 지점)
Fig. 5. Fault current recording from Hong Kong MTRC(2.28(km))

표 1. 홍콩 MTRC 사고전류와 시정수
Table 1. Fault current and Time constant of the faulted circuit on Hong Kong MTRC

System (fault distance)	Time (msec)	Current (A)	Time constant (msec)
Hong Kong MTRC (2.28[km])	2.0	1481	4.8
	3.9	2489	
	3.9	2489	6.5
	7.8	3827	
	7.8	3827	19.8
	11.7	5247	
	11.7	5247	23.0
	15.6	6481	
	15.6	6481	21.1
	42.5	10,000	

그림 6은 실측 사고전류 분석자료로서 영국의 도클랜드 경전철(DLR)의 급전변전소 시운전시 측정된 것으로, 전원으로부터 2.88[km] 지점의 사고전류에 대한 실측 파형이다[5]. 표 2는 시간대별 전류값과 시정수를 나타내고 있다. 이 경우의 사고전류의 지속시간은 약 23.9[ms]로 나타났다.

그림 7 또한 영국의 도클랜드 경전철의 급전 변전소 시운전시 측정된 것으로 전원으로부터 1.44[km] 지점의 사고전류에 대한 실측 파형이다[5]. 표 3은

시간대별 전류값과 시정수를 나타내고 있다. 이 경우의 사고전류의 지속시간은 17.9[ms]로 나타났다. 따라서 같은 시스템이라도 사고지점에 따라 사고전류의 특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

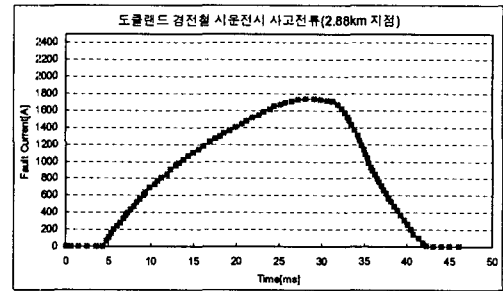


그림 6. 영국 DLR 사고전류(2.88(km) 지점)
Fig. 6. Fault current recording from DLR(2.88(km))

표 2. 영국 DLR 사고전류와 시정수(2.88(km))
Table 2. Fault current and Time constant of the faulted circuit on DLR(2.88(km))

System (fault distance)	Time (msec)	Current (A)	Time constant (msec)
London DLR (2.88[km])	0.5	107.4	1.6
	1.0	185.6	
	1.0	185.6	2.9
	2.0	315.8	
	2.0	315.8	6.6
	4.1	546.9	
	4.1	546.9	11.1
	8.2	924.5	
	8.2	924.5	15.1
	23.9	1678.6	

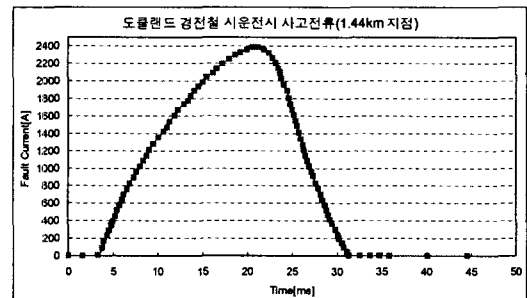


그림 7. 영국 DLR 사고전류(1.44(km) 지점)
Fig. 7. Fault current recording from DLR(1.44(km))

표 3. 영국 DLR 사고전류와 시정수(1.44(km))
Table 3. Fault current and Time constant of the faulted circuit on DLR(1.44(km))

System (fault distance)	Time (msec)	Current (A)	Time constant (msec)
London DLR (1.44[km])	0.5	143.2	2.3
	1.0	257.2	
	1.0	257.2	8.4
	2.0	485.0	
	2.0	485.0	15.0
	4.1	908.2	
	4.1	908.2	11.6
	8.2	1546.3	
	8.2	1546.3	12.9
	17.9	2387.3	

3.3 운전전류와 사고전류 특성비교

전기철도는 부하인 차량이 매 시간 변화하는 동적 특성을 가지고 있기 때문에 운전전류와 사고전류를 일정한 값으로 정의할 수 없으며, 위에서 살펴본 바와 같이 언뜻 보기에는 달라 보이지만 이를 구분하기는 쉽지 않다. 특히 급전변전소에서 떨어진 원거리 사고의 경우는 더욱 그러하다[6,7,8]. 그림 8에 열차의 운전전류와 근거리사고, 원거리사고시의 단락전류를 비교하여 나타내었다. 원거리고장의 경우 고장전류의 크기가 운전전류의 범주에 포함될 수 있는 경우를 묘사하였다.

직류급전회로에서 부하전류와 사고전류와의 특성을 비교하여 정리하면 다음과 같다.

(1) 사고전류는 거리에 따라 일정한 값으로 유지되나, 부하전류는 보통 지속적으로 증감하며 대전류가 장시간 지속되는 일은 없다.

(2) 사고전류의 ΔI 는 부하전류의 ΔI 보다 일반적으로 크다.

(3) 사고시 전류변화율(di/dt)은 급전회로의 인덕턴스에만 지배를 받으며, 부하시 전류변화율(di/dt)은 급전회로와 모터 인덕턴스의 합에 지배를 받아, 사고시보다 변화율이 작게 된다. 즉 급전 회로내에서 시시각각 변화하는 부하전류나, 사고전류의 성질을 조사하면, 어떤 전류의 값에서 다음 전류의 값으로

변화 할 때의 ΔI 의 크기를 비교하는 경우 부하전류보다도 사고전류 쪽의 값이 일반적으로 크다.

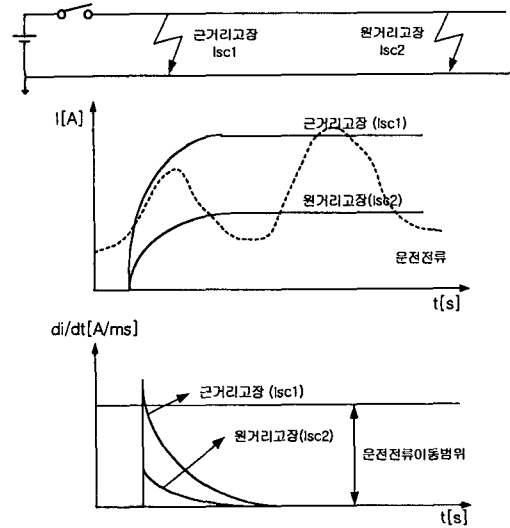


그림 8. 운전전류와 사고전류의 비교
Fig. 8. Comparison of operating vs. fault current

4. 고장검출 원리 및 계전알고리즘

4.1 고장검출 및 계전원리

고장전류와 운전전류의 특징들로부터 착안하여 아래 그림 9는 사고의 판별을 설명하기 위한 전류파형으로 가로축은 시간을, 세로축은 전류를 나타낸다. 운전전류와 사고전류를 구분하는 방법으로는 전류 변화율(di/dt [A/ms])과 전류변화량(ΔI [A])을 검출하는 것을 생각할 수 있다. 이 중 한 가지를 선택하거나 또는 2가지 요소를 모두 이용하여 검출하는 방안이 있다. ΔI 는 전류의 미분치가 양의 쪽으로 급변한 시점으로부터의 전류의 증분치를 보인 것으로 ΔI 가 정정치를 넘지 않으면 사고가 아니라고 판정하여 운전전류와 사고전류를 식별한다. 본 연구에서는 두 가지 요소를 모두 이용하여 고속도 차단기에 투입신호를 출력하는 방식을 적용하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 근거리 사고의 경우 사고전류는 운전전류와 크기나 기울기 면에서 확실한 차이를 보여 쉽게 구분이 가능하나 원거리 사고나 고저항 사고의 경우는 운전전류와 고장전류의 판별이 곤란한 경우가 발생

경전철 직류급전계통을 위한 디지털 보호제어장치의 개발 및 적용에 관한 연구

될 수 있으므로 보호 계전시 반드시 고려되어야 할 부분이다.

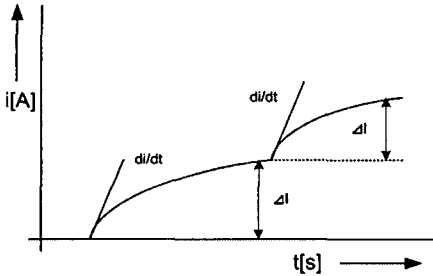


그림 9. 사고전류 검출을 위한 di/dt 및 ΔI
Fig. 9. di/dt and ΔI for detecting the fault current

4.2 제안된 계전알고리즘의 구현

극단적인 근거리 고장과 원거리 고장도 검출하여 보호기능을 수행할 수 있도록 알고리즘이 작성되었다. 특히 운전전류로부터 고장전류를 정확히 판별하여 보호계전기능의 신뢰도를 향상시키고 소기의 목적을 달성하고자, 전류의 검출에서부터 검출오차를 줄이고 내 노이즈성을 확보하여 신뢰도를 증가시키는 방법을 고려하였다. 또 전류검출에 있어서 전류의 특성에 맞춰 샘플링 함으로서 검출오차를 줄이는 기법도 적용하였다. 또한 고 신뢰성의 보호특성을 확보하고자 전류변화를 및 전류변화량에 대한 고장 전류를 판단하는 기법을 이중화 및 이를 확인하는 방법으로 보호알고리즘을 구현하였다.

구현된 알고리즘의 특성은 그림 10과 같으며, 프로그램으로 구현된 알고리즘을 설명하면 측정된 전류변화율의 값에 따라 순시동작부(Instantaneous part) 또는 한시동작부(Delayed part)로 구분된다. 만일 di/dt가 설정된 기준값인 di/dt 설정치보다 크다면 그 전류치에 대한 평가는 순시동작부에서 이루어지고, 그렇지 않다면 한시동작부에서 평가를 하게 된다. 이 중 한시동작부는 di/dt, ΔI가 상대적으로 작은 원거리 단락사고의 경우에 이를 정상운전전류와 구별하는 역할을 수행하게 된다. 각 동작부는 전류 변화량의 기준값인 한시부 값(ΔID)과 순시부 값(ΔII)을 가지며, 순시동작부에서는 이 기준값을 넘어 사고전류로 판별되면 즉각적으로 차단신호를 발생하

고, 한시동작부에서는 일정 시간 지연 후에 차단신호를 발생시킨다.

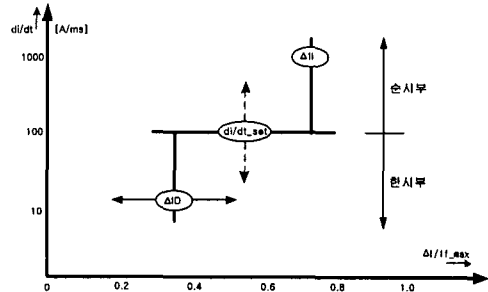


그림 10. 고장선택 계전장치의 동작특성
Fig. 10. Operating characteristic of fault selection device

5. 직류 보호제어장치의 개발

5.1 사양과 특성

5.1.1 사양

개발 직류보호제어장치는 전력 IT화와 복잡 다양한 해진 시스템의 특성을 모두 고려하여 동작이 가능하도록 40여개의 입출력 제어/감시 신호를 사용하였다. 각 배전반별 인터록신호를 포함하여 중고장신호, 화재감지신호, 차단기, 단로기의 상태신호등 다양한 정보들이 모두 입력되며 단순한 스위치 동작(ON/OFF)시에도 해당 인터록 신호의 확인을 거친 후 동작이 수행되고 보호로직 동작중이라도 우선순위가 높은 트립 인터록 신호가 입력되면 시스템 보호루틴이 구동되도록 설계되어 안전을 고려하였다. 또한 표준화된 통신을 통하여 정보 및 데이터 교환이 가능하도록 하였으며, 원격제어 및 감시가 가능하게 설계되었고 보호로직으로는 선로시험기능, 고장선택계전기능, 과전류계전기능이 탑재되어 있고 디지털 보호제어장치의 장점을 살려 향후 필요시 쉽게 확장이 가능하도록 설계 되었다[9,10,11].

5.1.2 입출력 신호의 특징

직류보호제어장치로 입력되는 신호는 입력 32점(내부신호 4점 포함) 출력 12점 등 총 44점(급전용

배전반 기준)으로 아래 표 4와 같다.

표 4. 직류 보호제어장치의 입출력신호
Table 4. Signals of input/output for the device

구분	내용	
입력 (DI)	인터록	고속도차단기(HSCB) 및 단로기(DS) 상태, 중고장(86) 신호
	상태 접점	HSCB 및 DS 운전상태, 선로시험 퓨즈상태, HSCB 트럭위치, DS 수동조작, 화재신호(29)
	스위치 정보	제어상태(Remote/Local) 정보, HSCB 및 DS 운전상태, HSCB 직접제어(Direct On/Off),
출력 (DO)	기기	HSCB 및 DS 제어, 선로시험 접촉자 구동
	램프	고장종류별 Lamp, 선로시험 고장 램프, 직접 트립 램프

5.2 보호협조 및 인터페이스 제어

5.2.1 보호협조 기능

1) 선로시험장치(LTD : Line Test Device)

전철용 직류급전시스템의 경우 그 특성상 시스템 보호 및 인명보호 측면에서 차단기를 투입하기 이전에 부하전력회로의 단락상태 이상유무의 확인이 필요하다. 따라서 그림 11과 같이 병렬로 시험회로를 구성하였으며 설정된 시간동안 선로시험 저항을 설치하여 적정한 시험전류를 흘리고 보호제어장치로 입력되는 전류 및 전차선에 인가되는 전압값을 분석하여 고속도 차단기의 투입여부를 결정하였다.

2) 고장선택 계전기기능(Fault Select Function/50F)

전기철도의 동적부하 특성을 효과적으로 분석하여 고장전류와 운전전류를 구분하기 위해 di/dt [A/ms]와 ΔI [A]를 이용하였다. 순시변화율, 순시변화량, 순시시간지연, 한시변화율, 한시변화량, 한시시간지연 등의 항목을 선로의 조건에 맞게 설정하여 입력할 수 있도록 하였으며, 단거리사고와 원거리사고(고저항사고)에 효율적으로 대응할 수 있도록 설계하였다.

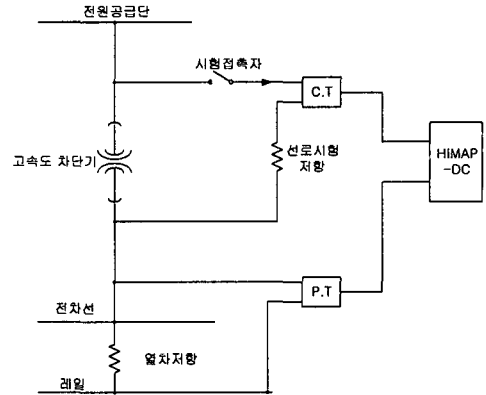


그림 11. 선로시험장치 회로
Fig. 11. Configuration of Line Test Device

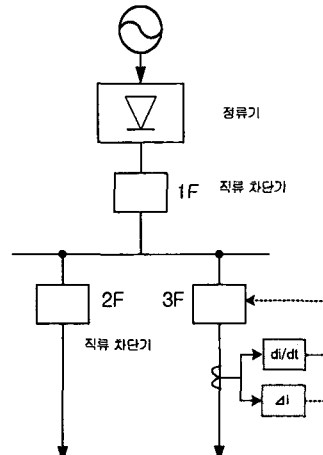


그림 12. 고장선택계전기의 회로
Fig. 12. Configuration of Fault Select Function(50F)

제안된 알고리즘을 아래 그림 12와 같이 구현하여 순시동작부에서는 이 기준값을 넘어 사고전류로 판별되면 즉각적으로 차단신호를 발생하고, 한시동작부에서는 일정 시간지연 후에 차단신호를 발생시킨다.

3) 과전류계전기기능(76)

직류 급전 시스템의 과전류 보호는 그림 13과 같은 보호곡선을 사용하였다. 부하전류와 최대고장전류의 비(I/I_{f_max})에 대하여 시간요소(t)의 범위를 조정하여 보호영역을 결정하게 되며, 일반적으로 과부하 보호용과 이보다 신속히 동작해야 할 단락보호용의 시간 차이를 반영하기 위해 동작시간이 다른 2

개 시간영역으로 나뉘어 설정하도록 설계하였다.

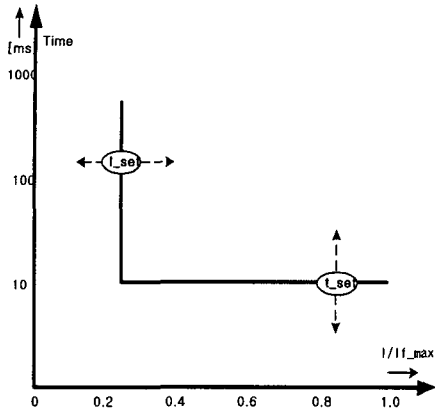


그림 13. 과전류 보호계전기의 특성곡선
Fig. 13. Protection characteristic curve for over current(76)

5.2.2 인터페이스 제어 기능

디지털 보호제어장치는 시스템의 보호는 물론 배전반 내에 설치된 차단기, 단로기 및 각종 스위치 등의 장치를 제어할 수 있어야 하며 배전반 또는 해당 구역 내에서 발생하는 신호들을 모두 분석할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 각 배전반 상호, 상단 시스템(SCADA)으로 통신 신호를 전송할 수 있는 기능을 구비하여야 한다. 디지털 릴레이는 그 특성상 입력 신호와 출력신호 및 인터페이스 설계가 완료되면 제작자의 구성에 따라 보호알고리즘의 포팅 만으로 많은 보호기능을 수행 할 수 있다.

5.3 직류보호제어장치의 시험 및 인증

5.3.1 적용 시험 규격

직류보호제어장치의 경우 아직 국내에서 시도된 바 없는 시험으로 관련규정 및 방법에 대한 특별한 기준이 없었다. 선진사의 경우도 특성시험항목의 경우, 자체적인 장비와 기준으로 인증을 하고 있는 실정이다. 따라서 적용 가능한 규정은 우선순위가 가장 높은 Product Standard IEC 60255(Electrical Relay)series와 일반규정인 Basic Standard IEC 61000-4 series를 적용하였으며 적용이 곤란한 경우 AC계전기의 특성시험에 준하는 시험방식으로 시험

장비를 선정하여 공인시험을 수행하였다[12,13]. 시험은 보호계전 특성시험과 EMC 시험이 이루어졌으며, 상세한 시험내용과 방법 및 결과는 다음과 같다.

5.3.2 보호특성시험

시험항목별 시험조건, 시험방법, 시험기준이 제시되었으며 아래 표 5, 6은 각각 선로시험, 고장선택기능의 시험조건, 시험방법, 정정치 특성이다.

표 5. 선로시험기능 시험규격 및 결과
Table 5. Test code and results for line test function

구분	시험조건	시험방법	동작정정치	오차(%)
단락 저항	선로전압 최소치의 영향을 고려하여 시험전류와 선로전압의 크기를 결정한다. 이때 고정되는 한가지 요소는 최대한 일정 값을 유지	시험전류 및 시험전압중 한가지 요소를 변경하며 고정하고 나머지 가변 요소를 서서히 변화시켜 동작 최소치에서 저항값을 계산	최대	2
			중간	3.34
			최소	5
최소 전압	시험전류에 의한 동작치에 영향을 받지 않도록 시험 전류의 크기를 적절히 결정한다. 이때 시험전류는 최대한 일정 값을 유지	시험전류를 일정 크기에 고정시킨 후 선로전압의 크기를 변경시켜 동작 최소치에서 최소 전압값을 확인	최대 영역	0.9
			중간 영역	0.51
			최소 영역	0.42
반복 횟수	단락저항 또는 최소전압치를 교대로 동작조건으로 90[%]이하로 설정	상기 동작 조건 하에서 동작횟수를 확인	최대 중간 최소	- - -
시험 시간	선로전압 및 시험 전류 동작 조건치 만족수치(120[%])로 입력	입력조건 만족 시 DO 출력단자의 동작시간을 측정	최대	0.13
			중간	0.3
			최소	0.4
제시험 지연 시간	선로전압 및 시험 전류 동작 조건치 불만족수치(90[%])로 변하여 입력	입력조건 불만족시 DO 출력단자의 동작시간을 측정	최대	1
			중간	0.5
			최소	0.5

표 6. 고장선택기능 시험규격 및 결과
Table 6. Test code and results for fault selective function(50(F))

구분	시험조건	시험방법	동작정 정치	오차 ((%)
di/dt1 (근거리 및 원거리 구분)	근거리 ΔI : 최소 근거리시간 지연 : 최소	Function generator를 이용 하여 일정크기의 삼각파 신호를 생성하고 주파수 를 변환하여 설 정치와 비교한다.	최대	1
			중간	1
			최소	2
di/dt2 (원거리/ 안전구분)	원거리 ΔI : 최소 원거리시간 지연 : 최소	Function generator를 이용 하여 진폭의 크기 를 변환하며 설정 치와 비교한다. 이때 주파수는 설 정 기술기보다 반 드시 큰 값을 유 지해야한다.	최대	0.27
			중간	0.15
			최소	0.17
근거리 ΔI	di/dt1 : 최소 근거리 시간 지연 : 최소	Function generator를 이용 하여 진폭의 크기 를 변환하며 설정 치와 비교한다.	최대	1
			중간	1
			최소	2.5
원거리 ΔI	di/dt2 : 최소 원거리 시간 지연 : 최소	이때 주파수는 설 정 기술기보다 반 드시 큰 값을 유 지해야한다.	최대	0.9
			중간	0.7
			최소	1.5
근거리 시간지연	di/dt1 : 최소 근거리 ΔI : 최소	Source simulator 를 이용하여 동 작조건인 120 [%] (di/dt, ΔI)을 만족시킨 후 출 력단자의 반응시 간을 측정한다.	최대	3
			중간	2
			최소	16.6
원거리 시간지연	di/dt2 : 최소 원거리 ΔI : 최소	Source simulator 를 이용하여 동 작조건인 120 [%] (di/dt, ΔI)을 만족시킨 후 출 력단자의 반응시 간을 측정한다.	최대	
			중간	2
			최소	2

특성시험 중 선로시험기능, 고장선택기능에 사용
한 장비는 함수 발생기, 전원 시뮬레이터, 펄스 유니
버설 테스트 시스템, 오실로그래프 및 2562 직류전
원 기준발생기 등을 사용하였으며 결선 회로도도 그
림 14, 15와 같다.

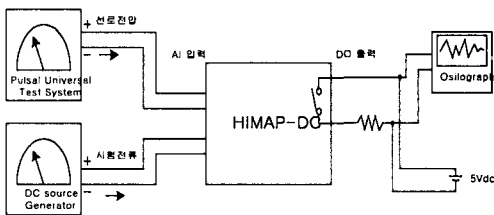


그림 14. 선로시험기능 시험 결선도
Fig. 14. Test configuration of line test function

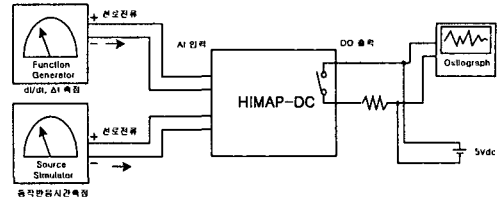


그림 15. 고장선택기능 시험 결선도
Fig. 15. Test configuration of fault selective function(50F)

5.3.3 환경특성시험

IEC 60255 series에 언급되어있는 시험기준과 노
이즈의 크기 등이 일반적으로 사용되는 AC계전기를
기준으로 설정되어 있다. 따라서 DI, DO의 경우는
AC와 DC계전기가 큰 차이가 없으나 AI 회로는 그
차이가 매우 크다. AC의 경우는 내부적인 PT와 CT
를 이용하여 110[V], 5A를 입력받기 때문에 상대적
으로 외부 노이즈에 비해 강한 내성을 갖게 되나 DC
의 경우는 수십 [mA]급 신호가 입력되기 때문에 동
일한 기준의 노이즈 크기로는 평가가 곤란하므로 입
력회로의 보호에 주의가 필요하다.

표 8. EFT burst 시험 규격 및 결과
Table 8. Test code and results for EFT burst

시험방법 및 기준	인가개소	인가 방법	시험 결과
0 적용규격 : IEC 60255-22-4(2002. 04.)	제어전원 회로	Com mon Mode	양호 합
0 시험사양 - 전압 상승시간 : 5[ns] - 50[%] 피크 전압 유지시간 : 50[ns] - 반복주파수 : 2.5[Mhz], 버스트 유지시간 : 15[ms] - 버스트 주기 : 300[ms], 인가 방법 : 비동기 - 극성 : 정극성, 부극성 - 인가시간 : 극성별 1[min], 휴지시간 : 1[min]	전류, 전압 회로	Com mon Mode	양호 합
	입력및 출력 접점회로	Com mon Mode	양호 합
	접지회로	Com mon Mode	양호 합
0 계전기정정(OCR) - 동작치정정 : 10mA, 전류 인가치 : 7.5[mA] - 동작시간정정 : 최소(3[ms]), 동작시간특성 : 순시		Com mon Mode	양호 합
0 판정기준 시험 중 부품의 파괴가 없고, 오동작하지 않을 것		Com mon Mode	양호 합

표 8은 공인시험에 적용된 대표적인 EMC시험의 방법 및 기준이다[12,13]. 직류계전기 공인시험으로 Electrostatic discharge 시험, 1[MHz] burst disturbance 시험, EFT burst 시험, 전자파방사 내성 시험, Combined surge 시험, 뇌임펄스 내전압 시험, 진동 시험, 충격 시험, 항온조 시험 등이 수행되었다. 내 환경 시험은 일반 AC계전기와 동일한 시험방법과 기준을 적용하였다. 그리고 인증된 보호계전기는 경북 경산에 구축한 경전철 시험선 변전소에 설치하여 운전중이다.

6. 결 론

본 연구에서는 전기철도의 직류급전계통의 단락 특성을 분석하였으며, 사고전류를 검출하는 알고리즘을 제시하여 이를 적용한 보호계전장치를 개발한 과정을 기술하였다. 또한 이 과정에서 불분명하고 제시되지 않은 각종 기술규격 및 규정을 체계화하였다.

직류 급전계통에 적용되는 직류보호제어장치는 핵심요소기술로 그 공개도 제한되어 많은 자료가 없을 뿐만 아니라, 관련된 명확한 규정 및 규격이 없었기 때문에 개발과정에서 적용한 규정 및 규격을 정리하였다. 또한 직류보호계전장치의 보호원리를 제안하였으며, 특히 계전기 기능 중 가장 중요한 고장 선택계전기(50F)의 계전 알고리즘을 제안하여 개발하고 이를 경북 경산 경전철 시험선에 설치하여 운전 중이다. 개발과정에서 특성시험과 EMC 시험 규정 중 일부항목에 대해 시험방법이 제정되어있지 않아 IEC 규정의 분석을 통하여 객관적이고 타당한 시험장비 및 시험방법을 제안하였다. 따라서 대중교통인 전기철도 보호계통 관련한 연구개발 및 관련 산업계에 종사하는 사람에게 많은 참고가 될 것으로 사료된다.

References

[1] John S. MORTON "Circuit Breaker and Protection Requirements for DC Switchgear used in Rapid Transit System", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-21, No.5, 1985.
 [2] 日本電氣學會, "直流電氣鐵道における保護および保護協

調に関する調査", 電氣學會技術報告, 第542号, 1995.
 [3] 社團法人 鐵道電化協會, "電鐵ノートき電回路保護システム" 1989.
 [4] J.C. Brown et al, "Six-pulse three-phase rectifier bridge models for calculating closeup and remote short circuit transients on DC supplied railways" IEE Proceedings-B, Vol. 138, No. 6, pp.303-310, November 1991.
 [5] J.C. Brown et al, "Calculation of remote short circuit fault currents for DC railways" IEE Proceedings-B, Vol. 139, No. 4, pp. 289-294, July 1992.
 [6] Bih-Yuan Ku, "Simulation and Emulation of Rapid Transit DC Short Circuit Current" Proceeding of the 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference, pp. 191-197, April 22-24, 2003.
 [7] Alberto Berizzi et al, "Short-Circuit Current Calculations for DC Systems" IEEE 1994.
 [8] C.S.Chang, S.Kumar, B.Liu and A.Khambadkone, "Real-time detection using wavelet transform and neural network of short-circuit faults within a train in DC transit systems" IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 148, No. 3, pp. 251-256, May 2001.
 [9] 철도청, "철도용품 표준규격(안) 배전반(디지털화)", 2000년.
 [10] 한국전력거래소, "보호계전기 시험기준수립에 관한 연구", 2002년.
 [11] 백병산 외 "경량전철 급전전력 보호 제어용 직류배전반 개발(1)" 한국철도학회 추계학술대회 P995~1000, 2002.
 [12] IEC 60255 series "Electrical Relays" International Electrotechnical Comission, 1996.
 [13] 백병산 외 5인, "경전철 시험선로의 직류 보호시스템 및 보호계전기 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 10-12, 2002년 7월.

◆ 저자소개 ◆

백병산 (白乘山)

1963년 6월 16일생. 1987년 부경대학교 전기공학과 졸업. 1991년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.

김재철 (金在哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학과 교수.