

## 오픈소스 하드웨어를 활용한 도시철도 직류형 보호계전기 검사장치의 설계 및 구현

Design and Implementation of a DC Protective Relay Testing Device for Urban Railway DC Switchgear Using Open-Source Hardware

김병철<sup>\*†</sup>, 노희동<sup>\*</sup>, 유진승<sup>\*</sup>, 김진오<sup>\*</sup>, 김정식<sup>\*</sup>, 정영원<sup>\*</sup>, 박기홍<sup>\*</sup>, 서유진<sup>\*</sup>Byeong-Cheol Kim<sup>\*</sup>, Hee-Dong Noh<sup>\*</sup>, Jin-Seung Yoo<sup>\*</sup>, Jin-O Kim<sup>\*</sup>, Jeong-Sik Kim<sup>\*</sup>, Young-Won Jung<sup>\*</sup>, Gi-Hong Park<sup>\*</sup>, Yu-Jin Seo<sup>\*</sup>

**초 록** 본 논문에서는 도시철도 직류배전반에 적용되는 직류형 보호계전기의 효율적 검사를 위해, 현장 실무자가 오픈소스 하드웨어를 활용하여 단일 전용 검사장치를 개발한 사례를 제시한다. 기존장비는 교류형 보호계전기 중심으로 설계되어 직류형 검사에는 부가 장비가 필요하고, 이로 인한 비효율과 안전사고 위험이 존재하였다. 개발된 검사장치는 실제 유지보수 현장에서 성능검증을 거쳐 유효성이 확인되었으며, 이를 통해 철도전력분야에서도 전 세계적으로 확산되고 있는 오픈소스 기반의 「제조 민주화」 흐름이 실질적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

**주요어:** 도시철도, 직류형 보호계전기 검사장치, 오픈소스 하드웨어, 제조의 민주화

## 1. 서 론

전력시스템은 교류와 직류로 나뉘며, 철도전력 분야에서도 교류계통이 주류를 이루고 있다. 반면, 직류계통을 사용하는 도시철도 급전시스템은 시장 규모가 작아 선택 폭이 제한되고, 비용 증가와 수급 불안 등의 구조적 한계를 가진다[1].

최근 오픈소스 하드웨어(OSH)·소프트웨어(OSS)와 사용자 친화적 개발 플랫폼의 등장으로 생산자와 소비자 간 장벽이 낮아지면서 시장에서 공급되지 않던 제품이나 주문제작 시 고비용의 제품도 사용자가 직접 제작할 수 있는 길이 열리게 되었다.

수요자가 직접 생산자가 되어 실사용자 요구를 가장 잘 반영한 맞춤형 장치 개발이 가능하게 됨으로 비용 절감과 생산성 향상으로 이어지고 있으며 이러한 기술 트렌드는 도시철도 분야에서도 확산되고 있다[2].

도시철도 직류배전반의 디지털 보호계전기는 직류 특성에 맞는 50F와 같은 특수 보호요소뿐만 아니라 기본적인 차단기 제어부터 연락차단, 라인 테스트 등 배전반 제어의 핵심 기능을 수행한다.

이러한 보호계전기의 정상동작 여부는 전력공급 안정성과 감전사고 예방에 직결되므로, 이를 확인하기 위한 검사가 매우 중요하다.

직류형 보호계전기는 전용 검사장치가 부재하여 기존 상용장치들의 부분기능을 조합하여 사용해야 함에 따라 비효율이 발생하고 있다. 이에 보호계전기 검사에 최적화된 전용장치를 개발하면 다수 장비로 인한 중량문제와 장비이동의 편리, 비용감소, 기존 장비로 구현하기 어려운 기능까지 검사가 가능하여 유지보수 효율성과 작업자 편의를 높일 수 있다.

본 논문은 2장에서는 부산 2호선 직류 보호계전기 설치현황과 문제점을, 3장에서는 검사장치 설계와 제작을, 4장에서는 성능시험과 평가를 다루며 결론에서 연구 의의를 정리한다.

## 2. 직류 보호계전기 설치현황 및 문제점

### 2.1 운영현황 및 검사방법

부산 2호선에 설치되어 있는 직류배전반 직류형 보호계전기는 PCU6000(Secheron社), DCP106(BBR社), ETCPU200(ENTEC社)가 있으며, 각각 장치들마다 입력신호의 범위는 차이가 있다. Table 1은 제조사별 보호계전기와 입력신호 범위를 보여준다.




보호계전기의 검사를 위해서는 장치에 따라 요구

† 교신저자: k112587@humetro.busan.kr

\* 부산교통공사 전기사업소

되는 입력신호의 발생과 보호요소의 동작시간을 측정할 수 있는 기능이 필요하다.

**Table 1** The Appearance and Input Signal Ranges of DC Protective Relays by Manufacturer




제품명 (제조사)	PCU6000 (Secheron社)	DCP106 (BBR社)	ETCPU200 (ENTEC社)
장치외관			
입력신호	DC 0~10V	DC 0~20mA	DC 0~20mA

## 2.2 문제점

현재 시중에서 공급되는 대표적인 보호계전기 검사장치로는 릴레이테스터(Relay Tester)가 있으며, 기본적으로 입력 신호 발생과 동작 피드백에 기반한 시간 측정 기능을 갖추고 있다.

현장에서는 보호계전기 검사 시, 릴레이테스터와 신호측정을 위한 멀티미터, 작업거리 확보 및 전원 공급을 위한 케이블 릴이 조합되어 주로 사용된다.

**Table 2** List of Equipments for Testing DC-Type Protective Relays on Busan Metro Line 2

장비명	Relay Tester	Calibrator	Multimeter	Cable Reel
장치외관				

하지만, 릴레이테스터는 교류형 보호계전기 중심으로 설계되어 Table 1과 같은 직류형 보호계전기의 신호입력을 위한 미세신호 발생에는 적합하지 않다.

이에 따라 별도의 신호 발생기(Calibrator)를 추가로 조합하여 사용하고 있는 실정이다. 부산 2호선에서 직류형 보호계전기 검사를 위해 사용하고 있는 장비는 Table 2와 같다.

검사과정에서 다양한 장비를 병행 사용해야 하는 상황은 여러 부정적인 영향을 초래할 수 있다.

장비 구매에 따른 비용 부담과 장비 수 증가, 중량장비 취급의 어려움(릴레이테스터 중량 26kg) 뿐만 아니라, 검사과정의 복잡성이 높아져 인적 오류 발생 가능성이 증가하고 검사 소요시간 또한 늘어나게 된다.

이는 궁극적으로 고가장비의 고장과 검사과정 중 안전사고 발생으로 이어질 수 있다.

## 3. 설계와 제작

### 3.1 설계방향

2.2절에서 지적인 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 직류형 보호계전기 검사장치를 DPRT (DC Protective Relay Test)로 명명하고, 다음과 같이 설계방향을 수립하였다.

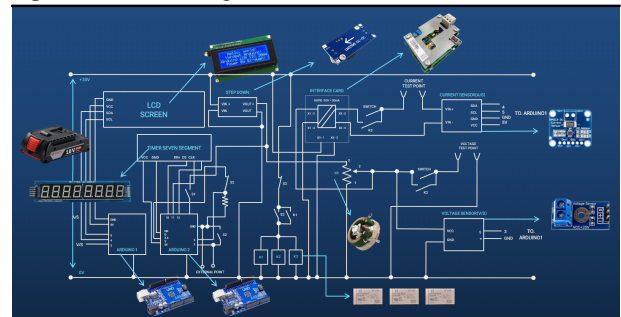
첫째, 직류형 보호계전기 검사를 위한 입력 신호 발생 기능(DC 0~10V, DC 0~20mA)과 동작 피드백 단자, 정밀 타이머 내장을 통해 시간 측정이 가능하도록 하였다.

둘째, 소형·경량화 및 배터리 기반 무선 기능을 포함하여 휴대성을 확보하였다.

이를 통해 단일장치만으로 다양한 직류형 보호계전기를 검사할 수 있으며, 별도의 부가 장비 없이 유지보수 효율을 높이고 작업자의 안전한 검사업무 수행이 가능하도록 구현하고자 하였다.

### 3.2 하드웨어 구성

**Fig. 1** Hardware Configuration of DPRT



DPRT의 하드웨어 구성은 Fig. 1과 같으며, 크게 전원부, 연산부, 표시부, 출력부, 조작부로 구분할 수 있다.

전원부는 20V 배터리를 장치 내부의 동작 전원과 신호 출력 소스로 공급하도록 구성되었으며, 안정적인 동작을 위해 정전압 유지 회로를 중심으로 구현하였다.

연산부는 장치의 메인 프로세서 역할을 수행하며, 조작 입력, 현재 출력 상태, 정밀 타이머 카운트 등을 처리하기 위해 아두이노 2대로 구성하였다.

표시부는 연산부에서 처리한 결과와 현재 출력 상태, 신호의 종류 및 크기를 16×4 LCD 디스플레이(I2C 통신)를 통해 표시하며, 시간 현시는 8-Digit 7세그먼트 디스플레이로 구현하였다.

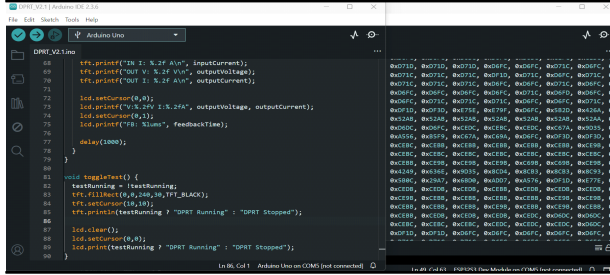
출력부는 조작부에서 요구한 신호를 실제로 출력

하는 부분으로 발열에 강한 구조의 가변저항과 절연 증폭기, 소형릴레이를 활용하여 구현하였다.

조작부는 전원을 위한 로커 스위치, 모드 변경용 선택 스위치, 일시 신호 출력을 위한 토글 스위치, 신호 크기 변환용 노브 스위치 등으로 구성된다.

### 3.3 소프트웨어 구성

Fig. 2 Arduino IDE and Programming Code of DPRT



DPRT의 소프트웨어는 연산부에 사용되는 오픈 소스 하드웨어인 아두이노를 위한 프로그래밍을 의미하며, 기본적으로 Arduino IDE와 C/C++ 언어를 활용해 Fig. 2와 같이 구현하였다.

오픈소스 장치의 특성을 살려 다양한 공개 라이브러리를 적용함으로써, 각 하드웨어 모듈을 손쉽게 제어할 수 있어 효율적인 설계가 가능하였다.

### 3.4 DPRT 제작

앞절에서 설계한 하드웨어와 소프트웨어를 통해 최종적으로 검사장치를 도시철도 운영기관의 직원들이 오픈소스 하드웨어를 기반으로 자체적으로 제작하였고, 배터리, 접속 케이블을 포함한 검사장치 외관은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3 Overview of the DPRT



## 4. 성능시험 및 평가

### 4.1 성능시험 개요

성능시험은 검사장치의 전압 및 전류 출력 및 동작 피드백 시간 측정 성능을 평가하여 장치의 유효성을 검증하였다.

전압 출력(DC 0~10V)에 대해, 2.5V, 5V, 7.5V, 10V를 출력하고, 검교정 멀티미터 측정값을 참값으로 비교하여 정확도를 확인하였다.

전류 출력(DC 0~20mA)에 대해, 5mA, 10mA, 15mA, 20mA를 출력하고, 검교정 멀티미터 측정값을 참값으로 비교하여 정확도를 확인하였다.

동작 피드백 시간은 검사장치가 보호계전기의 보호요소 동작값을 만족하는 신호를 출력한 시점부터 설정된 시간이 경과한 후 보호계전기로부터 트립 신호를 수신한 시점까지를 의미한다.

이 시간을 검교정 메모리레코더 측정값을 참값으로 검사장치의 측정값과 비교하여 정확도를 평가하였다.

### 4.2 전압 및 전류 출력 시험 결과 및 평가

Table 3 Voltage and Current Signal Output Test Results

구분		DPRT	검교정 참값	절대오차	상대오차
전압	2.5V	2.50V	2.5026V	-2.6mV	-0.10%
	5V	5.04V	5.0607V	-20.7mV	-0.41%
	7.5V	7.53V	7.529V	1mV	0.01%
	10V	10.00V	10.003V	-3mV	-0.03%
전류	5mA	5.03mA	5.044mA	-0.014mA	-0.28%
	10mA	10.03mA	10.003mA	0.027mA	0.27%
	15mA	15.03mA	14.995mA	0.035mA	0.23%
	20mA	20.03mA	20.084mA	-0.054mA	-0.27%

전압 및 전류 출력 시험 결과는 Table 3에 제시하였다. 모든 상대오차는 0.5% 이하로 확인되었다.

DPRT의 전압 및 전류 출력 분해능은 각각 10mV와 0.01mA로, 직류형 보호계전기 검사에 요구되는 100mV와 0.1mA보다 10배 높은 정밀도를 나타낸다.

또한, 절대오차 역시 요구 분해능보다 작아, 보호계전기 검사에 충분한 성능을 확보한 것으로 확인되었다.

### 4.3 동작 피드백 시간 측정 시험 결과 및 평가

Fig. 4 Protective Relay Feedback Time Test Result

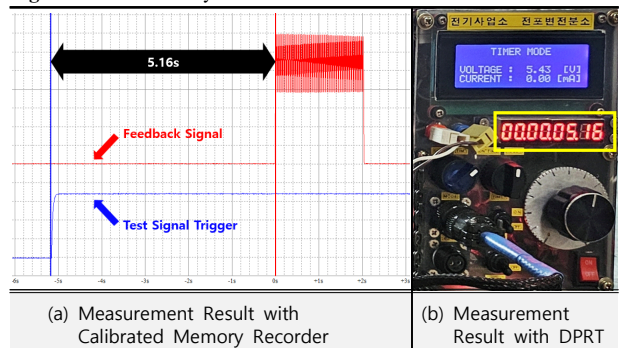
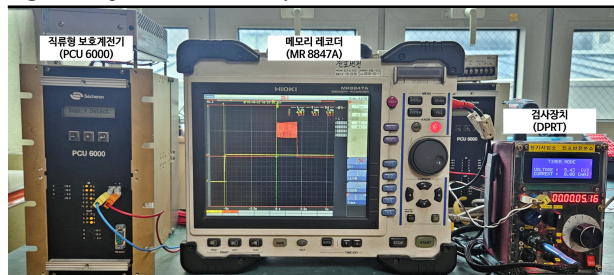


Fig. 5 Setup of Protective Relay Feedback Time Test



직류형 보호계전기 PCU6000의 직류 정한시 과전류 보호요소(I<sub>max</sub>+) 동작 시간을 5s로 설정하고, 검사장치로 피드백 시간을 측정하였고, 결과는 Fig. 4, 시험사진은 Fig. 5에 제시하였다.

검사장치의 시간 분해능은 10ms이며, 검교정 메모리 레코더와 검사장치의 측정값이 모두 5.16s로 일치하여, 정확성을 확인할 수 있었다.

#### 4.4 현장 활용성 평가

Fig. 6 Comparison of DC Protective Relay Testing

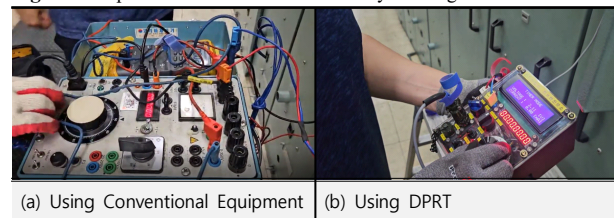


Fig. 6은 직류형 보호계전기를 기존장비와 DPRT로 검사하는 모습을 비교한 사진이다.

기존 검사작업 시, 4종의 장비가 필요하였고, 중량 장비로 인한 부상의 위험이 있었으나, 본 논문의 검사장치를 활용할 경우, 소형·경량화된 단일장비로 검사가 가능하여 유지보수 효율성과 작업 안전성이 향상되었다.

또한 배터리 기반 무선기능을 적용하여 전원선과 케이블 릴이 불필요해짐에 따라 작업 신속성과 편리성이 개선되었다.

신호 인가와 측정, 피드백 동작시간 측정을 위한 장비간 결선 복잡성이 해소되어 장비세팅에 따른 소요시간이 단축되고 인적오류의 가능성도 줄어들었다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 시중 검사장치가 교류형 보호계전기 중심으로 제작됨에 따라, 도시철도용 직류형 보호계전기 검사를 위해 다수의 장비를 병행 사용함으로써 발생하는 작업 비효율과 안전사고 위험을

해결하고자, 단일장치로 검사가 가능한 전용 검사장치를 개발한 과정을 다루었다.

특히 본 검사장치의 제작이 가능했던 배경에는 통상 장치 제작이 전문 제조기업에 의해 이루어지고 운영기관 기술자는 소비자로 머물렀던 상황에서 오픈소스 하드웨어(OSH), 소프트웨어(OSS), 메이커 운동의 확산, 사용자 친화적 개발 플랫폼 등 최근 「제조 민주화」를 기반으로 한 기술 트렌드가 중요한 역할을 했다.

개발한 장치는 전문 제조기업의 고정밀 장치 수준에는 미치지 못하나, 현재 도시철도 운영기관에서 사용 중인 대표적 3개 제조사의 직류형 보호계전기 검사에는 충분히 활용 가능한 것으로 확인되었다.

본 연구는 철도전력분야뿐만 아니라 일반적인 전기설비 유지관리 현장에서 직면하는 문제를 해결할 수 있는 실질적 대안과 재현 가능한 모델을 제시했다는 점에서 의의가 크다.

향후에는 검사장치의 정밀도를 높여 고정밀 장치 수준의 정확도를 구현할 수 있도록 후속 연구가 진행되기를 기대한다.

### 참고문헌

- [1] H.D. Noh, B.C. Kim, J.S. Yoo, J.S. Kim, Y.W. Jung, M.H. Kim, W.G. Shim, & J.H. Ban (2025) Design and Implementation of a DC 1500V Hysteresis-Type Live Voltage Detection Device Using PLC, *Proceedings of the Korean Society for Railway*, Gwangju.
- [2] H.D. Noh, H.G. Yoon, S.C. Park (2017) Design and Implementation of a Control System for the Ventilation Equipment Installed in the Substation Using Open Source Hardware, *Journal of Korean Society for Urban Railway*, 5(2), pp. 841-847.