

PLC를 활용한 직류 1500V 히스테리시스형 급단전 감시장치 설계 및 구현 Design and Implementation of a DC 1500V Hysteresis-Type Live Voltage Detection Device Using PLC

노희동^{*†}, 김병철^{*}, 유진승^{*}, 김정식^{*}, 정영원^{*}, 김문현^{*}, 심우근^{*}, 반준혁^{*}

Hee-Dong Noh^{*†}, Byeong-Cheol Kim^{*}, Jin-Seung Yoo^{*}, Jeong-Sik Kim^{*}, Young-Won Jung^{*}, Mun-Hyeon Kim^{*}, Woo-Geun Shim^{*}, Jun-Hyeok Ban^{*}

초 록 교류계통이 주를 이루는 전력분야에서 직류계통을 사용하는 도시철도 전기설비는 제한된 시장수요로 인해 고비용과 수급불안이라는 리스크를 내포하고 있다. 특히, 도입 26년이 경과한 부산 도시철도 2호선 직류설비는 급단전 감시장치가 단종되어 적절한 대체장치 부재로 유지보수에 상당한 문제가 발생하였다. 본 논문에서는 제조사가 아닌 운영기관이 단종된 장치를 자체적으로 개발하여 문제를 해결한 사례를 소개하고, 그 과정에서 활용된 기술적 방법론과 개발성과를 설명한다.

주요어: 도시철도, 직류 1500V, 직류계통, 직류설비, 급단전 감시장치, PLC, 제조의 민주화, 번들링 딜레마

1. 서 론

교류설비가 주류를 이루는 전력 설비 시장에서 직류설비는 상대적으로 수요가 제한되고 대량 생산이 어려워 ‘규모의 경제(Economies of Scale)’ 효과로 구매단자가 상승하는 특징을 보인다. 이로 인해 소비자의 선택 폭이 좁아지고, 고비용 및 수급불안이 발생한다.

예를 들어, 부산도시철도 2호선에 도입된 교류형(22.9kV, 6.6kV) 통합 보호계전기는 대당 약 500만원대인 반면, 직류형(1.5kV) 보호계전기는 약 2000만원대인 것도 앞서 언급한 규모의 경제 효과로 설명될 수 있다. 이러한 상황은 직류 설비의 비중이 높은 도시철도의 운영부담을 증가시키며, 유지보수용 예비품의 높은 가격은 공공재정에 부정적인 영향을 미친다.

한편, 2000년대 초반 메이커 운동(Maker Movement)의 등장과 함께 누구나 생산 과정에 참여할 수 있는 이른바 ‘제조의 민주화’가 주목받기 시작하였다.

특히 오픈소스 하드웨어(아두이노 등)와 산업용 마이크로컨트롤러(PLC 등)와 같은 저비용 및 고급 성능 기술이 빠르게 대중화되면서, 제조사가 아닌

운영기관도 필요한 장치를 외부에 의존하지 않고 직접 개발할 수 있는 보다 나은 환경이 조성되었고, 관련사례들도 보고되고 있다[1].

부산도시철도 2호선 직류설비에 적용된 급단전 감시장치(LVDD, Live Voltage Detection Device)는 1999년 개통 이후 26년이 경과하면서 기존장치의 단종문제가 발생하였다.

또한, 제조업계 추세가 통합형 보호계전기로 전환함에 따라, 수요가 더 적어진 개별 급단전 감시장치 생산이 중단되는 ‘번들링 딜레마’가 발생하여 운영기관(소비자)은 200만 원대 급단전 감시장치를 대체하기 위해 2000만 원대의 통합형 보호계전기를 도입해야 하는 비효율적인 상황에 직면하였다.

더불어 기존장치의 히스테리시스형 방식을 보호계전기(대체장치)에서는 지원하지 않아 기존 시스템과의 호환성 문제도 남아있는 실정이다.

본 논문에서는 시장수요가 적은 도시철도분야에서 사용되는 장치들이 갖는 고비용과 옵션제한 한계에 대해 ‘제조의 민주화’라는 관점에서 문제를 해결한 과정과 그 방법에 대해 설명한다.

본 논문의 구성으로 2장에서는 급단전 감시장치에 대해 설명하고, 3장에서는 급단전 감시장치 설계 및 제작한 내용을 기술한다. 4장에서는 개발된 장치의 성능시험 및 결과를 제시하고, 5장에서 결론으로 본 논문을 마무리 한다.

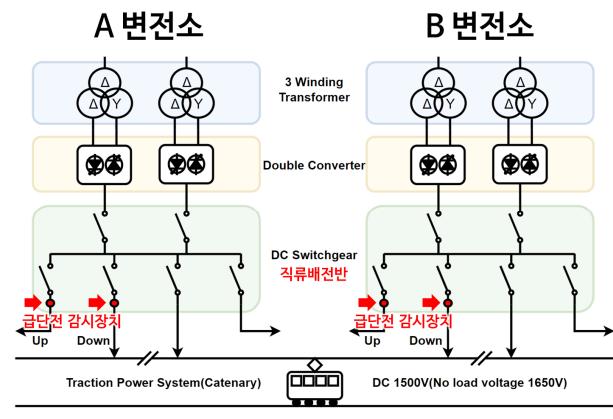
† 교신저자: 114924@humetro.busan.kr

* 부산교통공사 전기사업소

2. 직류 1500V 급단전 감시장치의 개요

2.1 급단전 감시장치의 목적과 역할

Fig. 1 Installation Location of LVDD in a 1500V DC System.



직류 1500V 급단전 감시장치는 Fig. 1에서 적색 화살표로 표시된 것과 같이 변전소 직류배전반 내 피더 차단기와 급전 케이블로 연결되는 피더 종단에 설치되어, 도시철도 전차선로에 직류 고전압(1500V) 인가여부(급전 및 단전상태)를 감시하고, 판별결과를 관제센터로 전송하는 장치를 말한다.

급단전 감시장치는 전차선로 급전 및 단전 정보를 제공하여 열차운행을 위한 영업준비상태(급전)와 작업자의 선로출입을 위한 작업안전상태(단전)를 관제사가 신속하고 정확하게 판단할 수 있도록 하여 도시철도 운영과 안전에 직결되는 핵심정보를 제공한다.

2.2 급단전 감시장치의 동작방식

Table 1은 급단전 감시장치의 동작방식별 원리와 특징에 대해 정리하였다.

Table 1 Classification of Operating Principles for LVDD.

구분	단일전압기준형 방식 (Single Threshold Based Method)		히스테리시스형 방식 (Hysteresis Threshold Based Type)	
동작 그래프	상태 인식	금전 상태	상태 인식	금전상태 (금전상태) 단전상태 (단전상태) 전압하강 (금전상태) 전압상승 (단전상태)
	금전 인식	단전 인식	단전 인식	단전 기준 금전 기준 전압 기준 선로 전압
관계식	금전상태	$V_{det} \geq V_{th_ref}$	금전상태	$V_{det} \geq V_{th_live}$
	단전상태	$V_{det} < V_{th_ref}$	단전상태	$V_{det} < V_{th_dead}$
장점	▪ 구조 및 설계 단순성 ▪ 빠른 응답특성		▪ 외란 및 노이즈 저항성 ▪ 전압 진동에 따른 오동작 최소화(변동내성)	
단점	▪ 외란 및 노이즈 민감성	▪ 설계 및 구현 복잡성 ▪ 느린 응답특성		

* V_{det} : 감지전압, V_{th_ref} : 단일기준, V_{th_live} : 급전기준, V_{th_dead} : 단전기준

급단전 감시장치 동작방식은 변동내성을 장점으로 갖는 히스테리시스형과 빠른 응답과 단순 구조를 장점으로 갖는 단일전압기준형으로 나눌 수 있다.

부산도시철도 2호선에는 도입 시기에 따라 히스테리시스형과 단일전압기준형이 혼재되어 있으며, 본 논문에서는 현재 단종으로 수급이 어려운 히스테리시스형 급단전 감시장치를 구현하였다.

3. 급단전 감시장치 설계와 제작

3.1 급단전 감시장치 설계방향

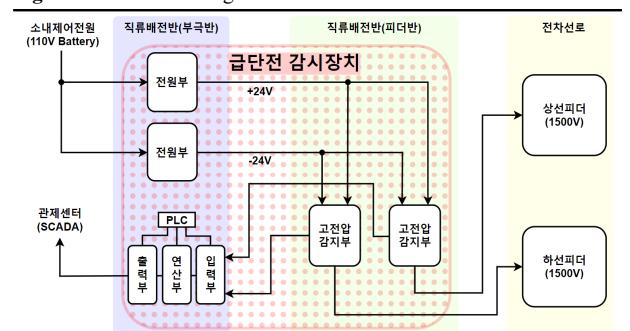
설계목표는 기본적으로 기존장치 성능을 기준으로 하되, 추가적으로 보완할 수 있는 기능들을 추가하도록 설계방향을 설정하였다.

목표는 기존장치가 갖춘 히스테리시스 기능을 구현하고, 운영기관의 요구를 적극 반영하여 보다 우수한 기능성을 확보한 급단전 감시장치를 자체적으로 개발하는 것이다.

특히, 가장 중요하게 고려한 부분은 기존제품의 단종 유발 원인이 시장의 수요가 적고 부품교체가 어려운 일체형 구조라는 점에 착안하여, 급단전 감시장치 자체가 수요의 제한으로 범용 기성제품이 될 수 없다면, 한 단계 아래 구조 단위에서 모듈화하고 부품을 범용 기성제품으로 구성하여 단종 리스크를 제거하고자 하였다.

3.2 급단전 감시장치 하드웨어 구성

Fig. 2 Hardware Configuration of LVDD.



감시장치의 하드웨어 구성은 Fig. 2에서 나타낸 것과 같이, 장치에 전원을 공급할 ①전원부, 직류 고전압을 감지하는 ②고전압 감지부, ③PLC에서 소신호로 변환된 고전압 신호를 받는 입력부, 감지전압과 기준전압을 비교하는 연산부, 연산의 결과에 따라 관제로 신호를 출력하는 출력부, 총 세 파트로 구성된다.

3.2.1 전원부

감지부의 직류 고전압 T/D가 이중레일(Dual-Rail) 전원을 요구하므로, 소내전원인 110Vdc를 -24Vdc, 0Vdc, +24Vdc으로 변환할 수 있는 SMPS로 구성하였고, 일부 24Vdc는 PLC에 공급된다.

3.2.2 고전압 감지부

공정 1500V에서 KS C IEC 60850에 따라 회생제동 시 발생하는 전압 상승을 고려하면 최고전압은 1950V로 규정되므로, 고전압 감지부는 2000V까지 감지할 수 있어야 한다[2].

감지부는 직류 고전압을 소신호로 변환하는 전압변성장치로, 기존의 비절연형 저항 기반 방식 대신 절연형 고전압 T/D를 적용해 안전성을 높였다.

또한, 고전압 T/D의 소신호가 미세 변화에도 큰 오차를 초래할 수 있으므로 전압강하의 영향을 받지 않는 전류형 신호출력이 되게 하였고, PLC 입력부에 션트를 통해 전압형 소신호로 재변환 되는 구조로 설계하여 PLC까지 손실없이 신호전달이 되도록 하였다.

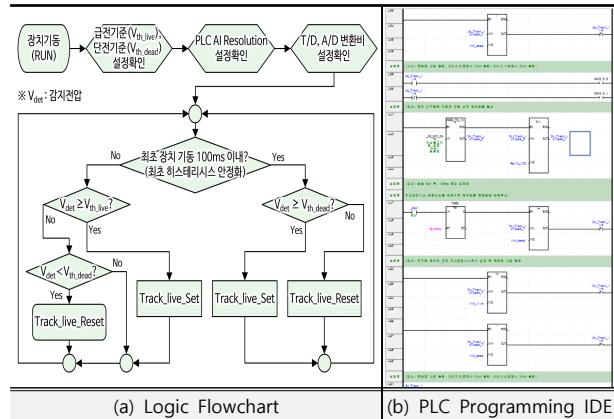
3.2.3 PLC

고전압 감지부로부터 최종적으로 받은 전압형 소신호를 연산부에서 A/D 변환 후 디지털 비교연산으로 급전·단전을 판단하여 SCADA로 출력한다. 입력부, 연산부, 출력부는 PLC의 AI모듈, CPU모듈, DO모듈로 구현하였다. 소요공간 최소화를 위해 컴팩트형 PLC를 적용하였다.

특히, AI모듈의 경우, 통상 많이 사용되는 4000분해능이 아닌, 16000 고분해능 타입을 적용하여, 감지 정확도를 높였다.

3.3 급단전 감시장치 소프트웨어 구성

Fig. 3 Software Configuration of LVDD.



감시장치의 소프트웨어는 PLC 프로그래밍을 의미하며, 사용한 언어는 IEC 61131-3에서 표준화된 LD(Ladder Diagram)와 FBD(Function Block Diagram)로 코딩하였고, 히스테리시스 동작에 대해서는 SR Flip-Flop으로 구현하였다[3].

Fig. 3는 장치의 로직 플로우 차트와 PLC 프로그래밍 IDE(XG5000)를 나타낸다.

3.4 급단전 감시장치 제작

제작은 운영기관 기술직원들만의 기술력으로 자체 제작하였고, 개발품 외관 사진은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4 Overview of LVDD.



4. 급단전 감시장치 성능시험 및 평가

4.1 성능시험 개요

급단전 감시장치 성능에서 중요한 지표는 감지 정확도와 응답시간으로, 이를 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 성능시험을 시행하였다.

감시장치 동작은 현재 부산 2호선에 적용되어 있는 히스테리시스형 방식으로, 급전기준 1200V, 단전기준 550V로 설정하여 시험하였다.

Fig. 5 Equipment Setup for Performance Testing.



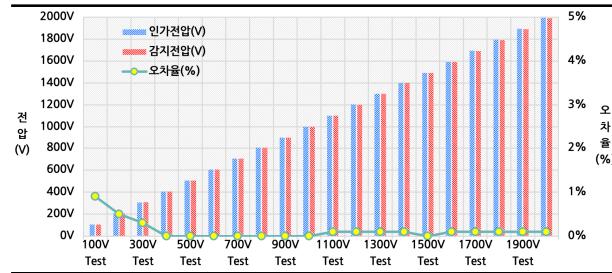
급단전 감시장치를 위한 전용 표준이 없으므로, 한국전기공업협동조합(KEMC)의 디지털 보호계전기 표준(SPS-KEMC 1120)을 준용하여, 감지 정확도(동작값) 5% 허용오차, 응답시간(동작시간) 50ms 이내를 적정 기준으로 설정하였다[4].

4.2 성능시험 결과

감지 정확도 확인을 위해 감지범위 최대값 2000V 까지 100V 단위로 순차적 인가하여 인가전압과 감시전압을 비교하고, 오차를 계산하였다.

결과는 최대 오차율 0.94%(@100V Test), 평균 오차율 0.14%로 측정되어, 적정기준 5% 이내를 만족하였고, Fig. 5에 상세히 나타내었다.

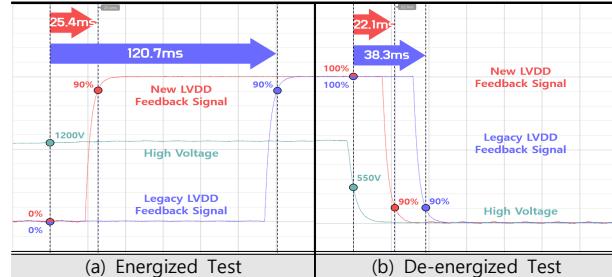
Fig. 5 Detection Accuracy Test Result.



응답시간 확인은 급전 및 단전으로 구별하여 시행하였고, 인가전압이 기준전압과 교차하는 지점에서 피드백 신호까지의 시간을 측정하였다.

특히, 기존장치와 개발장치에 직류 고전압을 동시에 인가하고, 인가전압과 피드백 신호 모두 레코더로 파형으로 측정하여 시각적 비교가 될 수 있도록 하였다. 응답시간은 5회 시도하여 평균값을 결과로 취하였고, 1회차 결과파형은 Fig. 6과 같다.

Fig. 6 Detection Response Time Test Result.



개발장치의 5회 평균 급전 응답시간 25.7ms, 단전 응답시간 22.4ms로, 적정기준 50ms 이내를 만족하였다. Fig. 6 파형에서 상대비교 시, 기존장치 대비 개발장치의 응답시간은 급전기준 79.0%, 단전기준 42.3%로 단축되어 성능향상을 확인할 수 있으며 시험과정에서 Fig. 6과 같이 감지동작이 히스테리시스적으로 동작함을 확인하였다.

4.3 감시장치 성능평가

앞에서 확인한 감시장치의 정량적 성능지표를 포함하여 새로운 감시장치의 특징을 기존장치와 비교한 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Performance Comparison between Legacy and New Devices.

구분	기존장치	개발장치
사용계통(공칭)	1500V 단독	750V, 1500V 겸용
감지오차	±7% 이내	±1% 이내
응답시간	120ms 이내	30ms 이내
동작방식	히스테리시스형만 지원	모든 타입 지원
기준설정	사용자 설정불가	사용자 설정가능
설정단위	1V	1V
고전압/소신호간 절연	비절연	전기 절연
자체 상태현시	불가	가능
부품교체 가능여부	불가	가능
단종 리스크	현재 단종	단종 가능성 낮음

개발한 장치는 현재 부산도시철도 2호선 서면변전소 직류배전반에 설치되어 테스트베드 운용 중이며, 향후 운용결과를 바탕으로 확대적용 가능성이 검토될 예정이다.

5. 결 론

지금까지 본 논문은 부산도시철도 2호선 급단전 감시장치의 단종에 따른 유지보수 대응력에 대한 대안으로 제조사에서 장치를 생산하지 않아 시장에 필요한 장치가 공급되지 않더라도 운영기관에서 자체적으로 제작하여 문제를 해결한 과정과 방법을 소개하였다.

‘제조의 민주화’라는 문화의 확산과 이를 가능하게 해주는 사용자 친화적인 기술의 대중화가 과거보다 더 많은 기술 접근성과 문제해결 역량을 제공하고 있다.

본 논문에서 소개한 내용들이 철도유관기관을 포함하여 전기설비 유지관리에 종사하는 많은 기술인들에게 현장에서 마주하는 문제에 대한 하나의 해결방안과 영감을 제시하고, 기술역량 개발에 긍정적인 동기가 되기를 바라며, 앞으로 더욱 고무적인 사례를 만나볼 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 한국산업표준 (2020) KS C IEC60850: 철도 적용 - 견인 시스템의 공급 전압, 한국표준협회(KSA).
- [3] XGB 기본유닛(XEM-H2/HP 탑업) manual (2024) LS ELECTRIC.
- [4] 한국단체표준 (2008) SPC-KEMC 1120: 디지털 보호계전기, 한국전기공업협동조합(KEMC).