

감전에 대한 인체보호용 누전차단기의 전자회로 특성분석을 통한 누전트립 동작시간 개선에 관한 연구

(Improvement of Leakage Trip Operation Time through Electronic Circuits Analysis of the
Circuit-Breakers for Human Body Protection Against Electric Shock)

김주철* · 서문수 · 장동석 · 조숙현 · 한윤탁 · 이상중**

(Ju-Chul Kim · Moon-Soo Seo · Dong-Suk Jang · Sook-Hyun Cho · Yoon-Tak Han · Sang-Joong Lee)

Abstract

This paper analyzed the electronic circuit and investigated the electrical properties to improve the tripping time of domestic ELCB. The operating time of the ELCB showed different values according to the location of voltage waveform and the duration time of leakage current at the instant when the leakage input signal is occurred under rated voltage, and the maximum value of the time measured was up to 26 ms. This was due to the time delay of the IC characteristics used in the electronic circuit which is operated only for the reverse half cycle of the sine wave. The authors developed a prototype circuit breaker with optimized delay element and performed an operation test, through which reduction of the ELCB trip time required for the circuit breaker standard by half was possible. Reduction of operating time of ELCB implies improvement of human body protection against electric shock. It is expected that production of safer ELCB will be possible in the future if more advanced and reliable electronic circuit or IC is developed.

Key Words : ELCB(Earth Leakage Circuit-Breakers), Rated Sensitivity Current, Trip Operating Time, Electrical Shock

1. 서 론

1.1 연구의 배경

전기사용량의 증가로 인해 전기 안전장치인 누전차단기의 중요성이 커지고 있다. 건축물이 점차 대형화 되고 그에 따라 사용되는 전기용량과 분기 회로가 많아지면서 감전사고도 증가하고 있다. 감전사고를 전압별로 구분하여 검토하면, 고압보다는 저압에서 많이

* Main author : Chuncheon Campus of Korea PolytechnicIII, Dept. of Electrical Engineering, Professor

** Corresponding author : Seoul National University of Science and Technology, Dept. of Electrical Engineering, Professor, PE

Tel : 02-970-6411, Fax : 02-978-2754

E-mail : sjlee@seoultech.ac.kr

Received : 2016. 6. 28.

Accepted : 2016. 8. 16.

발생하고 있으며, 사망자 또한 늘어나고 있다[1]. 따라서 누전차단기의 트립(Trip) 동작 시간을 최소화하여 안전성을 증가시켜야 한다. 현재 인체가 물에 젖어있는 상태에서 물을 사용하는 장소에 콘센트를 시설할 경우 전기용품 안전관리법의 적용을 받는 인체 감전보호용 누전차단기(전기용품 안전기준 또는 KS 표준에 적합한 정격감도 전류 15mA 이하 동작 시간 0.03초 이하의 전류 동작형의 것에 한한다) 또는 절연변압기(정격용량 3kVA 이하인 것에 한한다)로 보호된 전로에 접속하거나 인체 감전보호용 누전차단기가 부착된 콘센트를 시설하여야 한다[2]. 물을 사용하는 장소의 전원은 정격감도전류 15mA 제품을 별도로 사용하도록 지정하고 있다[2]. 그러나 누전 트립 동작 시간은 같으며, 정격감도 전류는 누전차단기 내부에서 저항 1개의 용량만을 변경하여 사용하는 것이 현실이다. 한국산업표준에서 누전차단기의 누전 트립 동작 시간은 30ms 이내로 한정되어 있고 제품의 동작 시간 측정치의 최댓값은 26ms까지 측정된다. 따라서 통전시간을 줄여서 인체의 위해를 감소시킬 수 있는 제품개발 연구가 필요하다. “누전차단기의 트립 동작 시간 분석을 통한 전류·시간적(積) 개선” 논문에서는 실험적 연구로써 전자부품 2종을 변경한 경우 누전 트립 동작 시간이 개선됨을 제시하였고 본 논문에서 누전차단기에 사용되는 IC를 분석한 결과 누전 입력신호의 반주기에서만 동작하는 지연시간이 존재함을 확인하였고 이를 통해 사용 가능한 최적화된 전자회로를 설계하고 또한 표준(KS, 전기용품 안전기준)에 적합하도록 개발하였다.

1.2 누전차단기 전자회로 동작원리

누전차단기는 ZCT(Zero Current Transformer)에서 검출된 누설전류량이 IC에 입력되면, IC 내부의 차동 증폭회로에 의해 누전검출 신호가 증폭된다. 증폭된 신호는 IC 내부의 기준 전위와 비교하여 누전 여부를 판단하고 이것을 출력하여 Latch 회로가 동작한다. 이때 Latch의 출력레벨을 판단(Δt), 확인한 후에 지연시간을 거쳐 SCR-Gate에 Trigger 신호가 전달되고 SCR은 2차 지연시간 이후 즉시 Turn-on 되어 트립

코일에 전류가 흐르기 시작한다. 코일에 흐르는 전류에 의해 발생한 자력은 누전차단기 내부의 트립바(Trip-bar)를 구동함으로써 자동으로 전원을 차단한다[3]. 그림 1은 누전차단기의 전자회로도이다[4].

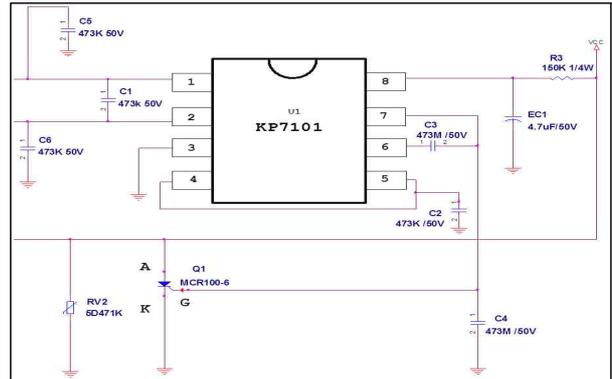


Fig. 1. Electronic circuit of earth leakage CB

2. 본 론

2.1 개선 전 국내 및 국외 누전차단기 트립 동작속도 시간분석

220V, 60Hz 전원에서 0.5초 간격으로 시험전류별 총 30회 누전 테스트를 진행하였고, 시험 결과 중 동작 속도가 가장 큰 값을 기록하였다. 시험에 사용된 전체 누전차단기는 인체 감전보호용으로써 정격감도 전류는 30mA로 시험하였다. 국내 제조사별 산업용 누전차단기 누전 동작 감지전류는 21.5~24.5mA에서 동작을 시작(감지구간)하였고, 동일제품의 최대감지전류는 기준 전위에서 동작을 시작하므로 측정값이 일정하다 [5-6]. 그림 2는 누전차단기 동작 시간 측정사진이다.



Fig. 2. Operating time measurement of ELCB

국내 누전차단기 정격감도 전류 30mA 조건에서의 동작 시간은 21~26ms가 측정되었다. 또한 동작 시간은 시험전류의 증가에 따라 감소하였고, 210~440mA 까지 누전차단기의 누전 트립 동작 시간이 일정하게 측정되었다[3]. 국내외의 누전차단기를 측정하여 시험한 결과는 표 1과 같다.

Table 1. Operating time of ELCB by test current

구분	제조사	누전동작 감지전류 mA	누전동작 시험전류mA						
			30	60	90	120	150	180	440
			동작시간ms						
국내	A	21.5	21	18	19	18	19	18	18
국내	B	21.8	22	20	21	20	20	20	19
국내	C	21.5	21	18	18	17	16	16	16
국내	D	24.5	26	20	18	17	18	17	18
국외	E	18.3	121	47	42	36	36	30	15
국외	F	36.4	40	30	28	22	21	18	15
국외	G	30.0	48	31	28	25	21	18	15

국외 제품(IEC 61009-1)에 대한 샘플시험에서 동작 시간은 시험전류의 증가에 따라 동작 속도가 빠르게 측정되었다[7]. 국내제품으로 전자회로를 사용한 누전차단기의 경우 초기 동작은 빠르게 동작을 하나 누설 전류의 증가에 따라 15ms 이하로는 동작하지 못하는 한계가 있고, 국외제품의 경우는 동작 속도가 빠르게 변화하는 특성이 있었다.

2.2 개선 전 전자회로의 파형 및 트립 시간에 대한 분석

ZCT의 누설전류 파형은 23.5mA의 사인파 형태에서 Level 판정은 Voltage 0.8V(Level Output)이고, 감지 펄스 폭은 C2(47nF) 기준, Δt 는 3.3ms의 적분 파형이 측정되었다. 그림 3은 누전회로의 파형과 트립 시간을 측정하는 사진이다.

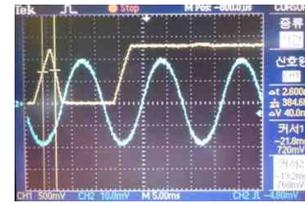


Fig. 3. Waveform and trip time of leakage circuit

동작 시간은 트립 하중에 따라 2~3ms 차이가 있는 것으로 확인된다. 누설전류의 영상변류기 파형에 따른 IC Latch 출력은 Negative 부분의 8.6ms 이내 반주기에서 검출됨을 확인할 수 있다. 현재의 누전차단기는 IC 자체의 반주기 검출로 인해 IC 4, 5번 Latch 출력 C의 정수가 47nF(C2)이므로 최소시간 8ms에서 최대시간 26ms가 검출되었다.

2.3 개선 전 누전차단기 IC Latch Part 분석

기존에 사용되고 있는 누전차단기의 IC 반도체 내부 Latch Part를 분석하였다. Delay Capacitor(C_{DLY})는 47nF이고, 전압은(V_{SCON}) 1.2V, Charging Current($I_{DTA}-I_{SCON}$)는 17 μ A이다. 그림 4는 래치 파트의 내부 동작회로도이다.

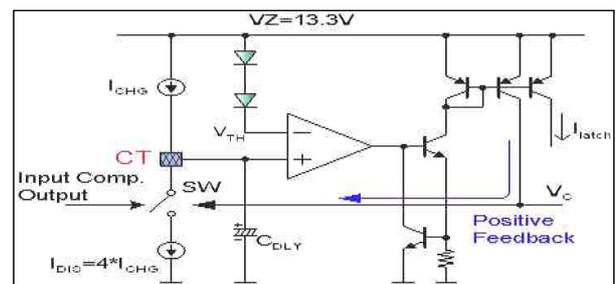


Fig. 4. Part of the internal latch circuit

동작 시간을 분석하는 시험에서 제품(IC)의 사양에 따라 동작 시간이 다르게 측정되었다. 이 제품 중 국내에서 많이 사용되는 7101 IC의 4, 5번 핀 적분 주기 시간을 이론적으로 분석한 결과, 식 (1)과 같이 지연시간이 존재한다. 그림 1에서 I_{DTA} 는 IC 내부 회로에서 4번 핀으로 흐르는 전류이고, I_{SCON} 은 5번 핀에 흐르는 전류이다. V_{SCON} 은 5번 핀과 접지 간의 전압이고

C_{DLY} 는 콘덴서의 값이다.

$$Time = \frac{C_{DLY} \times V_{SCON}}{I_{DTA} - I_{SCON}} = \frac{47 \times 10^{-9} \times 1.2}{(21 - 4) \times 10^{-6}} = 3.318ms \quad (1)$$

출력단의 오동작 방지용 캡의 충전 지연시간은 식 (2)와 같다. I_0 는 7번 핀 출력전류이고, I_{GT} 는 콘덴서를 통과해서 SCR에 인가되는 전류이다. V_{GT} 는 SCR과 접지 간 전위이다. 이때 전압은 0.62V이고, 흐르는 전류는 두 전류 값의 차를 제외한 360 μ A이다.

$$Time = \frac{C_{DLY} \times V_{GT}}{I_0 - I_{CHG}} = \frac{47 \times 10^{-9} \times 0.62}{(400 - 40) \times 10^{-6}} = 80.944\mu s \quad (2)$$

누전차단기 내부에 지연시간이 존재하므로 동작 시간을 감소시키기 위해 Delay Capacitor(C_{DLY}) 47nF을 변경하여 시험한 제품분석이 필요하다.

2.4 누전 트립 동작시간 개선을 위한 1nF Delay Capacitor(C_{DLY}) 시험

4, 5핀 부(Negative) 누전 적분기 파형에서 콘덴서 1nF 사용 시 노이즈에 의해 파형이 심하게 왜곡됨을 알 수 있다. 그림 5는 1nF을 사용한 측정 파형 사진이다.

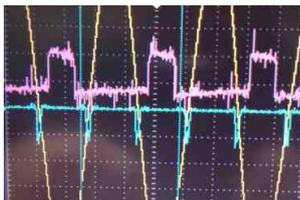


Fig. 5. Measured waveform using 1nF

파형이 심하게 왜곡되는 경우 흔들림에 의해 적분검출이 어렵고, 오동작의 우려가 존재하여 사용할 수 없다. 또한 전도성 및 방사성 노이즈에 취약하여 오동작할 수 있다[6-7].

2.5 누전 트립 동작시간 개선을 위한 10nF Delay Capacitor(C_{DLY}) 시험

영상변류기의 누전전압 파형 및 Latch 출력적분기

전압의 파형을 측정하였다. 측정시간 Δt 는 1.2ms로 파형이 측정되었으며, 그림 6은 10nF을 사용한 측정 파형 사진이다.

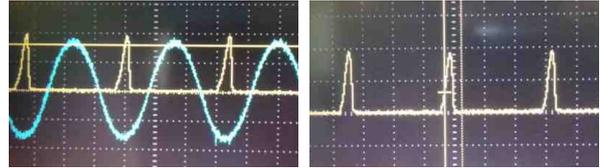


Fig. 6. Leakage waveform and measured integration waveform using 10nF

1nF을 사용한 파형보다 신호 발생 파형이 정확하게 측정되지만, 오동작이 간헐적으로 발생할 소지가 있다.

2.6 누전 트립 동작시간 개선을 위한 20nF Delay Capacitor(C_{DLY}) 시험

누전 신호를 계속해서 인가하는 경우 사인파의 한주기 중 역방향에 대해서만 적분기 파형이 출력됨을 확인할 수 있다. 무선파(RF 방사) 시험결과 20nF에서 가장 안정적인 동작을 하였다. 누전 펄스 파형 상태에서 Latch 파형의 전압은 0.8V가 측정되었다. 4, 5번 핀은 20nF 적용에 따른 적분기 파형이 측정되었으며 동작 시간은 1.7ms로 측정되었다. 초기 적분기 파형으로써 20nF(C_2)을 사용할 경우 동작 시간이 15ms 이하까지는 가능하나 8ms 이하에는 동작 시간 단축이 어렵다. 트립 시간을 낮추기 위해 Cap(Delay Capacitor - C_{DLY})을 20nF으로 작게 하여야 시간 조정이 가능하며 너무 낮게 하면 오동작 우려가 존재한다. 그림 7은 20nF을 사용하여 측정한 적분기 누전펄스파형 및 적분기 확대 측정파형 사진이다.

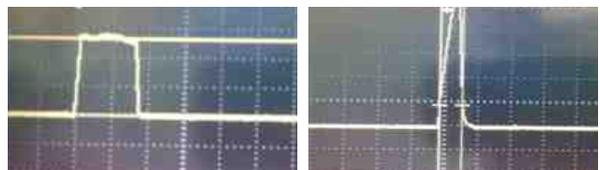


Fig. 7. Leakage waveform and extended integration waveform of IC No. 4 and 5 PIN negative integrator

2.7 콘덴서 조정에 따른 시간분석

콘덴서 적용(20nF)에 따른 개선된 트립 시간은 식 (3)과 같다.

$$Time = \frac{C_{DLY} \times V_{SCON}}{I_{CHG}} = \frac{20 \times 10^{-9} \times 1.2}{17 \times 10^{-6}} = 1.412ms \quad (3)$$

오동작 방지용 컵의 충전 지연시간은 식 (4)와 같다.

$$Time = \frac{C_{DLY} \times V_{GT}}{I_{CHG}} = \frac{20 \times 10^{-9} \times 0.62}{360 \times 10^{-6}} = 34.444\mu s \quad (4)$$

개선 전의 시간 식 (1)과 (2)를 합산하여 계산하는 경우 약 3.39ms가 지연되었으나, 식 (3)과 (4)를 합한 결과 약 1.44ms가 지연되었다. 콘덴서 조정에 의한 동작 시간은 1.95ms가 감소하여 개선되었다.

2.8 개선된 누전차단기 전자회로

ZCT 입력단에 클램프 다이오드를 사용하여 서지에 따른 IC 파손 및 오동작을 방지하였으며, 100Ω의 저항을 삽입하여 서지 전류의 크기를 제한하였다. 또한 동작 시간을 단축하기 위해 4, 5번 출력단과 SCR 동작

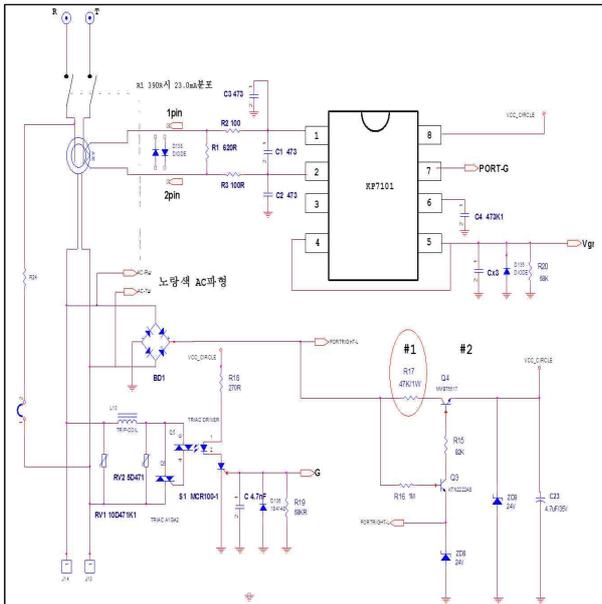


Fig. 8. Simulation of modified circuit-breaker electronic circuit

부분에도 콘덴서의 값을 조정하였고, 오동작 방지를 위한 다이오드가 추가로 배치되었다. 누전 신호의 감지속도가 빨라짐에 따라 사인파의 반주기 검출 능력이 향상되어 동작 속도는 매우 빠르게 변경됨을 확인할 수 있었다. 그림 8은 동작 시간을 개선한 누전차단기 전자회로이다[4].

2.9 개선된 누전차단기 회로 동작시간 성능 분석

IC 출력에서 SCR-Gate 부까지 동작시간은 4ms가 측정되었고, 기구류(내부 동작시간) 포함하는 전체 트립 시간 11.4ms가 오실로스코프로 측정되었다. 그림 9는 누전차단기 전체 동작시간 측정과형 사진이다.



Fig. 9. Measured waveform of entire operation time of circuit-breaker

누전차단기의 동작 속도를 개선하기 위하여 누전차단기 IC 2종을 사용하여 4종류(소형 및 표준형)의 전자회로를 추가로 구성하였다. 시험방법은 2.1항과 같은 방법을 사용하여 동작 시간을 측정하였다. A형과 B형은 표준형으로 사용되는 차단기이고, C형과 D형은 소형에 사용되는 차단기이다. 개선된 누전차단기의 트립 동작 속도를 측정한 결과는 표 2와 같이 측정되었다.

Table 2. Operating time of prototype by test current

구분	종류	시료	누전동작 감지전류 mA	누전동작 시험전류 mA						
				30	60	90	120	150	180	440
				동작시간ms						
신제품 타입	A	#1	19.6	15	15	13	13	14	13	13
		#2	20.3	15	15	15	15	15	12	13

구분	종류	시료	누전동작 감지전류 mA	누전동작 시험전류mA						
				30	60	90	120	150	180	440
				동작시간ms						
신제품	B 타입	#1	20.1	15	15	15	15	15	15	15
		#2	20.0	16	15	15	15	15	15	15
신제품	C 타입	#1	20.9	15	14	14	14	14	13	13
		#2	20.2	15	15	14	14	13	13	13
신제품	D 타입	#1	21.1	16	15	15	15	15	15	15
		#2	21.8	16	16	15	15	15	15	15

동작 시험 결과 B형과 D형에 사용된 특정 IC에서는 동작 속도가 기존에 사용되는 차단기에 비해 감소하였으나, 누설전류 증가분에 대해서는 속도의 감소가 발견되지 않았다. A형과 C형은 기존에 사용되는 IC로써 누설전류 증가에 따라 동작 속도가 감소하였다. 이는 누설전류 크기에 따른 전류 파형의 기울기가 커서 감지 속도가 증가한 것이다.

3. 결 론

본 논문은 누전차단기의 트립 동작 시간을 빠르게 하도록 전자회로 부분의 정수 값을 조정하여 시험하였다. 누전차단기의 동작 속도는 정격전압이 가해진 상태에서 누전 입력 신호가 발생하는 순간 전압 파형의 위치와 누설전류의 지속시간에 따라 동작 시간이 다르게 측정되었고, 이때 측정된 시간의 최댓값은 26ms이다. 이는 전자회로에 사용되는 IC의 특성이 사인파의 역방향 반주기 이내에 동작함으로써 생기는 시간 지연 현상이다. 본 논문에서는 차단기가 오동작하지 않는 범위 내에서 C 정수는 20nF으로 검토되었고, 오동작을 방지하기 위한 보완된 회로를 추가로 구성하였다. 기존의 누전차단기는 26ms이하의 시간에서 시작하였다. 약 3.3ms의 턴온 시간과(Latch 출력부의 기본시간 47nF 적용) 하프 Wave(16.6ms)에서 전류감지시간 및 약 4ms의 기구부 동작 시간이 회로차단기를 여는 데 필요한 시간이었다. 신제품으로 개발된 누전차단기는 조정 가능한 성분의 허용오차 및 기타 변수

(기구부 및 트립하중 개선)로 인해 통합시간을 적용하였고 7101 IC 시정수(적분기 Cap을 20nF)가 조정되어 전체 차단시간 최댓값이 15ms 이하 범위에 측정될 수 있었다. 따라서 누전차단기의 지연요소 등을 최적화하여 차단기를 개발하고, 시험을 한 결과 차단기 표준(KS, 전기용품 안전기준)에서 요구하는 누전 트립 시간을 1/2로 단축할 수 있었다. 즉 인체 감전사고 시 누전차단기의 동작 시간이 빠를 경우 인체에 미치는 영향은 최소화된다. 따라서 이러한 기술을 토대로 의료장비 개발 및 인체 감전 사고방지를 위한 제품 개발에 사용한다면, 감전 사고에 대한 안전성이 증대될 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업기술혁신사업의 지원을 받아 수행된 제품안전 기술기반조성사업 연구과제(No.10054831)입니다.

References

- [1] A Statistical Analysis on the Electric Accident, No.20, Korea Electrical Safety Corporation, Ministry of Knowledge Economy, 2011.
- [2] The Guide to Korea Electrotechnical Regulation, Korea Electric Association, pp.458, 2009.
- [3] Ju-Chul Kim, Sang-Joong Lee, "Improvement of Circuit-Time Product through Analysis of Operating Time of Earth Leakage Circuit-Breakers", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers vol 26, No 12, pp.44-49, 2012.
- [4] Ju-Chul Kim, Sook-Hyun Cho, Dong-Sin Lee, Moon-Soo Seo, Joo-Sam Kim, Gyeong-Yun Min, Dong-Suk Jang, Sang-Joong Lee, "Improvement of Operating Time through Analysis of Electronic Circuit Characteristics of Earth Leakage Circuit-Breakers", Proceedings of 2016 Spring Conference of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp.115, 2016.
- [5] KS C 4613 : Circuit-breaker incorporating residual current protection for industrial uses(CBR), Korean Standards Association, 2011.
- [6] KS C IEC 60947-2 : Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2 : Circuit-breakers, Korean Standards Association, 2009.
- [7] KS C IEC 61009-1 : Residual current operated circuit-breakers with integral overcurrent protection for household and similar uses(RCBOs) - Part 1 : General rules, Korean Standards Association, 2009.

◆ 저자소개 ◆



김주철 (金柱鐵)

1974년생. 서울과학기술대학교 일반대학원 박사수료. 1991년 서울특별시 기능경기대회 옥내배선 입상. 1991년 전국기능경기대회 옥내배선 입상. 중소기업우수기능인. 우수숙련기술자. 대한민국산업현장교수(3기). 한국제품안전협회 배선기구협의회 기술분과 위원장. 한국표준협회 국제인증본부/인증심사원. 2014년~ 현재 한국폴리텍대학 춘천캠퍼스 전기과 교수.



서문수 (徐文洙)

1957년생. 호서대학교 벤처전문대학원 기술경영학과 박사과정 수료. 지식경제부장관상(2012년 소재부품 기술상). 국무총리 표창(2015년 품질경영상). 현재 (주)두원 대표이사(22년).



장동식 (張東錫)

1967년생. 충주산업대 전자공학과 졸업. 1991~2004년 중소기업 기술연구소 근무(전력전자, 누전차단기). 국제표준 IEC부분 누전차단기 시험 관련 KERY 협동연구. 누전시험기 외 전력전자부분 설계. 2005년~ 현재 이도시스템 대표.



조숙현 (趙淑賢)

1962년생. 강원대학교 수학 교육학과 졸업. 2013년 강원대학교 전기전자공학과 박사수료. 현재 한국폴리텍대학 춘천캠퍼스 전기과 초빙교수.



한윤탁 (韓尹鐸)

1975년생. 2005년 숭실대학교 전기공학과 졸업(석사). 2016년 충북대학교 전력계통 박사수료. 2008년~ 현재 한국기계전기전자시험연구원 책임연구원.



이상중 (李尙中)

1955년생. 부산공업고등전문학교 전기과 5년 졸업. 성균관대학교 전기공학과 졸업. 충남대학교 대학원 졸업(박사). 1987~1988년 PSEC 수료. 1976~1998년 한전 전력연구원. 1998년~ 현재 서울과학기술대학교 전기공학과 교수.