

전류 모니터를 이용한 백열등 부하 전기설비에서 사고 징후 검출에 관한 연구

(A Study on the Detection of Indication of Accident in Electric Equipments with Incandescent Lamps Using Current Monitor)

지승욱* · 옥경재 · 김시국 · 이춘하 · 이광식**

(Seung-Wook Jee · Kyung-Gea Ok · Shi-Kuk Kim · Chun-Ha Lee · Kwang-Sik Lee)

요 약

본 논문은 백열등 부하 전기설비에서 측정된 전류 파형으로 전기사고 징후를 조기에 검출하기 위한 것이다. 첫째, 저항성 회로에서 전류 모니터의 특성을 분석하였다. 둘째, 백열등을 부하로 하는 전기설비를 구축하고, 전기설비의 일부에서 KS C IEC(Korea Standard C International Electrostatic Commission) 60112에 따라 트래킹을 발생시켜 사고를 모의하였다. 전기사고 징후는 전류 모니터로 측정된 전류파형을 분석함으로써 검출되었다. 그 결과 부하의 수에 관계없이 사고의 최종 단계인 트래킹으로 진전되어 갈수록 전류 파형에는 점점 큰 전류 펄스가 보였고 출현빈도도 더욱 높아졌다.

Abstract

This paper describes an early detection for indication of electric accident using current waveform which is measured in electric equipments consisted incandescent lamps.

At first, it analyzes characteristics of current monitor in resistive electric circuit. In second, the electric equipment is consisted of incandescent lamps. And the electric accident is simulation of tracking according to KS C IEC(Korea Standard C International Electrostatic Commission) 60112 at some part of the electric equipment. The indication of the electrical accident is detected to analyzing current waveform measured by current monitor.

As the tracking breakdown, electric accident, processes, as current pulse is bigger and ratio of appearance also is increased irrespective of amount of load.

Key Words : Electric Accident, Current Monitor, Current Pulse, Tracking Breakdown

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
Tel : 053-810-2486, Fax : 053-810-4767
E-mail : kslee@yu.ac.kr
접수일자 : 2008년 10월 2일
1차심사 : 2008년 10월 6일
심사완료 : 2008년 12월 29일

1. 서 론

한국전기안전공사의 전기재해 통계분석에 따르면 단락과 누전은 전기로 인한 화재의 주요 발생 원인

에 해당한다[1].

단락의 경우 국부적, 일시적으로 큰 에너지가 집중되는 단락불꽃 보다 피복류 등에서 서서히 탄화가 진행되는 경우가 화재로 이어질 위험이 더 크다고 알려져 있다. 누전 또한 시간이 흐를수록 탄화를 통해 발화로 이어지는 경우가 많은 것으로 알려져 있다[2].

이처럼 절연물 사이에서 서서히 진전되어 가는 탄화현상은 트래킹 진전과정의 일부이며, 방전으로 인해 전류 펄스를 수반하게 된다[3-7].

따라서 전기설비에서 발견되는 전류 펄스는 사고의 징후로 볼 수 있으며, 트래킹 파괴현상으로 진전되기 전에 감지함으로써 재해를 예방할 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는 모의 전기설비를 만들고, 사고를 모의한 후, 전류를 검출하여 모의 전기설비에서 발생하는 사고 징후를 검출하고자 하였다. 모의 전기설비에서 부하는 백열등을 이용하였고, 사고는 설비의 일부에서 트래킹을 발생시켜 모의하였다.

2. 관련 이론

2.1 교류 코로나 방전

대기 중에서, 침-평판 전극과 같은 불평등 전계를 형성하는 두 전극 사이에 고전계가 형성되면, 전리가 시작되고 국부파괴(이하 코로나)를 거쳐 전로파괴에 이르게 된다.

여기서, 코로나는 고전계부인 침전극의 극성(정극성 또는 부극성)에 따라 서로 다른 형식을 보이며, 이 두 전극에 상용주파수인 60[Hz]의 교류 전압을 인가하게 되면, 고전계부의 극성에 따라 반주기마다 정·부 직류 코로나에 해당하는 교류 코로나가 전압 파형의 최대치 부근에서 발생한다[8-10].

2.2 트래킹 파괴

트래킹이란 고체 절연 재료 표면에서 전기적 응력과 전해질 오염의 결합 효과로 인해 고체 절연 재료 또는 그 표면에 생성되는 전류 통로의 점진적 형성 현상으로 그 진전과정은 다음과 같다[11].

절연재료 표면의 습윤이나 오손 때문에 표면에 누설전류가 흐른다. 정현파인 누설전류는 줄열(Joule's heat)을 발생시켜 전해액을 증발시킴으로써 건조대를 형성시킨다.

건조대에 전계가 집중되면 방전이 개시되고, 전류 파형에 고주파성분(전류 펄스)이 나타난다.

방전이 계속되면서 방전 열에 의해 탄화가 시작되면, 전류파형에 전류펄스가 더욱 많이 나타나고, 시료 표면에서는 미소발광방전(scintillation)도 일어난다.

탄화가 진전하여 양 전극 사이에 도전료가 형성된 것이 트래킹 파괴이다. 누설전류도 급격히 증가하게 된다[3-6, 12].

3. 전류 모니터의 특성 분석

3.1 실험 장치 및 방법

전류 모니터의 특성을 분석하기 위한 실험 회로는 그림 1과 같다.

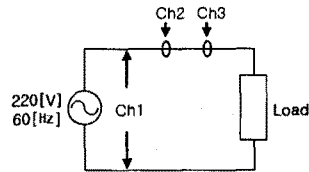


그림 1. 실험회로
Fig. 1. Experimental circuit

전원은 교류 220[V], 60[Hz], 부하는 무유도 저항(225[Ω])과 백열등(100[W], 220[V])을 각각 사용하였다.

오실로스코프(Tektronix, TPS2014)의 채널 1(Ch1)에는 100:1 프로브(LeCroy, PPE 2[kV])를 연결하여 부하 양단의 전압을 측정하였고, Ch2에는 전류 프로브(Tektronix, A622 AC/DC Current Probe)를 연결하고, Ch3에는 그림 2 및 표 1의 전류 모니터(Pearson electronics, Current monitor model 2877)를 연결하여 부하 전류를 측정하였다.

부하 전압과 전류는 부하가 무유도 저항일 때와 백열등일 때 각각에 대하여 측정되었다.



그림 2. 전류 모니터
Fig. 2. Current monitor

표 1. 전류 모니터의 특성
Table 1. Characteristic of current monitor

Current monitor model 2877	
Sensitivity	1[V/A] +1/-0[%]
Maximum rms current	2.5[A]
Useable rise time	2[ns]
Low frequency 3[dB] point	300[Hz](approximate)
High frequency 3[dB] poing	200[MHz](approximate)
Operating temperature	0 to 65[°C]

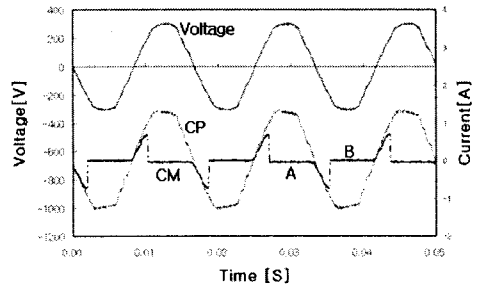
3.2 실험 결과 및 분석

그림 1에서 무유도 저항 부하에 대한 전압·전류 파형을 그림 3 (a)에, 백열등 부하에 대한 전압·전류 파형을 그림 3 (b)에 나타내었다.

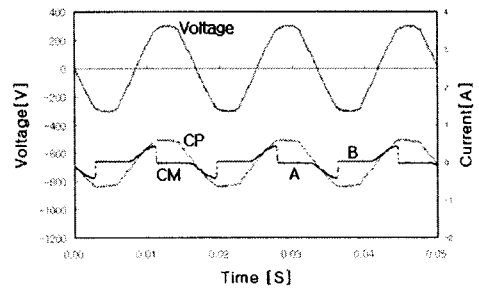
그림 3의 전압 및 전류파형들은 각각 50[ms] 동안 샘플링 주파수 50[kHz]로 2,500개의 데이터를 추출하여 그린 것이다.

그림 3 (b)에서 전류 모니터로 관측된 전류 파형을 보면, 저항성 부하 임에도 A 및 B와 같이 전류가 0[A]에 가까운 값으로 유지되는 영역이 1 주기 동안 2 번씩 존재한다. 특히, 이 부분을 전압 파형과 비교하면, 전압값의 정·부 최대치 부근이다.

그림 4 (a)와 (b)는 그림 3 (a)의 전류 프로브로 측정한 전류 파형(CP 파형)과 전류 모니터로 측정된 전류 파형(CM 파형)에 대하여 각각 푸리에 변환을 수행한 후, 0에서 1,000[Hz]까지 나타낸 결과이다. 0~100[Hz] 사이에서 CM 파형의 크기가 CP 파형의 크기보다 작은 것을 볼 수 있다.

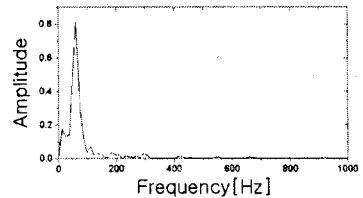


(a) Load=Noninductive resistance(R=225[Ω])

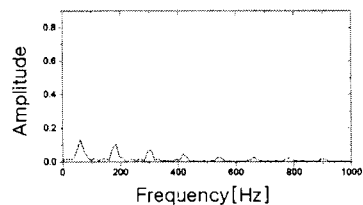


(b) Load=A incandescent lamp

그림 3. 전압·전류 파형
Fig. 3 Voltage and current waveforms



(a) Result of FT for CP waveform in Fig. 3 (a)



(b) Result of FT for CM waveform in Fig. 3 (a)

그림 4. 푸리에 변환 결과
Fig. 4. Results of FT(Fourier transform)

그림 5는 그림 4 (b)에 대하여 300[Hz] 미만의 값에 감쇄분 3[dB]를 보정한 후, 역푸리에 변환을 수행

전류 모니터를 이용한 백열등 부하 전기설비에서 사고 징후 검출에 관한 연구

한 결과를 보여 준다. 300[Hz] 미만의 영역에 대한 감쇄분을 보상함으로써 그림 3에서 나타났던 A와 B 영역이 없어지는 것을 알 수 있다.

따라서 저항성 부하에 대한 CM 파형에 그림 3의 A 및 B와 같은 영역이 존재하는 것은, 표 1과 같이, 300[Hz] 미만의 영역에서 3[dB] 감쇄되는 전류 모니터의 동작 특성 때문인 것으로 판단된다.

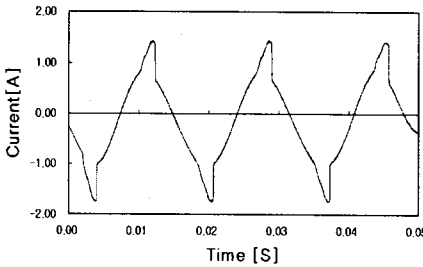


그림 5. 그림 4 (b)에 대한 감쇄분 보상 후 역푸리에 변환 결과

Fig. 5. Result of Inverse Fourier Transform after compensation for reduction of Fig. 4 (b)

4. 전류 모니터를 이용한 모의 전기 설비에서의 사고 징후 검출

4.1 실험 장치 및 방법

모의 전기설비에서 사고를 모의하기 위한 회로의 구성은 그림 6과 같다.

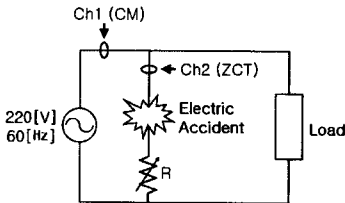


그림 6. 실험 회로

Fig. 6. Experimental circuit

전원은 220[V], 60[Hz], 부하는 백열등(100[W], 220[V])을 사용하였다.

사고는 그림 6과 같이 KS C IEC(Korea Standard C International Electrostatic Commission) 60112의

내트래킹 장비의 전극을 이용하여 모의하였으며, 무유도 저항 R은 사고시 단락전류가 KS C IEC 60112의 권고안인 $1.0 \pm 0.1[A]$ 를 만족하도록 하기 위한 것이다.

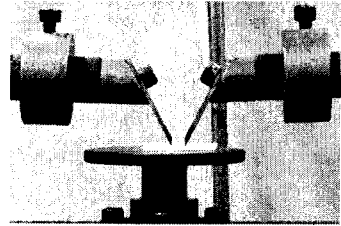


그림 7. 내트래킹 시험전극(KS C IEC 60112)
Fig. 7. Test apparatus(KS C IEC 60112)

시험시료는 IV(600[V] 비닐절연전선)의 절연재료를 $30 \times 30 \times 3[mm]$ 규격으로 잘라서 사용하였고, 시험용액은 $23 \pm 1[^\circ C]$ 에서 탈이온수에 무수 염화 암모늄(Na_4Cl)을 0.1[wt%] 용해시켜 사용하였다.

파형은 LeCroy사의 Waverunner LT372(4[GS/s]) DSO(digital storage oscilloscope)로 측정되었다. 그림 6에서 Ch1에는 전류 모니터를 사용하여 회로에 흐르는 전체 전류를 측정하였으며, Ch2에는 ZCT(ze-ro current transformer, 성한트랜스텍, SH7P)를 사용하여 모의 사고의 상태를 모니터 하였다.

실험의 진행 역시 KS C IEC 60112에 따라 시험용액을 30초 마다 1회씩 트래킹이 일어날 때까지 시험시료에 적하하였다.

4.2 실험 결과 및 분석

그림 6의 회로에서 사고와 관련하여 누설전류가 발생하였을 때의 등가회로를 그린 것이 그림 8이다.

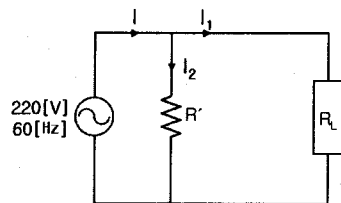


그림 8. 그림 6에서 누설전류가 흐를 때의 등가회로
Fig. 8. Equivalent circuit of Fig. 6

그림 8에 키르히호프의 전류법칙(Kirchhoff's current law)을 적용하게 되면 $I=I_1+I_2$ 이다. I는 실제 전기설비에서도 측정 가능한 전기설비 전체의 전류이다. I_1 은 부하전류이고, I_2 는 사고로 인한 누설전류이다.

전기사고가 일어나기위해 수반되는 방전은 I_2 에서 전류 펄스의 형태로 나타나며, 이 전류 펄스는 전압값의 정·부 최대치 부근에서 주로 발생된다[8-10].

부하의 수가 증가하여 I_1 이 커질수록 I_2 의 비중은 작아지므로 I로부터 I_2 를 검출하는 것이 점차 어려워진다. 하지만 저항성 부하설비의 경우 전류 모니터를 이용하여 I를 관찰하면, 전류 모니터의 특성상 전압값의 정·부 최대치 부근에서 I_1 이 0[A]에 가까운 값으로 유지되기 때문에 상대적으로 I_2 의 비중이 커지면서 I로부터 I_2 의 관측이 가능해진다.

전류의 미세한 변화를 감지하기 쉽도록 DSO에서 양자화의 크기를 작게 하고 관측한 결과를 그림 9와 10에 나타내었다.

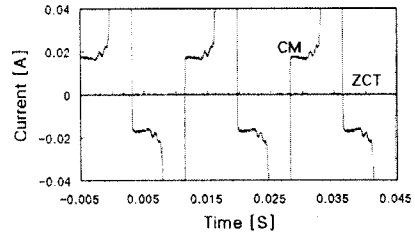
그림 9는 부하로 백열등 1개를, 그림 10은 부하로 백열등 4개를 연결하고, 사고를 모의하면서 측정한 전류 파형이다.

그림 9에서 (a)는 정상상태 때의 전류 파형을 보여 준다. 즉, 모의 사고로 인한 누설전류가 없는 상태이기 때문에 ZCT로 측정된 I_2 는 0[A]이다. 따라서 전류 모니터로 측정된 전기설비의 전체전류 I에는 부하전류 I_1 만 존재하게 되고, 전류 모니터의 특성상 저항성 부하에 대하여 1주기 동안 2번씩 0[A]에 가까운 값을 유지하는 것을 볼 수 있다.

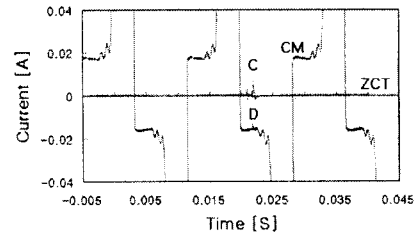
(b)는 방전이 일어나고 있을 때의 전류 파형이다. 특히 (b)에서 C는 모의 사고설비에서 건조대 형성 후 전계가 집중되는 곳에서 일어나는 방전으로 인한 전류 펄스이며, 이 펄스는 전체 전류에도 영향을 미치기 때문에 전류 모니터로 측정된 전체 전류에도 D와 같이 펄스가 보이는 것이다.

(c)는 탄화가 진전되어 가면서 방전도 더욱 활성화되고 있을 때의 전류 파형이다. 따라서 누설전류 펄스도 더욱 크고 많이 발생되고 있으며, 전체전류에도 더욱 잘 나타나고 있다.

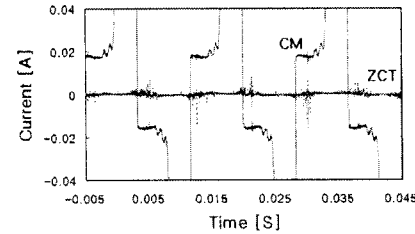
(d)는 사고가 일어난 후, 즉 트래킹으로 누설전류가 지속적으로 흐를 때 관측된 전류 파형이다. 단락으로 인한 누설전류는 정상적인 부하로 인식되기 때문에 전체 전류만으로는 정상상태와 구별이 어렵다.



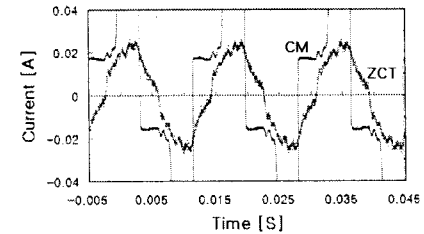
(a) static states



(b) discharge in progress



(c) carbon formation

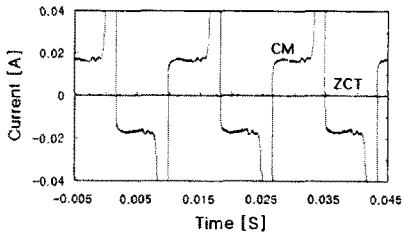


(d) tracking breakdown

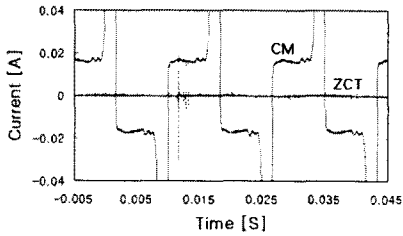
CM(current monitor) : Ch1 in Fig. 6
ZCT : Ch2 in Fig. 6

그림 9. 전류 파형(부하=백열등 1개)
Fig. 9. Current waveforms
(Load=A incandescent lamp)

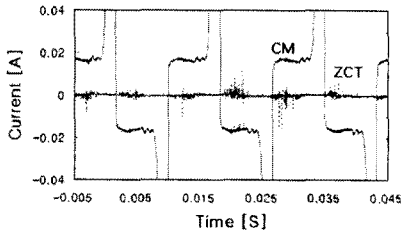
전류 모니터를 이용한 백열등 부하 전기설비에서 사고 징후 검출에 관한 연구



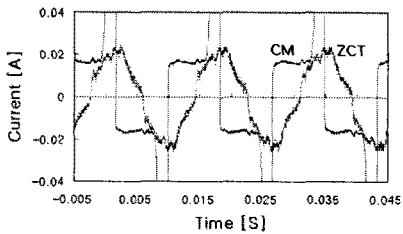
(a) static states



(b) discharge in progress



(c) carbon formation



(d) tracking breakdown

CM(current monitor) : Ch1 in Fig. 6
ZCT : Ch2 in Fig. 6

그림 10. 전류 파형(부하=백열등 4개)
Fig. 10. Current waveforms
(Load=4 incandescent lamps)

그림 10의 (a)에서 (d)도 그림 9와 동일하다. 즉 부하가 증가해도 전류 모니터로 측정된 회로 전체의 전류파형은 전압값의 정·부 최대치 부근에서 0[A]를 유지하기 때문에 전기설비에서 사고 징후 검출에 유용함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 전기설비에서 관측된 전류 파형을 이용하여 사고 징후를 예측할 수 있도록 전류 모니터의 특성을 분석하였고, 모의 전기설비에서 전류 모니터로 관측한 전류 파형으로 사고의 징후를 사전에 검출할 수 있는 실험을 하였다. 이를 통하여 다음의 결과를 도출하였다.

- (1) 정현파 전원에서 저항성 부하에 흐르는 전류를 전류 모니터로 측정된 결과 0[A]에 가까운 값으로 유지되는 영역이 1주기 동안 2번씩 존재한다. 특히, 이 부분은 전압 파형과 비교하여, 전압값의 정·부 최대치 부근이다. 교류 방전의 경우 전압의 정·부 최대치 부근에서 펄스가 나타나기 때문에 저항성 부하 전기설비에서 전류 모니터를 이용하면 사고로 인한 전류 펄스를 관측할 수 있다.
- (2) 백열등을 부하로 하는 모의 전기설비에서 KS C IEC 60112의 내트래킹 전극을 이용하여 사고를 모의한 후, 전류 모니터로 회로 전체의 전류를 측정하였다. 그 결과 사고로 인해 발생하는 전류 펄스를 관측할 수 있었다. 특히, 사고가 진전되어 갈수록 전류 펄스의 크기는 점차 커지고, 출현 빈도도 높아 졌다.

이상의 결과들은 전기설비에서 측정된 전류 파형을 이용하여 사고 징후를 검출하기 위한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.

References

- (1) 한국전기안전공사, "2005년도 전기재해통계보고서", 전기재해통계정보시스템(<http://www.kesco.net>), 2006.
- (2) 이춘하 외, "전기화재공학", 동화기술, pp.203-265, 2004.
- (3) 최병화, "有機絶緣材料의 Tracking 破壞에 관한 研究", 석사학위논문, 영남대학교, 1985.
- (4) N. Yoshimura, M. Nishida, and F. Noto, "Influence of the

electrolyte on tracking breakdown of organic insulating materials", IEEE. Trans. on Elect. Insul., Vol.E-16, No.6, pp.510-520, Dec. 1981.

- [5] 西田眞,吉村昇,能登文敏,“有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における乾燥帯の形成過程”, 전기학회 논문지, A pp.593-600, 昭58-A72.
- [6] 吉村昇,西田眞,能登文敏,“有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における炭火開始過程(IEC 112 方法の場合)”, 전기학회 논문지, A pp.429-436, 昭56-A54.
- [7] N. Yoshimura, M. Nishida, and F. Noto, “Light Emission from Tracking Discharges on Organic Insulation”, IEEE. Trans. on Elect. Insul., Vol.E-19, No.2, pp.149-155, Apr. 1984.
- [8] Jen-Shih Chang, Phil A. Lawless, Toshiaki Yamamoto, “Corona Discharge Processes”, IEEE. Trans. on Plasma Science, Vol.19, No.6, Dec. 1991.
- [9] 細川辰三, “コロナ放電機構と最新の研究動向”, TJE Japan, Vol. 1, 11-A, No. 5, 1991.
- [10] 電氣學會放電ハンドブック出版委員會編, “放電ハンドブック(上巻)”, 電氣學會, pp.139-150, 平成10年.
- [11] KS C IEC 60112, “고체 절연 재료의 내트래킹 및 비교 트래킹 지수 측정 방법”, 2005.
- [12] 電氣學會放電ハンドブック出版委員會編, “放電ハンドブック”, 電氣學會, 昭和55年.

◇ 저자소개 ◇

지승욱 (池昇昱)

1971년 12월 27일생. 1995년 영남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 출강.

옥경재 (玉卿材)

1975년 7월 14일생. 1999년 호서대 소방학과 졸업. 2006년 동 대학원 수료(박사과정)

김시국 (金時國)

1981년 3월 24일생. 2007년 호서대 소방학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.

이춘하 (李春夏)

1953년 10월 20일생. 1979년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985~1994년 한국기계연구원 실장. 2004~2005년 미국 Worcester 공과대학 객원교수. 2006~2008년 전국대학 소방학과 교수협의회 회장. 현재 방폭기술연구회 회장. 호서대 소방방재학과 교수.

이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 영남대학교 산업대학원장 역임. 현재 본 학회 회장. 영남대 공대 전기공학과 교수.