

전력용 XLPE Cable의 부분방전과 방사전자파 특성

(Characteristics of Radiated Electromagnetic Wave and Partial Discharge in Power XLPE Cable)

이현철 · 박광서 · 윤대희 · 이상훈 · 김종환 · 김충년 · 김기채 · 이광식*
(Hyun-Chul Lee · Kwang-Seo Park · Dae-Hee Yoon · Sang-Hun Lee · Jong-Hwan Kim · Chung-Nyun Kim · Ki-Chai Kim · Kwang-Sik Lee)

요 약

본 논문은 XLPE(cross-linked polyethylene insulated power Cables)을 절연물로 사용하는 22.9[kV]용 전력케이블에 외부 손상에 의해 발생하는 부분 방전을 모의하였으며, 절연 진단방법 중 하나인 UHF법을 이용하여 부분 방전시 공간으로 전파되는 방사전자파를 EMI, EMC 측정용 BiconiLog 안테나(EMCO 3142)와 스펙트럼 아날라이저를 이용해 측정하는 UHF법을 이용하였다. 본 연구 결과 방전진전과정의 평가가 가능함을 확인하였다.

Abstract

This paper simulated partial discharge caused by 22.9[kV] power cable using XLPE(Peroxide Crosslinkable Polyethylene) insulation having the outside damage . As one of the insulation diagnostic method a radiated electromagnetic waves were measured by an UHF method using a BiconiLog antenna(EMCO-3142) and a spectrum analyzer used to measure EMI, EMC.

From results of this study, It was confirmed that discharge progress were possible to be estimated by the proposed method.

Key Words : XLPE power cable, Radiated electromagnetic waves, partial discharge, UHF method

1. 서 론

전력 수요의 급증으로 인하여 전기 에너지의 원활한 공급을 위해 송·배전 전력계통은 고전압·대용량화가 이루어 지고 있다. 전력을 운반하는 방법은

지중전력 케이블과 가공지선을 이용하는 방법이 있으며, 전력공급의 신뢰성, 안전성, 미관상의 이유 및 가설 공간의 부족 등으로 인해 지중케이블의 사용이 날로 늘어나고 있는 추세이다.

전력케이블의 절연체재료로 많이 사용되는 XLPE 고체절연체는 폴리에틸렌에 유기 가황제를 혼합하여 가교설비를 이용하여 폴리에틸렌을 가교시켜 폴리에틸렌 구조를 결합상태(가교상태)로 만들어 폴리에틸렌에 열경화성의 점탄성 성질을 부여한 재료로 전기적 특성과 열 특성이 우수하며 성형이 용이하고

* 주저자 : 영남대학교 대학원 전기공학과 교수
Tel : 053-810-3953, Fax : 053-810-4629
E-mail : kdream1111@hotmail.com.
접수일자 : 2004년 3월 29일
1차심사 : 2004년 4월 2일
심사완료 : 2004년 4월 19일

가벼워서 낮은 가설비용 등의 장점들로 인해 최근 400[kV]급의 OF 케이블이 XLPE 케이블로 대체되고 있는 실정이다.

XLPE 케이블은 사용 중 여러 가지 요인에 의하여 내용수명을 다하지 못하고 조기 파괴되는 경우가 많다. 국내에서도 지중 케이블의 절연파괴 사고가 빈번하여 최근 사고원인 규명을 위한 연구가 진행되고 있다. 케이블을 지중에 매설시 외부손상이나 지하수에 의한 침식 등에 의해서 결함이 발생한다. 발생한 결함부분에서 절연물의 절연내력이 상대적으로 약해져 그 부분에서 전계집중으로 인한 부분 방전이 일어나며 이로 인해 열화가 발생 및 진행되어 결국 전로 파괴에 이르게 된다[1][2].

고압 전력케이블의 절연진단방법에는 직류 중첩법, 직류 성분법, 유전 정점법이 있으며 이들 방식은 고압으로 운전중인 선로에서 측정하는 방식이다.

본 논문에서는 UHF법을 이용해 케이블의 외부 손상에 의해 발생하는 부분방전시 방사되는 방사전자파의 스펙트럼 측정하고 측정된 데이터의 처리를 통해 방전진전에 따른 스펙트럼 특성을 연구하여 방전진전과정의 평가가 가능함을 제시하였다[3~6].

2. 스펙트럼의 데이터 처리

그림 1은 본 논문에서 방전과정의 판단을 위해 이용한 데이터 처리 방법이다[7][8].

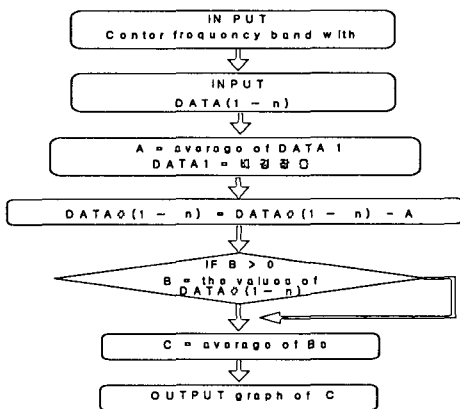


그림 1. 신호처리[8] 위한 플로우 차트
Fig. 1. flower chart of signal processing

외부손상에 의해 케이블 내부의 부분 방전시 방사되는 방사전자파를 스펙트럼 아날라이저에 의해 측정하였다. 주파수 대역별 스펙트럼을 500개의 데이터로 저장하였다. 얻어진 500개의 데이터는 텍스트 형식의 파일로 저장되어지며 신호처리를 위한 프로그램에 입력되어 진다.

먼저 전압을 인가하지 않은 상태에서 얻어진 주파수 스펙트럼 데이터를 기본으로 하여 그 데이터의 평균값을 선정하고, 각 전압을 인가한 후 얻어진 주파수 스펙트럼 데이터 값에서 이 평균값을 빼준다. 이렇게 처리된 데이터에서 '0'이하의 값에 대해서는 그 값을 '0'으로 처리하고, 각 데이터를 평균하여 그 값을 그래프로 표시한다.

위와 같은 과정을 거치게 되면 배경잡음과 인가전압에 따라 방전이 진전되어 가는 과정에서 얻어지는 데이터와의 차이를 통해 증가 정도를 알 수 있어 절연 진단에 이용할 수 있게 되며 외부노이즈에 대한 영향도 최소한으로 줄 일수 있게 된다. 즉 배경잡음과 전압 인가시 스펙트럼 차이를 가시적인 도표로 나타낼 수 있게 된다[1][2].

3. 실험 방법 및 장치

그림 2는 XLPE 고체케이블에 외부 손상으로 인한 부분방전을 모의하기 위해 전력용 Cable(단심, 38[mm])을 이용해 제작한 시료이다. 케이블 내의 부분방전현상을 관찰하기 위해 외피를 제거하였으며, 절연체 표면과 중심 도체사이의 두께는 7.2[mm]이다.

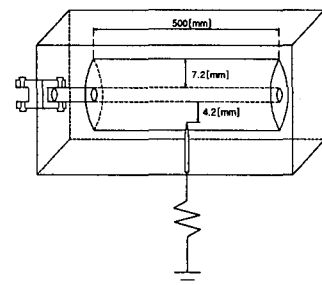


그림 2. 시료 제작
Fig. 2. The manufacture of specimen

케이블 표면에 침 전극(스테인레스 재질 : 선단

전력용 XLPE Cable의 부분방전과 방사전자파 특성

각도 30°, 곡률 반경 20[μm]을 3[mm] 삽입 하였으며, 침 전극과 절연체 사이에 1[mm]의 인위적인 보이드를 만들었다.

이렇게 만든 시료는 연면 방전을 방지하기 위해 절연유에 함침 시켰다. 절연유는 비중이 0.91이고 절연과피 전압이 2.5[mm]당 30[kV]이상인 1종 2호의 광유를 사용했다.

그림 3은 케이블의 외부손상에 의한 부분방전을 모의하기 위한 실험 장치 개략도이다.

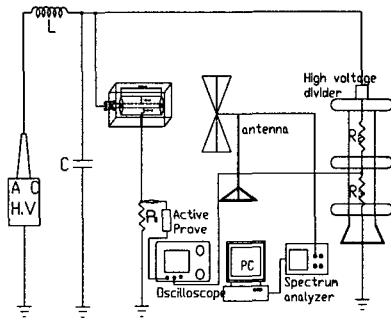


그림 3. 실험장치 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용한 전원은 교류 고전압장치(일본, matsunaga. co. ltd, 입력 : AC 200[V] 50/60[Hz], 출력 : 60[kV])를 사용하였다.

전압인가는 상용주파수 교류전압을 약 1.0[kV/s]의 속도로 인가하였고, 최초 방전개시 전압부터는 2[kV]씩 증가시켜 실험하였다. 고체절연체의 부분방전에 의한 열화를 고려하기 위해 전압을 일정시간 동안 유지하였다. 고압 분압기(Pulse Electronic Engineering, EP-300K, 10000 : 1)와 오실로스코프를 사용하여 방전전압 및 전류를 측정하였다. 부분방전시 방사되는 방사전자파는 EMI, EMC 측정용 BiconiLog 안테나(EMCO 3142, 30[MHz]-2[GHz])와, 스펙트럼 아날라이저(Advantest R3131A)를 이용하여 주파수 스펙트럼을 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 실험실 주변의 배경잡음으로 본 실험에

들어가기 전 모든 측정 장비를 켜둔 상태에서의 주파수 스펙트럼이다. 배경잡음 중에서 주파수 90~120[MHz], 180~200[MHz]대역에서 측정장치 및 방송 주파수대역이다. 부분방전 초기부터 절연과피 직전까지의 측정된 방전 데이터의 스펙트럼을 기초실험을 통해 검토해본 결과 변화가 큰 30~500[MHz]을 주요 측정대역으로 선정하였으며, 처리된 스펙트럼에서 외부 노이즈의 영향을 고려하여 배경잡음보다 전계강도가 약 2[dB]이상 증가한 것을 부분방전 신호로 판단하였다. 스펙트럼의 주파수 대역과 전계강도 변화로 부분 방전 진단단계를 판단하였다. 그리고 배경 노이즈가 측정된 대역인 90~120[MHz], 180~200[MHz]대역은 방전진전과정을 판단하는데 제외하였다.

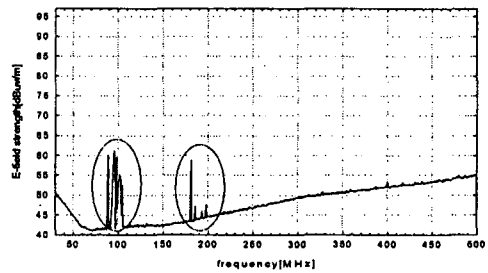


그림 4. 배경잡음
Fig. 4. back ground noise

그림 5의 (a)~(f)는 각인가 전압별 측정된 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 앞서 기술한 데이터 처리법에 의해 처리된 것을 나타내었다.

그림 5의 (a)는 8[kV]인가시의 스펙트럼 분포이며, 8[kV]에서 미세한 방전 전류가 처음으로 측정되었다. 50~80[MHz]대역 부근에서 약 5[dB] 증가한 스펙트럼이 검출되었다.

그림 5의 (b)는 10[kV]인가시의 스펙트럼 분포이다. 50~80[MHz]대역에서 약 10[dB] 증가한 스펙트럼이 검출되었으며, 150~170[MHz]대역에서 처음으로 부분방전 신호라고 판단되는 스펙트럼이 검출되기 시작하였다.

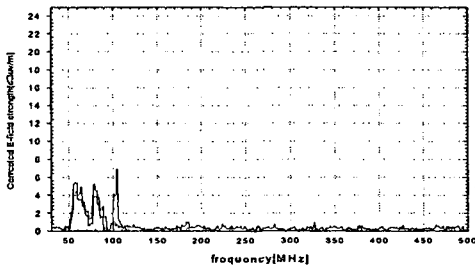
그림 5의 (c)은 16[kV]인가시의 스펙트럼 분포이다. 50~80[MHz]대역에서 약 15[dB], 150~170[MHz]대역에서 약 5[dB] 증가한 스펙트럼이 검출되었으며, 250~270[MHz]대역 부근에서 전계강도가 약 2[dB] 이상 증가한 스펙트럼이 검출되기 시작하였다. 이때

침 선단과 절연체 사이에 부분방전 발생 빈도가 증가하였다.

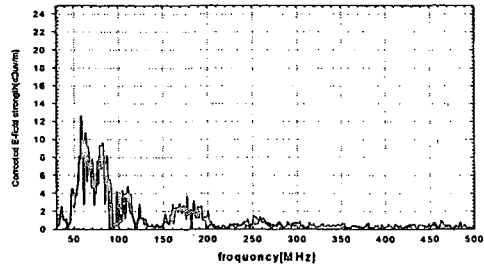
그림 5의 (d)은 18[kV]인가시의 스펙트럼 분포이다. 50~80[MHz]대역에서 약 18[dB], 150~170[MHz]대역에서 약 7[dB], 250~270[MHz]대역에서 전계강도가 약 3[dB] 증가된 스펙트럼이 검출되고, 300[MHz]대역부근에서 약 2[dB]이상 배경잡음보다 증가한 스펙트럼이 검출되기 시작하였다.

그림 5의 (e)는 24[kV]인가시의 스펙트럼 분포이다. 50~80[MHz]대역에서 약 10[dB], 130~170[MHz]대역

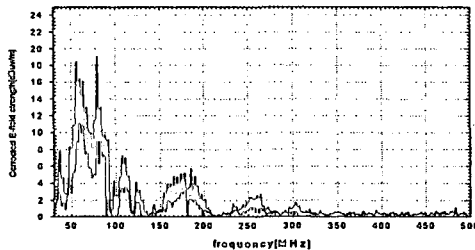
에서 약 4[dB], 230~300[MHz]대역부근에서 약 3[dB]이상 전계 강도가 증가한 스펙트럼이 검출되었다. 처음으로 350[MHz]~500[MHz]이후 대역에서 약 2[dB]이상 증가된 스펙트럼이 검출되었다. 이전 인가전압의 스펙트럼보다 100[MHz]이하 대역의 전계강도는 감소하였으나 검출 대역폭은 증가하였으며, 200[MHz]이상 대역에서 부분방전신호라고 판단되는 스펙트럼의 대역폭은 넓어졌으며 전계 강도도 증가하였다. 이것은 부분방전이 진전됨에 따라 방전전류펄스의 상승시간이 증가하여 방사전자파의 저주파수 대역의 성분



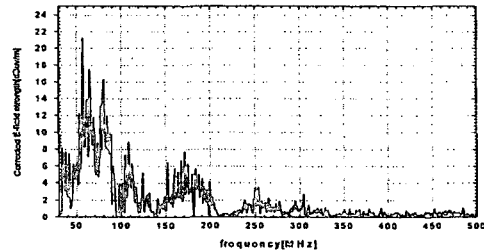
(a) 8[kV] 인가시



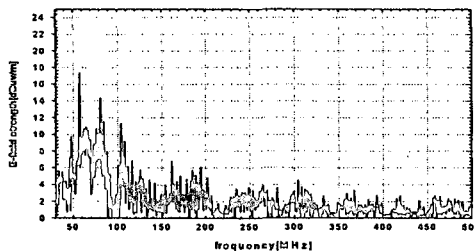
(b) 10[kV] 인가시



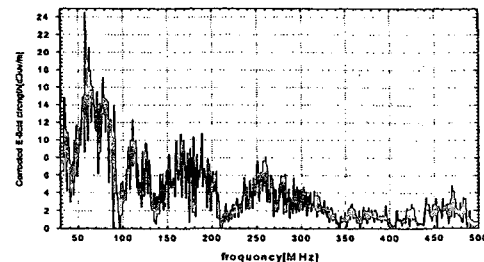
(c) 16[kV] 인가시



(d) 18[kV] 인가시



(e) 24[kV] 인가시



(f) 28[kV] 인가시

그림 5. 각 인가전압별 주파수 스펙트럼

Fig. 5. Distribution of frequency spectrum of radiated electromagnetic waves with applied voltages

전력용 XLPE Cable의 부분방전과 방사전자파 특성

은 감소하고 고주파수 대역의 성분이 증가하기 때문이다.

그림 5의 (f)는 28[kV]인가시 방사전자파의 스펙트럼 분포이다. 50~80[MHz]대역에서 약 16[dB], 130~170[MHz]대역에서 약 10[dB] 증가한 스펙트럼이 검출되었으며, 230~350[MHz]에서 5[dB] 이상, 350[MHz]이상 대역에서 3[dB]이상 증가한 스펙트럼이 검출되었다. 부분방전은 휴지구간 없이 연속적으로 더욱 강하게 발생하여 급속히 진전되어 나가는 것이 관찰되었다.

침 전극 선단에 코로나가 발생하여 고체내에 열화가 시작되는 부분방전 초기단계인 8[kV]~10[kV]에서는 50~80[MHz]대역부근에서 큰 변화가 나타났으며, 침 선단과 절연체 사이에 부분방전이 발생하여 진전해 가는 부분방전 중기 단계인 16[kV]~18[kV]에서는 150~170, 250~270[MHz]대역부근에서도 스펙트럼의 변화가 검출되었다.

침선단과 절연체 사이에 부분방전이 연속적으로 발생해 급속도로 진전해 가는 부분방전 말기 단계인 24[kV]~28[kV]에서는 방전전류펄스의 상승시간의 증가로 인해 부분방전 초기, 중기보다 200[MHz]이상 대역에서 스펙트럼의 전계강도가 크게 증가하였으며, 500[MHz] 대역까지 모든 측정대역에서 배경잡음보다 2[dB] 이상 증가한 신호가 검출되었다.

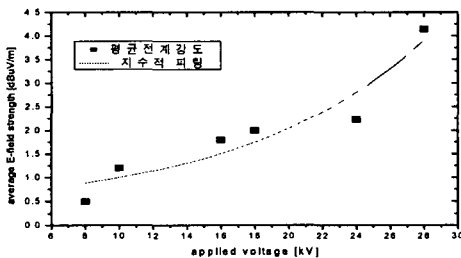


그림 6. 30~500[MHz] 대역에서의 각 인가전압별 주파수 스펙트럼의 평균전계강도

Fig. 6. Distribution of frequency spectrum of Mean value electric field intensity with each applied voltage in 30[MHz]~500[MHz]

그림 6은 전술한 신호처리법에 따라 30[MHz]~500[MHz] 대역에서 각 인가 전압에 따른 평균 전계 강도의 증가를 나타낸 것이다.

부분 방전 초기단계인 10[kV]는 배경잡음보다 1.2[dB]정도 증가하였으며, 부분방전이 발생되어 진전

하기 시작하는 중기단계인 18[kV]는 2.0[dB]정도 증가하였다. 부분방전 발생이 연속적으로 발생하는 24[kV]부터 전계강도가 크게 증가하여 전로파괴 직전인 28[kV]에서는 평균 전계강도가 4.1[dB]정도 증가하였다.

인가전압 상승에 따라 주변으로 방사되어지는 전자파의 평균 전계강도는 그림 6과 같다. 전압 증가에 따른 평균전계강도의 증가는 식 (1) 에 의한 지수적 fitting과 같이 증가한다. $A_1 = 0.2733$, $y_0 = 0.31263$, $t_1 = 10.8574$ 는 상수이다. fitting과 오차는 약 10[%] 정도이다.

$$y = A_1 e^{\frac{x}{t_1}} + y_0 \quad (1)$$

5. 결 론

전력용 XLPE-Cable의 외부손상을 모의하기 위해 케이블 표면에 침 전극을 삽입하고, 인가전압 증가에 따른 부분방전에 의해 방사전자파의 스펙트럼을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 침 선단에 코로나가 발생하여 고체절연체가 열화되기 시작하는 부분방전초기인 8~10[kV]는 50~80[MHz]대역에서 배경잡음보다 전계강도가 약 5~10[dB]정도 증가하였으며 이를 통해 부분방전 개시를 판단할 수 있었다.

2) 침 선단과 절연체 사이에 부분방전이 발생하여 발생 및 진전되기 시작하는 부분방전 중기로 판단되는 16~18[kV]는 50~80[MHz]대역에서 배경잡음보다 전계강도가 약 15[dB]증가, 150~170[MHz]대역에서 약 5[dB], 250~270[MHz]대역부근에서 약 2[dB] 증가한 스펙트럼이 검출된다

3) 부분방전이 휴지구간 없이 연속적으로 발생하여 급속히 진전하는 부분방전 말기로 판단되는 24~28[kV]는 50~80[MHz]대역에서 배경잡음보다 전계강도가 약 10~15[dB], 130~170[MHz]대역에서 약 5~10[dB], 230~350[MHz] 대역에서 약 5[dB]이상 증가한 스펙트럼이 검출된다.

4) XLPE 고체케이블 내에서 부분방전이 진전해 갈수록 250[MHz] 이상 대역에서 스펙트럼이 검출되기 시작하며, 이것은 부분방전 신호의 Rasing-time이

증가하기 때문이다.

5) 500[MHz] 이후 대역에서 부분방전 신호라고 판단되는 신호는 검출되지 않았으며 그 이유는 고주파수 대역의 부분방전 신호가 공기보다 유전율이 높은 고체절연체내를 통과하면서 감쇠되기 때문인 것으로 사료된다.

이상의 실험을 통해 인가전압 증가에 따라 공간으로 전파되어지는 방사전자파의 크기가 증가함을 확인하였으며, 이를 통해 방전진전을 가시적으로 표현 가능하며 방전진전 과정의 평가가 가능하게 되어 절연진단에 이용할 수 있는 좋은 자료로 판단된다.

References

- [1] S. Grzybowski, J.Fan. Mississippi State University, "Electrical Breakdown Characteristics of XLPE cables under AC, DC, and Pulsating Voltages", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.1, pp389~394, 1997.
- [2] H. Suzuki and T. Endoh, "Pattern Recognition of Partial Discharge in XLPE Cable Using a Neural Network" IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.1, pp543~547, 1992.
- [3] 이광식, 김기채, 이동인, "방사전자파에 의한 미소간극 방전원의 방전 전류 파형 추정", 한국전자파학회 논문지, Vol. 11, No. 1, 2002. 2월.
- [4] 박광서, 이광식 외 5인, "액체절소중 정극성 직류방전시 방사 전자파의 주파수 스펙트럼 특성", 대한전기학회 논문지 Vol. 48C, No.9, pp.648~655, 1999년 9월1일.
- [5] H.Okubo, et, "Electromagnetic Spectrum Radiated from Gas Discharge and its Relation to Partial-Discharge Characteristics" ETEP Vol.7, No.1. 1997.
- [6] Hikita, M, Hoshino, T, Kato, K, Hayakawa, N, Ueda, T, Okubo, H, "Discrimination of partial discharge electromagnetic signal in SF6 gas from external noise using phase gate control method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol.1, pp117~120, 1996.
- [7] 이상훈, "絶縁診断을 위한 氣中放電과 放射電磁波의 상호관계", 영남대학교, 1999. 2월.
- [8] 이상훈, 이광식 외 5인, "방사전자파 특성을 이용한 부분방전 검출의 기초연구", 대한전기학회 논문지 제49권 제7호 pp.412~417, 2000년 7월 30일.

◇ 저자소개 ◇

이현철 (李炫澈)

1976년 1월 15일생. 2002년 경남대 전기공학과 졸업. 2002년 영남대 대학원 입학(석사). 2004년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

박광서 (朴光緒)

1970년 3월 23일생. 1997년 영남대 전기전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 공학박사.

윤대희 (尹大熙)

1971년 3월 1일생. 1997년 영남대 전기전자공학부 졸업. 2001년 동 대학원 졸업(석사). 2004년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

이상훈 (李相勳)

1973년 1월 16일생. 1998년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자공학부 석사졸업. 2004년 2월 현재 동 대학원 전기공학과 공학박사.

김종환 (金鐘煥)

1959년 9월 1일생. 1985년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 산업대학원 전기전자공학부 석사졸업. 2004년 2월 현재 동 대학원 전기공학과 공학박사과정. 현 경북교육청 시설계장.

김충년 (金忠年)

1992년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 석사졸업. 2002년 동대학원 공학박사. 2004년 현재 (주)인터커넥션 개발부 책임연구원.

김기채 (金基采)

1959년 10월 19일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1986년 일본 Keio Univ. 대학원 전기공학과(석사) 동 대학원 공학박사 현재 영남대학교 전자정보공학부 부교수.

이광식 (李廣植)

1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 공학박사. 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 본 학회 편수위원장, 부회장 역임, 현재 감사. 영남대학교 산업대학원 원장역임.

