

Dry Air 중의 준평등전계에서 노점과 고체절연물 재질에 따른 수평연면방전 특성 연구

(A Study of Horizontal Surface Discharge Characteristics for Dew-Point of Dry-Air and
Materials of Solid Insulator in Quasi-Uniform Field)

강병철* · 석정후 · 민경준 · 배성우 · 이광식 · 박원주**

(Byoung-Chil Kang · Jeong-Hoo Seok · Gyeong-Jun Min · Sungwoo Bae ·
Kwang-Sik Lee · Won-Zoo Park)

Abstract

This study investigates the Horizontal surface discharge characteristics of solid insulators by varying their materials, and the dew-point of dry-air. The methodology of this study is that a quasi-uniform field is first applied to a test chamber. Then, the chamber is filled with dry-air as an insulation gas which pressure is varied from 1 to 6atm while applying an AC voltage to the chamber. The used solid insulators are teflon, polyethylene and polyurethane. As the dew-point is lower and the pressure of dry-air is higher, the flashover voltage of all solid insulators increases more. When each characteristic of the solid insulators is compared under the same gas pressure, the flashover voltage of teflon is the highest. Then, the flashover voltage of polyethylene is higher than that of polyurethane. Moreover, it is observed that the flashover voltage increases as the horizontal distance between the electrodes of each solid insulator become larger, respectively. However, as the pressure is increased, flashover voltage of the solid insulators is saturated. Therefore, selection of cost-effective insulation is needed in order to appropriate pressure.

Key Words : Dry Air, Flashover Voltage, Solid Insulator, Dew Point, Horizontal Surface Discharge

1. 서 론

최근 지구온난화로 인한 기상이변 및 천재지변 등으로 환경문제에 대한 관심이 전 세계적으로 집중되고 있다. 특히 고속성장한 산업화로 인한 대기오염이 지구온난화의 주범임이 밝혀짐에 따라 지구온난화계수가 높은 CO₂, N₂O, CH₄, PFC, HFC, SF₆ 가스는 1997년 일본 교토에서 개최된 UN 산하의 UNFCCC

* Main author : Doctor course of Electrical Engineering at Yeungnam University
** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University
Tel : 053-810-3926, Fax : 053-810-4767
E-mail : chiri@kepco.co.kr
Received : September 24, 2014
Accepted : November 3, 2014

3차 회의에서 환경파괴를 유발하는 가스로 규정하였다. 또 교토의정서를 채택하여 6가지의 온실가스 감축 결의안을 결정하였다[1]. 따라서 그 사용량의 감소가 불가피한 실정이다.

SF₆ 가스는 열적·화학적으로 안정적인 특성과 우수한 절연성 및 차단성 때문에 고전압에서 초고압 전력기기 내의 절연매체 또는 소호매체로써 널리 사용되어왔다[2]. 하지만 이와 같은 배경으로 인하여 전력설비에서 SF₆ 가스의 사용량을 줄이기 위해서는 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 절연매질을 개발하거나, SF₆ 가스의 회수량을 증가시키는 기술을 개발하는 것이 고려되어 지고 있다[3].

SF₆ 가스를 대체할 수 있는 절연매질로는 Dry-Air, N₂, CF₃I, N₂ : O₂ 혼합가스 등을 고려하고 있으며, 고체 및 진공을 매질로 사용하는 절연개폐장치에 대한 연구도 진행되고 있다[3-4].

특히 Dry-Air를 절연매질로 사용하는 친환경가스 절연개폐장치(Environment-Friendly Gas Insulated Switchgear, EGIS)가 국내·외적으로 크게 각광받고 있다[5]. 하지만 SF₆ 가스에 비하여 친환경절연매질에 관한 연구가 많이 부족한 것이 현실이다.

이러한 관점에서 본 논문은 Dry Air 노점에 따른 고체절연물 수평연면방전 특성과 Dry Air 내의 고체절연물 재질 및 전극거리에 따른 수평연면방전 특성을 구명하여 GIS내의 도체와 외함사이의 절연과 Spacer의 절연설계시 응용 가능한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

그림 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치도를 보여준다. 실험용 용기(Test chamber)는 가스의 방전특성을 연구하기 위하여 두께 20mm의 스테인리스 스틸로 제작하였으며, 내·외부 이중 구조로 구성하였다. 내부 용기는 내직경 260mm, 높이 460mm로서 체적은 약 25ℓ이며, 외부 용기의 경우에는 외직경 460mm, 높이 500mm이다. 열전달을 차단하기 위하

여 내·외부 사이에 진공 층 공간을 두었다. 또한 외부에서 내부를 관측할 수 있도록 외부 용기에는 석영유리 관측창(직경 110mm, 두께 20mm)을 설치하였다. 실험용 용기는 -90~100℃의 온도범위를 견딜 수 있으며, 10atm까지 가압할 수 있도록 설계·제작하였다.

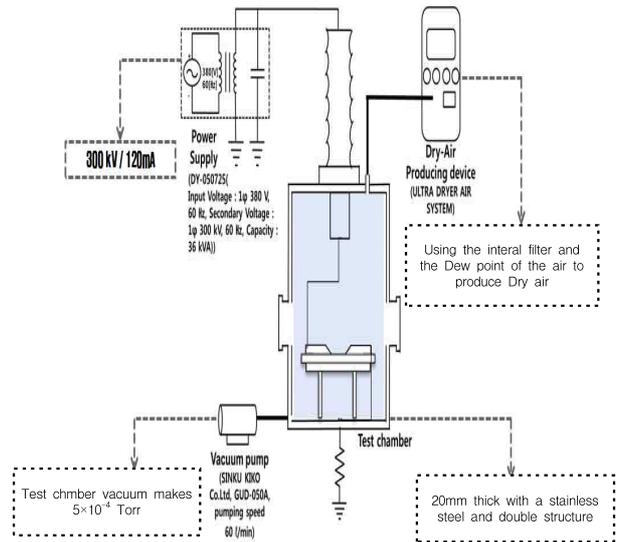


그림 1. 실험 장치도
Fig. 1. Experimental setup

Dry-Air는 Dry-Air제조장치(Dry-Air product device, ULTRA DRYER AIR SYSTEM)를 이용하여 제조하였으며, 이 제조장치는 세 단계의 필터를 가지고 있어 공기가 각 필터를 거치는 동안 불순물의 함량을 줄여 순수한 Dry-Air를 만들어준다.

진공펌프(Vacuum pump, SINKU KIKO Co. Ltd, GUD-050A, Pumping seed 60ℓ/min)는 Dry-Air를 실험용 용기에 주입하기 전 용기 내부를 5×10⁻⁴ Torr의 진공상태로 만들어준다. 그리고 내부 압력을 측정하기 위하여 압력계(WISE, 0~15atm)를 사용하였다.

전원장치(HV Transformer)는 AC용 DY-050725 (Input Voltage : 1φ 380V 60Hz, Secondary Voltage : 1φ 300kV 60Hz, Capacity : 36kVA)을 사용하였다.

전극(Electrode)은 스테인리스 스틸로 만든 나이프 전극(Knife, 직경 10mm)을 양측으로 사용하였다.

고체절연물(Solid insulator)은 두께(T) 1mm, 직경(Φ) 50mm인 Teflon, Polyethylene, Polyurethane를 각각 사용하였다.

2.2 실험 방법

Dry-Air 중의 준평등전계에서 고체절연물 재질 및 전극간격에 따른 수평연면방전 실험을 위해서 용기 내부의 전극배치는 나이프전극(좌측부)-나이프전극(우측부)으로 수평배치 하였다. 이러한 전극배치는 용기 내부에서 준평등전계를 구성할 수 있도록 한다. 전극은 산화알루미늄(Al_2O_3)으로 연마하여 전극의 불순물을 제거한 후 사용하였고, 고체절연물 위에 나이프 전극을 배치시킨 후 한쪽은 High Voltage를 인가하고, 반대쪽은 접지를 하였다.

Dry Air를 실험용 용기 내에 주입하기 전 진공펌프를 이용하여 용기 내부 및 주입튜브 내부를 5×10^{-4} Torr의 진공상태로 만들었다. 그리고 Dry Air제조장치를 통과하여 노점 $-35.4 \sim -63.0^\circ C$ 가 된 Dry Air를 1~6atm까지 용기 내에 주입하였다.

AC용 DY-050725 전원장치를 이용하여 전압을 인가하였다. 이때 전압상승속도는 $3.15kV/s$ 로 하였다. 그리고 고체절연물의 연면을 따라 수평연면방전이 일어날 때의 수평연면방전 전압(Flashover Voltage, V_S)을 측정하였다. V_S 는 5회 측정하여 그림에 평균값을 나타내었으며 최대 및 최소치를 표기하였다. 이때 측정방법은 리더방전에 의한 초기방전 전압을 이용하였다. 또한 다른 고체절연물을 적용할 경우에도 위와 동일한 방법과 절차로 실험을 수행하였다.

Dry Air 중의 준평등전계에서 노점변화에 따른 고체절연물 연면방전 실험에서는 노점 $-35.4, -51.0, -63.0^\circ C$ 인 Dry Air를 사용하였으며, 고체절연물은 지름(Φ) 50mm, 두께(T) 1mm인 Teflon을 사용하였다. 그 외에는 위에서 언급한 실험 방법과 절차로 동일하게 실험을 수행하였다. 단 고체절연물 재질에 따른 연면방전 특성 실험에서는 전극간거리만 고려하였으며, 다른 연면방전 조건은 고려하지 않았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Dry Air 노점에 따른 고체절연물의 수평연면방전 특성

그림 2는 Dry Air 중 압력에 따른 Dry Air 노점별 V_S 를 보여준다.

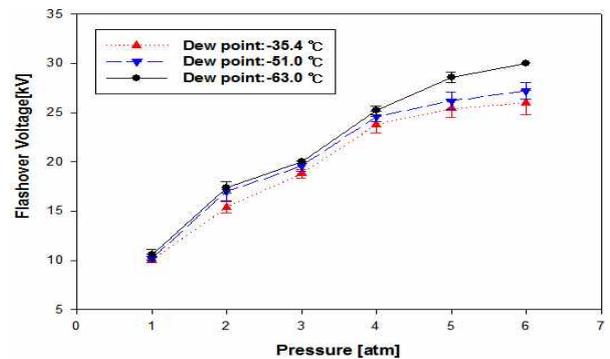


그림 2. Dry Air 노점에 따른 고체절연물의 수평연면방전 특성

Fig. 2. Horizontal surface discharge characteristics of solid insulator for dew-point of Dry-Air

먼저 V_S 는 Dry Air 압력상승과 함께 증가하고 있다. Dry Air 압력의 증가는 전극과 고체절연물을 에워싸는 Dry Air의 절연내력을 강화시킨다. 이로 인해 V_S 는 압력상승과 함께 증가한다.

다음으로 각각의 동일한 압력하에서 Dry Air의 노점이 낮아짐에 따라 V_S 가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 수평연면방전은 고체절연물 표면의 도전성이 높을수록 쉽게 진전한다. Dry Air의 노점이 낮아짐에 따라 Dry Air의 수분량은 $-35.4^\circ C$ (213.60ppm), $-51.0^\circ C$ (34.65ppm), $-63.0^\circ C$ (7.086ppm)으로 감소하게 된다[6]. 그 결과 Dry Air 수분량의 감소는 고체절연물 표면의 도전성을 감소시켜 V_S 를 증가시키는 것으로 생각한다.

그림 3은 전극간격을 5mm 기준으로 노점의 온도를 변화시켰을 때 V_S 특성을 보여준다. 현재 170kV 급 GIS에 주로 적용되고 있는 5atm 압력하에서, 노점의 값에 따라 수평연면절연과괴전압의 변화를 볼 수 있다.

Teflon(TE, $\epsilon=2.1$) 5atm의 동일조건하에서, 노점 -35.4°C 에서 25.4kV, 노점 -51.0°C 에서 26.2kV, 노점 -63.0°C 에서 28.6kV로 노점이 낮을수록, 고체절연물의 V_S 가 높은 것을 볼 수 있다. 따라서 고체절연물별 V_S 는 각 노점의 온도에 따라 영향을 받게 된다[6].

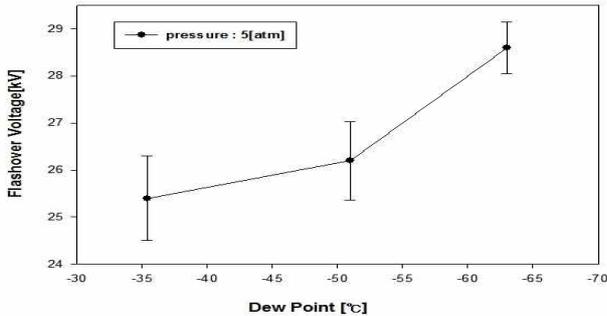


그림 3. Dry Air에서 노점 변화 시 V_S 특성
Fig. 3. V_S Characteristics when changing Dew-Point of Dry Air Gas

3.2 Dry Air 중의 고체절연물 재질에 따른 연면방전 특성

그림 4는 Dry Air 중 압력에 따른 고체절연물 재질에 따른 V_S 를 보여준다.

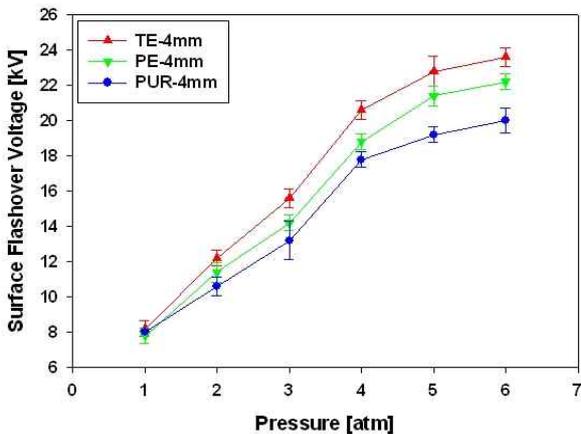


그림 4. Dry Air 중의 고체절연물 재질에 따른 연면방전 특성
Fig. 4. Horizontal surface discharge characteristics for materials of solid insulator in Dry-Air

먼저 3가지 고체절연물 중 어느 고체절연물에서도 V_S 는 실험용 용기 내의 압력이 상승함에 따라 증가한다. 이는 압력의 상승에 따라 고체절연물 연면에 접하는 Dry Air의 절연내력이 상승하게 되는 현상인 매질 효과가 발생하는 것으로 생각한다[7].

다음으로 각각의 동일한 압력하에서 고체절연물 재질에 따른 V_S 는 Teflon, Polyethylene, Polyurethane 순으로 높게 나타남을 확인할 수 있다.

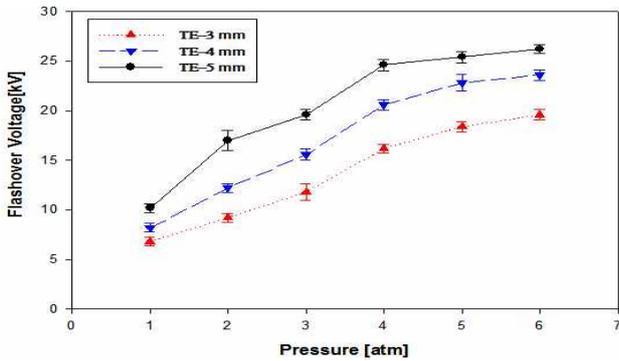
일반적으로 전극, 고체절연물, 주위매질이 접하는 삼중점은 연면방전 개시부분으로 알려져 있다. 이는 삼중점의 전계가 대단히 높기 때문이다. 이 전계는 주위매질의 유전율이 대부분 거의 1이기 때문에 고체절연물의 유전율에 의존한다. 고체절연물의 유전율이 클수록 삼중점 전계는 강하게 되고 수평연면방전이 쉽게 발생한다[7]. 본 실험에 사용한 고체절연물은 Teflon, Polyethylene, Polyurethane이고, 이들 유전율은 각각 2.1, 2.3, 5.4이다. 그러므로 삼중점 전계는 Teflon이 가장 낮고, Polyurethane이 가장 높게 된다. 그 결과 V_S 는 Teflon이 가장 높고, Polyurethane이 가장 낮게 나타났다[8].

이상에서와 같이 수평연면방전은 삼중점에서 고체절연물의 재질과 유전율로 억제할 수 있고, 그 유전율은 주위매질의 유전율에 가까울수록 수평연면방전이 억제된다고 해석할 수 있다. 결국 고체절연물의 유전율을 주위매질의 유전율에 가깝게 하는 것이 중요하다고 생각한다.

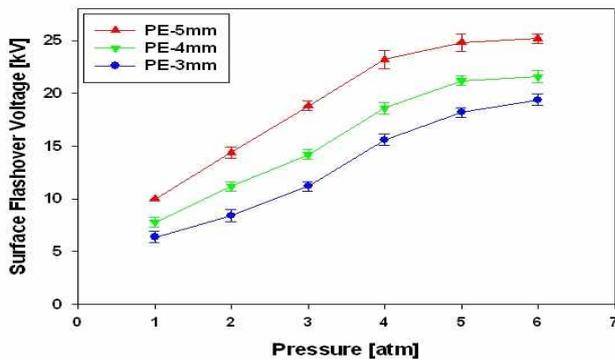
3.3 Dry Air 중의 고체절연물 전극간 거리에 따른 수평연면방전특성

그림 5는 Dry Air 중 압력에 따른 고체절연물(두께 $(T)=1\text{mm}$)의 전극간 거리(mm)변화에 대한 V_S 를 보여주고 있다.

그림 5 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이, 각각의 동일한 압력하에서 두 가지 고체절연물 모두 다 고체절연물의 전극간 거리가 커짐에 따라 V_S 가 상승함을 확인할 수 있다. 이는 전극간 거리가 길어짐에 따라 V_S 상승에 영향을 미치는 수평연면거리가 길어지기 때문이라고 생각한다.



(a) Teflon



(b) Polyethylene

그림 5. Dry Air 중의 고체절연물 직경변화에 따른 수평연면방전 특성

Fig. 5. Horizontal surface discharge characteristics for diameter change of solid insulator in Dry Air

그림 5의 (a)와 (b)를 비교해보면 각 압력하에서, 전극간격별 V_S 는 P의 증가에 따라 3mm에서는 1.25배 증가하였고, 4mm에서는 1.24배, 5mm에서는 1.21배 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 Paschen의 법칙에 의하여 간격길이의 증가에 따라 V_S 가 증가함을 알 수 있다.

전극간 거리의 증가는 삼중점에서 고전계로 인해 방출된 전자가 고체절연물 표면과 충돌하는 횟수가 전극간 거리가 작을 때보다 더 많이 늘어난다. 이것은 2차 전자방출(SEE)을 더 용이하게 한다[9]. 그리고 고체절연물의 표면이 길어짐에 따라 표면의 거칠기에 대한 영향을 더 많이 받는다. 표면 거칠기는 전계왜곡을 초래하는 지점이 늘어나는 것을 의미한다. 따라서 전극간 거리가 길어지게 되면 수평연면거리를 길게하

는 것은 V_S 를 증가시키지만 SEE와 표면거칠기로 인한 전계왜곡 때문에 V_S 의 상승률이 줄어드는 영향을 준다고 생각한다.

이와 같이 고체절연물의 전극간 거리에 따라 수평연면방전에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 고체절연물인 에폭시수지뿐만 아니라, 절연매체가 $N_2 : O_2$ 혼합가스, 액체질소에서도 나타남을 확인할 수 있다[7,10,11].

4. 결 론

본 논문에서는 SF_6 가스를 대체할 수 있는 친환경 절연매질로 주목받고 있는 Dry Air를 절연매질로 사용할 때의 고체절연물의 수평연면방전 특성을 연구하였다. 특히 준평등전계에서의 Dry Air 노점과 고체절연물의 재질 및 형상이 수평연면방전에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) Dry Air의 노점이 낮아짐에 따라 고체절연물의 수평연면방전 전압이 증가하였다.
- 2) 각 압력에서 고체절연물의 유전율이 낮을수록 수평연면방전 전압은 높았다. 그리고 수평연면방전 전압은 Teflon, Polyethylene, Polyurethane의 순서로 높게 나타났다.
- 3) 고체절연물 표면에 매질의 압력이 증대되면 매질 효과로 인해 수평연면방전 전압이 상승하였다.
- 4) 고체절연물의 전극간 거리가 길어질수록 수평연면방전 전압이 상승하였다.
- 5) 수평연면방전 전압을 향상시키려면 수평연면거리, 고체절연물의 재질, Dry Air의 노점, 전극의 재료 등을 고려하여야 할 것으로 생각한다.

이상의 연구결과는 Dry Air를 절연매체로 사용하는 전력설비 중 수평연면방전이 일어날 가능성이 있는 GIS 설비의 Spacer 표면의 절연설계시 유용한 기초자료가 될 것이며, 154kV급 개폐장치인 GIS 내부의 도체 및 외함 사이의 절연매체와 22.9kV급 Gas 차단기 및 개폐기의 절연매체로서 활용이 가능할 것으로 기대한다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2013년도 추계학술대회 및 2014년도 춘계학술대회에서 발표한 논문임.

References

- [1] Sun-Hee Park, "European Union and the Kyoto Protocol", ACEF Autumn Annual Conference 2008, pp. 125-144, 2008.
- [2] L.G. Christophorou, J.K. Olthoff and R.J. Van Brunt, "Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 5, pp. 20-24, September/October, 1997.
- [3] Toshiaki Rokunohe, Yoshitaka Yagihashi, Kenji Aoyagi, Takashi Oomori and Rumihiro endo, "Development of SF₆-free 72.5kV GIS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, July 2007.
- [4] TADAIRO YOSHIDA, HIROMI KOGA, TAKAKAZU HARADA, SHINCHI MIKI, MASAHIRO ARIOKA, SHINJI SATO, SATORU YOSHIDA, NAOAKI INOUE, AKHIKO MARUYAMA, and TOSHIE TAKEUCHI, "Insulation Technology in Dry-Air and Vacuum for a 72-kV Low-Pressure Dry-Air Insulated Switchgear", Electrical Engineering in Japan, Vol. 175, No. 1, 2011.
- [5] H.R. Park, J.H. Lee, E.H. Choi, S.G. Park, K.S. Park, K.S. Lee, "Surface discharge Characteristics for epoxy resin in Dry-Air with different electrode features", KIIE Autumn Annual Conference 2008, pp.253-255, October 2008.
- [6] G.J. Min, B.C. Kang, D.Y. Lim, K.S. Lee, W.Z. Park, "A Study of Surface discharge Characteristics for Dew-Point of Dry-Air and Materials of Shapes of Solid insulator in Quasi-Uniform Field", Journal of the KIIE, Vol.27, No.6, pp.44-49, June 2013.
- [7] Sang-Ho Lee, "Assess Breakdown Characteristics of Surface Discharge according to the Pressure Variation of Solid Dielectrics in Different Media", a thesis submitted for the degree of doctor of Electrical Engineering, Yeungnam University, June 2010.
- [8] TADASHI KAWAMOTO, TADASU TAKUMA, HISASHI GOSHIMA, HIROYUKI SHINKAI, "Triple-Junction Effect and Its Electric Field Relaxation in Three Dielectrics", Electrical Engineering in Japan, Vol. 167, No. 1, 2009.
- [9] H. Craig Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, October 1989.
- [10] H.R. Park, E.H. Choi, L.K. Kim, K.S. Lee, "Surface Discharge Characteristics for Epoxy Resin in Dry-Air with Variations of Electrode Features and Epoxy Resin Size", Journal of the KIIE, Vol.23, No.2, February 2009.
- [11] Y.S. Kim, B.S. Lee, S.M. Baek, J.M. Jung, S.Y. Chung, S.H. Kim, "Characteristics of Surface on Partially Immersed of Spacer in Liquid Nitrogen", Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 177-182, 2000.

◆ 저자소개 ◆



강병철(姜炳七)

1968년 3월 25일생. 1995년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 2011년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



석정후(石貞煦)

1990년 9월 12일생. 2014년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



민경준(閔景俊)

1986년 5월 3일생. 2012년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 2014년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).



배성우(裴晟佑)

1978년 6월 30일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2009년 미국 텍사스오스틴대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 조교수.



이광식(李廣植)

1948년 10월 25일생. 1971년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방진 고전압 연구회 간사장역임. 현재 본 학회 명예회장. 영남대학교 전기공학과 교수.



박원주(朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 3월 큐우슈 대학 대학원 졸업(박사). 1994년~현재 영남대학교 전기공학과 교수. 본 학회 편수위원장 역임. 현재 본 학회 감사.