

과도서지에 의한 견인전동기 고정자 코일의 상태진단 연구

朴懷濬*, 張東旭*, 金吉童*, 崔淙宣**, 金正洙**

A Study on the Condition Diagnosis for the Stator Coil of Traction Motor by Transient Surge

Hyun-June Park, Dong-Uk Jang, Gil-Dong Kim, Jong-Sun Choi, and Jung-Soo Kim

요 약

전동기 절연열화와 파괴는 전동기에 가해지는 스트레스에 영향을 받는다. 즉 절연물의 수명은 주어지는 스트레스의 심한 정도에 따라서 좌우된다. 전동차용 견인전동기에서도 과도서지에 의한 전기적인 열화를 검토하는 것은 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 인버터에서 발생하는 과도서지에 의한 고정자 코일의 절연특성을 고찰해 보았다. 전동기의 절연상태, 열화진전도, 열화발생 범위 등을 측정하는 유용한 비파괴시험 방법에는 여러 가지가 이용되고 있다. 누설전류, 유전손실($\tan\delta$), 정전용량, 성극지수(PI), 부분방전 등의 방법들을 통하여 고정자 코일의 절연상태를 분석하였다. 이러한 진단 방법들은 전동차의 견인전동기에 대한 열화상태와 수명예측에 유용한 방법이 될 것으로 여겨진다.

ABSTRACT

Aging and failure of motor insulation depend on the stresses imposed on it. The insulation life time depends on the severity of the stresses. The electrical aging by transient surge is very important to traction motor in EMU(electric multiple unit). This paper presents the insulation characteristics of stator coil by transient surge from inverter. There are several nondestructive tests available for checking the condition of motor insulation, the probable extent of aging, and the rate of which aging is taking place. So the insulation characteristics of stator coil were each analyzed by measurement of leakage current, dielectric loss($\tan\delta$), capacitance, polarization index(PI) and partial discharge. The method of diagnosis is able to analyze the aging condition and predict the life of the traction motor in EMU.

Key words : transient surge, stator coil, condition diagnosis, traction motor

1. 서 론

오늘날 철도 산업은 다른 교통수단에 비하여 대량 수송성, 정시성, 저공해성, 쾌적성의 장점을 가지고 있

다. 하지만 전동차의 고속화·고성능화에 따라 전동차용 견인전동기에 과도 서지, 국부과열로 인한 절연 안정성 문제가 대두되고 있다. 견인전동기는 체적에 비해 큰 토크를 발생시키고 넓은 범위의 속도제어가 가능하며 기계적 충격에 강한 장점을 가지고 있지만, 반복적인 동작에 의한 과부하나 급변하는 전압에 의한 절연파괴가 전동기 고장의 가장 큰 원인을 차지한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 사용하는 견인전동기에서의 과전압 서지에 의한 절연재료의 열화 및 이상상태에 미치는 영향분석과 이에 대한 진단연구가

* 정회원, 한국철도기술연구원 철도전기연구팀 연구원

E-mail : hjpark@krrri.re.kr

** 정회원, 홍익대 전기정보제어공학과 교수

접수일자 : 2003. 3.10

1차심사 : 2003. 3.31

2차심사 : 2003. 4.17

심사완료 : 2003. 4.24

필요하다^{[1]-[12]}.

본 연구에서는 VVVF 인버터로 구동되는 정격출력 200[kW]급 전동차용 견인전동기 C종(200 class)절연구성의 고정자 코일을 실제 생산조건과 동일하게 제작하였다. 그리고 견인전동기 권선의 절연상태에 영향을 주는 전기적 스트레스의 반복인가에 따른 전기적 특성 저하를 파악하기 위해 전동기 권선에 인버터 과전압 서지를 반복적으로 인가하는 상태 진단 실험을 진행하였다. 따라서 전동차용 견인전동기 수명평가를 위한 가속열화에 대한 체계적인 기준자료를 구축함으로써 안정성 확보와 신뢰성 증가를 도모하였다^{[13][14]}.

2. 시편 및 실험방법

2.1 시편

인버터 구동 견인전동기에는 스위칭 소자가 스위칭을 할 때 스위칭 서지를 발생하며, 이 서지전압은 케이ابل과 견인전동기의 임피던스 차이에 의해서 반사파 과전압이 증첩된다^{[11][12]}. 상승시간이 1 μ s이하로 빠른 경우 견인전동기 권선에 인가되는 과전압은 고정자 코일의 초입부에 집중되어 부분방전에 의한 절연열화를 유발할 수 있다. 이러한 부분방전은 고정자 코일의 내부 절연을 약화시켜 결국에는 절연파괴에 이르게 하는 원인이 되므로 서지전압에 대한 절연안정성을 평가하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

시편은 견인전동기에 사용되는 고정자 코일 시편을 사용하였으며, 절연구성은 표 1과 같은 절연구성을 가지고 있다. 폴리이미드(kapton) 및 실리콘 수지를 주체로 한 C종(200 $^{\circ}$ C) 절연구성과 진공함침(VPI)처리를 통하여 높은 열 안정성, 진동 및 오염조건에서의 내력을 강화하여 절연에 대한 신뢰성을 확보하였다. 그림 1은 시험에 사용된 견인전동기 고정자 코일과 내부 단면도 모형도이다.

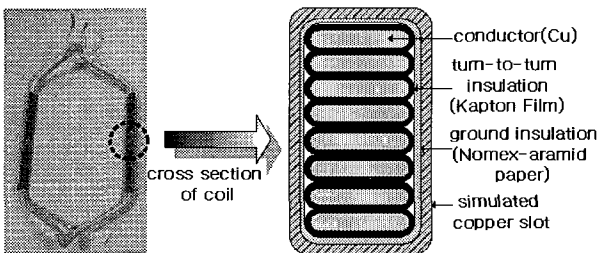


그림 1 견인전동기 고정자 코일과 단면도
Fig. 1 Stator form-wound coil and it's cross section

표 1 견인전동기 고정자 코일의 C종(200class) 절연구성
Table 1 200class Insulation composition of stator coils on traction motor

품 명	사양 및 규격	
200 class 절연자재	소선절연물	Kapton코팅처리
	대지절연물	Kapton Film Nomex-aramid paper
	주절연물	Silicone resin
	슬롯웬지	Epoxy-glass tape 적층판
	모의철심용 동판	두께: 1.5 mm
절연처리및고정자 코일 샘플제작	턴절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플코일 제작	동관슬롯구조의 모의철심 및 고정자 코일 샘플제작
VPI 함침처리	Silicone Resin 진공함침	함침 60 $^{\circ}$ C-3hr 건조 200 $^{\circ}$ C-16hr

2.2 실험방법

그림 2는 dc link 전압 Vdc=1,500 V를 인가하여 PWM 인버터로 구동되는 견인전동기 단자에서 측정된 선간전압 파형으로서, 피크전압 Vm=2,700 V이고 상승시간 tr=0.7 μ s정도의 전형적인 IGBT 구동시의 과도전압 특성을 나타내고 있다. 전기적 열화의 전압은 선간 피크전압을 상 피크전압으로 계산하면 Vpm=1,800 V가 되므로, 인가전압을 1.8 kV로 선정하였다.

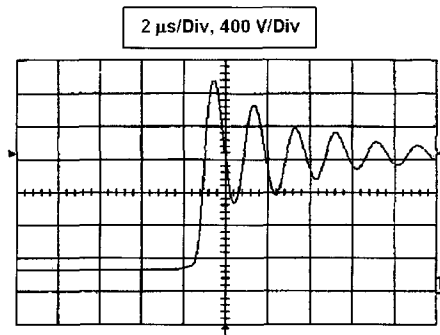


그림 2 PWM 구동 견인전동기의 단자간 과전압 (1,500Vdc 인가)
Fig. 2 Waveform of line to line voltage fed by PWM inverter (applied 1,500 Vdc)

전인전동기 고정자 코일에 직접 인버터 전압을 인가하기 위해 그림 3과 같은 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치를 구성하였다. 이 모의 장치는 가변전압조정기를 이용하여 입력전압을 조절할 수 있으며, 다이오드 삼상 정류기를 통하여 dc 전압출력하고, 이 출력이 IGBT 스위칭 소자를 이용한 단상 인버터 입력으로 사용된다. 인버터에서 출력된 구형파는 고주파 변압기에서 승압되며, 변압기의 승압비는 1:30으로 최대 3,000 V까지 전압인가 실험이 가능하다.

그림 4는 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치에서 측정된 전압을 나타내고 있다. 실험은 주파수 2 kHz, 전압 1.8 kVp-p를 20시간을 1주기로 설정하여 총 5주기 (100 시간) 동안 고정자 코일에 인가하였다. 그리고 각 주기마다 서지전압에 대한 고정자 코일의 절연특성 변화를 측정하였다.

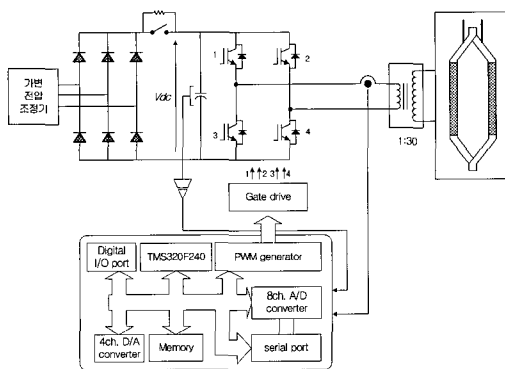


그림 3 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치
Fig. 3 Schematic of simulated VVVF inverter surge voltage generator

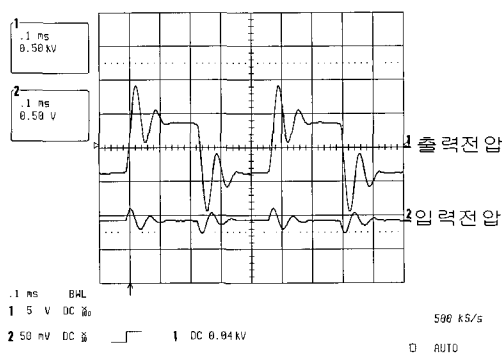


그림 4 모의 VVVF 인버터 서지 전압 파형
Fig. 4 Waveform of simulated VVVF inverter surge voltage

누설전류 및 전압인가 10분 후 전류값과 1분 후 전류값을 비교한 절연저항비인 성극지수를 측정하기 위해 Electrometer (Keithley model 6517A)와 Recorder를 이용하여 직류 1000 V를 코일 동선과 대지간에 12분간 인가하여 전류변화를 측정 및 기록하였다. 또한 고정자 코일의 결함에 의한 평가를 실시 할 수 있는 정전용량과 유전손실은 Tettex사 Capacitance & Dielectric loss 측정장치 (Type 2809)를 사용하여 각 주기마다 60 Hz의 정현파 전압을 400~1200 V 까지 200 V씩 상승시켜 측정하였다. 그림 5는 정전용량과 유전손실의 측정을 위한 장치 구성도 이다.

유전특성 측정 후 절연물중의 보이드 또는 절연물 표면에 발생하여 절연물 열화에 영향을 주는 부분방전 측정실험을 위해 Robinson사의 PD detector (model 803.1) 및 분석시스템 (CDA-3)을 이용하여 부분방전 개시전압과 소멸전압, 방전전하량 크기를 분석하였다. 그리고 실험 전 모든 고정자 코일에는 습기에 의해 나타날 수 있는 유전손실 증가와 절연내력의 저하에 의한 절연특성의 측정 오차 범위를 줄이기 위해 미리 오븐에서 습기제거를 위한 건조 작업이 수행하였으며, 측정온도는 25 °C로 일정하게 하여 측정하였다.

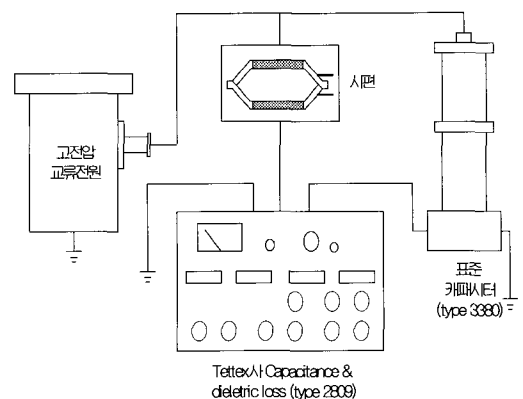


그림 5 정전용량 및 유전손실 측정설비 구성도
Fig. 5 Schematic of capacitance and tanδ instrument

3. 실험결과 및 분석

급준 과전압 서지에 의한 고정자 코일의 신뢰성 평가를 위한 실험 결과를 다음과 같이 얻을 수 있었다. 그림 6은 인버터 서지 전압인가 후 직류 1000 Vdc를 코일에 12분간 인가하여 시간에 따른 각 주기의 누설전류 변화 특성을 나타낸 것이다. 실험 전 누설전류치와 5주기 후의 누설전류 특성은 거의 일정하고 큰 변화가 없어 안정적인 절연 특성을 보인다.

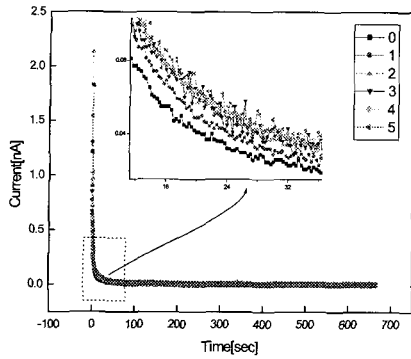


그림 6 시간에 따른 각 주기의 누설전류 특성
 Fig. 6 Characteristics of leakage current versus time on each cycle

그림 7은 인가전압 주기에 따른 성극지수 변화를 보이고 있으며, 열화 주기가 증가하면서도 성극지수가 안정적인 범위 내에서 크게 변화하지 않았다. 즉, 일반적으로 10분 후 전류값과 1분 후 전류값을 비교한 절연저항비가 2.0 이상이면 양호한 절연상태를 보여주는 데 5주기까지의 실험결과 값이 4.5~7 사이의 성극지수 값을 보여주고 있어 실험조건에서의 고정자 코일은 모의 인버터 전압에 대해 안정하다는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 측정전압 변화에 따라 각주기의 유전특성을 나타낸 것으로 인버터 서지 전압인가 후에 주기마다 정전용량과 유전손실 측정을 위해 각각 400, 600, 800, 1000, 1200 V를 인가하여 측정하였다. 그림 8(a), (b)에서 살펴보면 인가전압에 따라서 정전용량은 거의

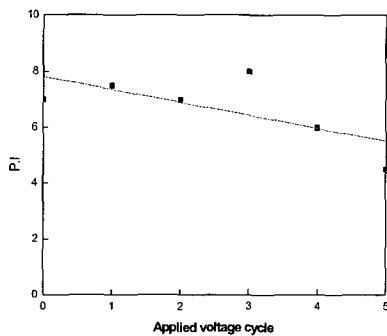
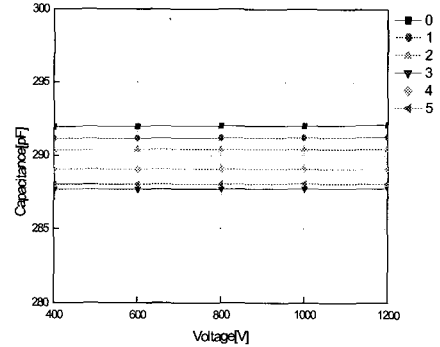
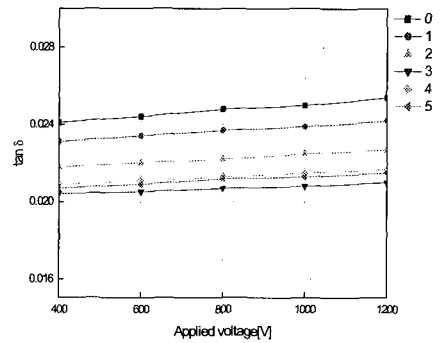


그림 7 인가전압 주기에 따른 성극지수 특성
 Fig. 7 Characteristics of P.I versus applied voltage cycle



(a) 측정전압에 따른 각 주기의 정전용량 특성
 (a) Characteristics of capacitance versus measuring voltage on each cycle

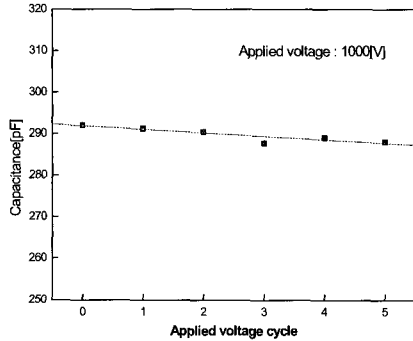


(b) 측정전압에 따른 각 주기의 tan δ 특성
 (b) Characteristics of tan δ versus measuring voltage on each cycle

그림 8 측정전압에 따른 각 주기의 유전특성
 Fig. 8 Characteristics of dielectric versus measuring voltage on each cycle

일정하게 나타났고, 유전손실은 전압에 대해서 증가를 하는 경향을 나타내었다. 유전손실이 증가하는 것은 전압이 증가함에 따라서 고정자 코일의 내부에서 부분 방전이 발생하여 나타난 결과로 볼 수 있다.

그림 9는 인가전압 주기가 증가함에 따른 유전특성을 나타낸 결과로 측정전압 1 kV 일 때의 유전손실과 정전용량 값을 나타낸 것이다. 실험 주기가 늘어갈수록 정전용량은 감소하고 유전손실은 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이러한 원인은 모의 인버터 서지전압의 가속열화에 의해서 절연물 내부에 보이드와 같은 결함이 발생하여 생긴 결과로 볼 수 있다.



(a) 인가전압 주기에 따른 정전용량 특성
 (a) Characteristics of capacitance versus applied voltage cycle

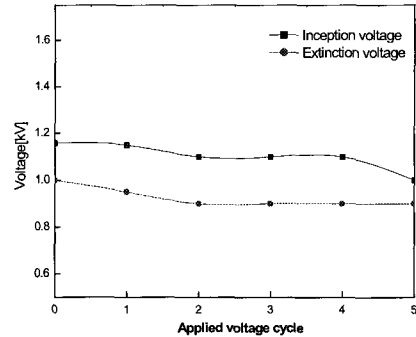
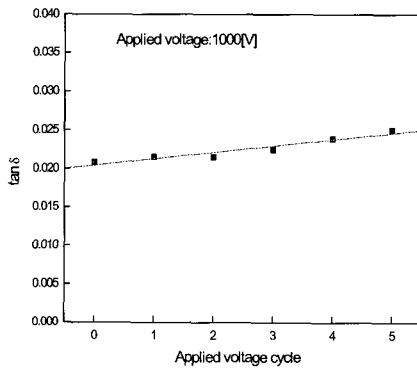


그림 10 인가전압 주기에 따른 부분방전 특성
 Fig. 10 Characteristics of partial discharge versus applied voltage cycle



(b) 인가전압 주기에 따른 tanδ 특성
 (b) Characteristics of tanδ versus applied voltage cycle

그림 9 인가전압 주기에 따른 유전특성
 Fig. 9 Characteristics of dielectric versus applied voltage cycle

보이드의 경우는 유전율이 낮기 때문에 정전용량이 감소하고, 유전손실의 경우는 부분방전 개시전압인 1 kV에서 측정을 하였기 때문에 보이드에서의 부분방전에 의해서 증가하게 된다.

그림 10은 주기에 따른 부분방전 특성을 보이고 있으며 실험주기가 증가할수록 개시전압은 감소하고, 그에 따라 소멸전압도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 계속적인 전압인가로 절연물의 열적, 기계적 변형 등에 의한 전계의 불평등 심화 및 보이드 내에서의 부분방전에 의한 절연열화 등에 의하여 절연성능이 약화되기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 진동차용 견인전동기에서 과도서지에 의한 절연열화 진전을 검토하기 위하여 누설전류, 유전손실 ($\tan\delta$), 정전용량, 성극지수, 부분방전 등의 방법을 사용하여 측정하였다. 과도서지에 의한 절연열화를 검토하기 위해서 모의서지전압 발생장치를 구성하였으며, 견인전동기에 사용되는 고정자 코일을 실제 생산조건과 동일하게 제작하여 시험을 실시하였다. 고정자 코일에 대한 서지전압 열화시험결과를 볼 때, 누설전류 특성은 거의 일정하고 큰 변화가 없어 안정적인 절연특성을 보였으며, 성극지수도 양호한 절연상태의 범위내에서 크게 변화하지 않았다. 유전손실과 정전용량의 경우, 실험진행에 따라서 정전용량은 감소하며, 유전손실은 증가하는 경향을 보여 주고 있으나 변화량이 적으므로 절연상태에 큰 변화가 일어나지 않았다고 볼 수 있으며, 부분방전도 서지시험결과 방전개시 전압이 감소를 하고 있으나 큰 변화는 없었다. 본 연구에서 수행한 실험은 실험실 모델로써, 견인전동기 수명평가를 위한 가속열화 중에서 서지전압에 의한 체계적인 기준근거 구축을 위한 연구로써 의미가 있다고 할 수 있으며, 향후 여러 가지 변화를 비교해 보는 연구와 완제품 상태에서의 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] I.M Culbert, H. Dhirani, and G.C. Stone, Handbook to

assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 2-1~2-5, 1989.

[2] R. Min, J.P. Nherney, R. Backam, and R. Rutherford, "Analysis of In-Service Aged Stator Bars", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 10, No. 4, pp. 645~652, 1995.

[3] 日本電氣學會, 전기학회기술보고 제739호 - 인버터 사ージ의絶緣시스템의影響, pp. 21~63, 1999.

[4] C. Petrarca, L. Egiziano, V. Tucci, and M. Vtelli, "Investigation on Performances of Insulation Materials for Inverter-FED Traction Motors", Proceedings of the 1998 Annual Report CEIDP-Vol. 2, pp. 564~567, 1998.

[5] 한국전기안전공사, 전기적 검출에 의한 고압 유도 전동기 무정전 진단기법 연구, pp. 137~190, 2001.

[6] 한국철도기술연구원, 전동차 전기추진장치의 고장예방 및 유지관리 자동화시스템 기술개발, pp. 163~200, 2000.

[7] J.E. Timperley and J.R. Michalec, "Estimating the Remaining Service Life of Asphalt-Mica Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, pp. 686~692, Dec. 1994.

[8] 한국철도기술연구원, 차량진단 자동화시스템 분야, pp. 97~115, 2001.

[9] R. Goffeaux, M. Krecke, B. Comte, M. Cottet, and B. Fruth, "Dielectric Test Methods for Rotating Machine Stator Insulation Inspection", Proceedings of the 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - Vol. 2, pp. 528~533, 1998.

[10] K. Bauer et al., "High Voltage Motor Insulation for High Power Adjustable Speed Drives Fed by IGBT-Converter", The 8th BEAMA International Electrical Insulation Conference, pp. 257~263, 1998.

[11] 이은웅, 김종겸, "급준파개폐찌지가 유도전동기의 고정자 권선에 미치는 전기적 스트레스 해석", 대한전기학회 논문지 44권 8호, pp. 994~1000, 1995.

[12] 김이훈, 박규현, 원충연, 김영석, 최세완, "PWM 인버터 시스템에서의 전도노이즈 저감을 위한 출력필터 설계에 관한 연구", 전력전자학회 논문지 Vol. 6, No. 6, pp. 546~555, 2001.

[13] IEC 60034-18-31, "Test procedures for form-wound winding - Thermal evaluation and classification of insulation systems used in machines"

[14] IEEE Std. 522-1992, "Guide for testing turn-to-turn insulation on form-wound stator coils for AC rotating machines"

저 자 소 개



박현준(朴煥濬)

1957년 6월 24일생. 1981년 홍익대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년~1991년 삼성전기(주) 연구소. 1992년~1996년 현대중공업(주) 중앙연구소 책임연구원. 1997년~현재 한국철도기술연구원 철도전기연구팀 팀장/책임연구원.



장동욱(張東旭)

1976년 1월 11일생. 1998년 충북대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 8월~현재 한국철도기술연구원 철도전기연구팀 주임연구원.



김길동(金吉童)

1964년 9월 20일생. 1986년 명지대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년~1994년 (주)우진산전 기술연구소 선임연구원. 1995년~현재 한국철도기술연구원 표준화연구팀장/선임연구원.



최종선(崔淙宣)

1957년 8월 14일생. 1983년 서울대 금속공학과 졸업. 1985년 4월 Ohio State Univ. 전기공학과 졸업. 1987년 Univ. of California 대학원 전기공학과 졸업(석사). Purdue Univ. 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1994년 9월~현재 홍익대 전기정보제어공학과 부교수.



김정수(金正洙)

1936년 3월 28일생. 1960년 연세대 전기공학과 졸업. 1974년 홍익대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학졸업(박사). 현재 홍익대 전기정보제어공학과 명예교수.