

전력계통 고장복구 교육 시스템에 관한 연구

論文
54A-7-1

A Study on the Power System Restoration Simulator

李興載[†] · 朴誠民^{*} · 李坰燮^{*} · 李琮堪^{**} · 閔湘元^{***} · 韓中教^{***} · 朴鍾根[§] · 文永鉉^{§§}
(H.J. Lee · S.M. Park · K.S. Lee · J.G. Lee · S.W. Min · C.K. Han · J.K. Park · Y.H. Moon)

Abstract – This paper presents an operator training simulator for power system restoration against massive black-out. The system is designed especially focused on the generality and convenient setting up for initial condition of simulation. The former is accomplished by using power flow calculation methodology, and PSS/E data is used to define the initial situation. The proposed simulator consists of three major components – the power flow(PF) module, data conversion(CONV) module and GUI subsystem. PF module calculates power flow, and then checks overvoltage of buses and overflow of lines. CONV module composes an Y-Bus array and a data base at each restoration action. The initial Y-Bus array is constructed from PSS/E data. The user friendly GUI subsystem is developed including graphic editor and built-in operation manual. As a result, the maximum processing time for one step operation is 15 seconds, which is adequate for training purpose. Comparison with PSS/E simulation proves the accuracy and reliability of the training system.

Key Words : Operator Training, Simulator, Black Out

1. 서 론

전력계통에서 사고 발생시 복구조작은 계통운용자의 전문적인 지식이나 경험적 판단에 의하여 수행되어 왔으며, 이 때 운용자가 사고 상황을 잘못 판단하거나 잘못된 조작을 수행하게 되면 전력공급에 막대한 지장은 물론 설비의 손상까지도 야기될 수 있다. 따라서 사고에 대처하기 위한 신속한 판단과 복구는 매우 중요한 문제이다. 계통의 구조적인 측면에서 볼 때, 선진국의 경우 우리나라보다 상대적으로 취약하므로 광역정전의 사례가 많이 발생하였으며, 특히 스웨덴 같이 취약한 루프구조를 가진 나라에서는 상당히 빈번한 사고가 발생하였다[1]. 이러한 선진국의 계통 운용자들은 광역정전 및 전정전에 대한 경험이 풍부하나, 국내에서는 이러한 정전의 사례가 없었으므로, 운용자의 경험이 전무한 상태라 할 수 있고, 비상시 대처 능력을 발휘할 기회는 점점 감소하고 있다.

따라서 운용자들에게 광역정전 및 전정전 상황에 대한 효과적인 계통 복구훈련 기회를 제공하고, 실제 정전상황 발생 시 이들이 신속하고 정확한 복구를 수행할 수 있도록 지원함

으로써 위기대처 능력 향상을 모색하기 위한 전력계통 복구 교육시스템이 필요하다[2-6]. 이러한 교육을 위한 시스템에 공인된 상업용 계통해석 패키지를 사용할 경우 피교육자가 시스템을 통해 임의로 제어하는 것은 불가능하다.

본 논문에서는 전력계통 분야에서 통상적으로 널리 수행되고 있는 사례 기반의 시스템을 구축하는 것을 지향하고, 임의의 초기 조건으로부터 운용자의 임의 제어에 의하여 적절한 시간 내에 복구의 각 단계를 진행할 수 있는 교육 시스템을 개발하였다. 또한 복구 단계에서 과부하 또는 과전압이 발생할 경우 그 이전 상태로 복귀하여 새로운 복구 조작을 시도하는 형식의 시스템을 개발하였다.

2. 고장 복구 시스템

일반적인 고장복구 시스템에서 필요로하는 계통의 초기 조건 설정에 관련된 데이터의 양은 매우 방대하다. 시뮬레이터에 있어 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 입력되는 데이터의 정확성이 전제가 되어야 하므로, 본 시뮬레이터에서는 우리나라 계통 해석에서 널리 사용되고 있는 PSS/E raw 데이터를 시스템의 초기 입력 데이터로 하였다.

본 교육 시스템은 크게 전력조류를 계산하고 과부하 및 과전압을 체크하는 PF 모듈, PSS/E raw 데이터를 읽어 Y 버스의 구성 및 자체 DB를 작성하고 운용하는 CONV 모듈, 그리고 사용자로 하여금 편리하게 모의를 가능도록 그래픽 환경을 제공하는 GUI 모듈로 구성되며, 각 모듈의 구성은 그림 1과 같다. 계통 설비의 신설 등에 의해 계통 구조가 변경될 경우, 이러한 계통 정보를 포함한 PSS/E 데이터를 통해 용이하게 DB 및 GUI 화면을 수정할 수 있다. 시스템의

† 교신저자, 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : hjlee@kw.ac.kr

* 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 博士課程

*** 正會員 : 서울대 工大 電氣工學部 博士課程

§ 正會員 : 서울대 工大 電氣工學部 教授 · 工博

§§ 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 11月 30日

最終完了 : 2005年 6月 17日

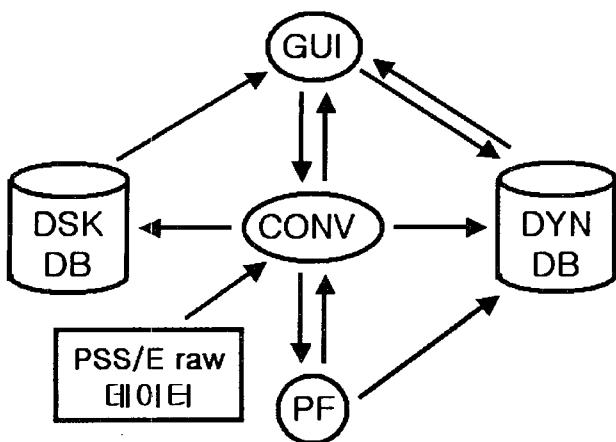


그림 1 고장복구 시스템의 각 모듈 구성

Fig. 1 Modules of the power system restoration simulator

데이터베이스는 그림 1에서와 같이 크게 파일 형태로 관리되는 DSK DB와 빠른 접근 및 캐싱을 위해 메모리에 올려 관리되는 DYN DB로 구성된다.

교육 시스템의 기능 중 특징적인 세 가지는 다음과 같다. 첫째, 프로그램 초기 실행시 KMView라는 윈도우에 국내 345kV, 765kV 계통을 나타낸 메인 계통도가 뜨는데, 여기에 화면 전환 기능 및 아이콘을 통해 각 시송전 계통도로의 전환도 가능하며, 계통의 그래픽 정보를 나타내는 kmd 파일들은 같은 DB를 공유하므로, 메인 계통도 및 시송전 계통도는 서로 연동된다. 둘째, 계통을 복구하는 과정에서 전력조류를 계산하면, 발전기에서 무효전력 공급 한계를 초과할 수 있고, 선로와 버스에서 과부하 및 과전압이 발생할 수도 있다. 이런 경우 시각적인 경보 기능 및 팝업 윈도우를 통해 사용자에게 주의를 줄 수 있다. 마지막으로 복구된 계통의 연계 모의이다. 계통을 복구하는 방식은 중앙집중형의 하향식과 분산형의 상향식이 있다. 중앙집중형 방식은 복구 시간이 많이 소요되어 정전시간과 경제적 손실이 비례하는 이러한 상황에서는 적합하지 않은 방식이므로, 일반적으로 분산형 방식을 취한다. 이 방식은 여러 개의 분할 계통을 각각 복구한 후, 각각의 계통들을 연계하는 방식이며, 세계 여러 계통의 복구 방식 또한 대동소이하다[7-9]. 표 1에 복구 방식별 장단점을

나타내었다. 본 시스템에서도 분산형 방식에 맞춰 복구된 각각의 계통을 *.cas 파일로 저장한 후, 연계될 계통 파일을 동시에 불러서 연계 모의를 수행할 수 있다.

2.1 PF 모듈

고장복구 시스템에서는 경제 급전계획이 아닌 전정전 또는 광역정전시의 복구과정을 교육하는 것이 목적으로 복구과정에서 운전자가 조작한 제어입력에 대해 전력조류계산을 수행하고, 계산 결과를 그래픽 화면에 표현된 각 모선에서 유효/무효전력 및 전압과 선로의 과부하 등을 표시함으로써 전정전 또는 광역정전시 복구과정에 대한 운전자의 교육 효과를 높일 수 있다.

조류 계산에 이용하는 수치 해석 방법 중 가우스 법은 뉴튼법에 비하여 초기값에 강민하지만 수렴 속도가 비교적 느리다. 이에 반하여 뉴튼법은 수렴속도는 빠른 반면에 초기값이나 기타 계통 상황에 따라 비교적 쉽게 발산한다. 그러므로 계통 상황이 안 좋은 복구 특성상 발산이 일어나기 쉬울 것으로 예상되어 가우스 법과 뉴튼법을 혼합하여 사용한다. 초기값에 민감한 수렴특성을 보이는 뉴튼법의 반복 계산이 이루어지기 이전 단계에서 초기값 추정을 위하여 가우스법을 이용하여 대충의 초기값을 잡아준다. 그 결과, 뉴튼법 단독으로는 수렴하기 힘든 R-X Ratio가 비교적 큰 계통의 경우에도 좋은 결과를 보여 주었다. 이와 같이 PF 모듈은 CONV에서 구성한 Y버스를 기반으로 전력 조류 계산을 수행하고, 계산 결과 값을 공유 DB에 저장하여 그림 2와 같이 GUI 모듈에서 각 모선의 유효/무효전력 및 과전압과 선로의 과부하 등을 표시할 수 있다.

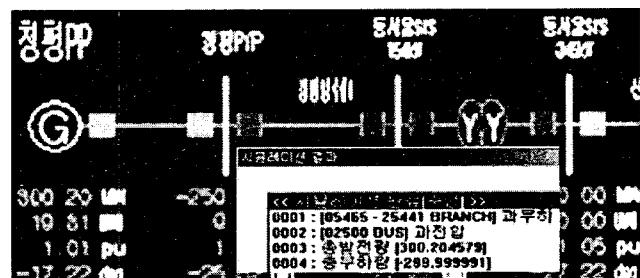


그림 2 과전압/과부하 발생 모의 결과

Fig. 2 Simulation results(overvoltage/overflow)

표 1 시뮬레이션 결과 비교

Table 1 Simulation results comparison

구분 특징	분산형 (모든 차단기 개방)	중앙집중형 (필요 차단기 개방)
방법	· 정전된 지역내 변전소의 모든 차단기 개방	· 복구 과정에서 필요한 차단기만 개방
장점	· 복구에 필요한 차단기만 투입함으로서 계통을 단순하고 안전하게 복구 · 불필요한 부하 투입이나 회로 가압에 의해 발생할 수 있는 계통 붕괴 및 전압 변동이 거의 발생하지 않음 · 복구 시간이 짧아질 수 있음	· 초기의 절체 및 복구에 포함되지 않은 차단기는 투입된 상태로 유지되므로 더 적은 저장 에너지 필요
단점	· 많은 차단기 동작에 필요한 많은 에너지의 저장이 요구됨	· 운영자는 복구된 계통과 가압되지 않은 계통의 분리 상태를 계속 파악하고 있어야 함
대상	· 이탈리아, 그리스, 이스라엘, 미국	없음

2.2 CONV 모듈

CONV 모듈은 PSS/E raw 데이터를 읽어서 자체 DB화한 후, GUI 모듈과 PF 모듈에 데이터를 주고받는 모듈로써, PSS/E raw 데이터의 구성 요소들을 특성에 따라 2가지로 분리해서 필요한 데이터만 추출한다.

전력 조류 계산에 필요하거나, 그 결과로 나오는 데이터들은 수시로 접근되어 계속 변할 수 있어야 한다. 해당 모선의 유효전력, 무효전력, 모선 전압, 위상각, On/Off 상태, 타입(부하, 발전기, 슬랙), 선로의 On/Off 상태, Y버스의 구성 요소 등이 이에 해당되며 빠른 접근을 위해 메모리(DYN DB)에 저장한다. PSS/E raw 데이터 중 이들을 제외한 나머지 데이터는 계통 구성에 관계된 데이터로서 디스크(DSK DB)에 저장된다. CONV 모듈은 현재의 공유메모리(BUS, LINE Dynamic DB)를 참조하여, Y버스 데이터(공유메모리)를 생성한 후 시뮬레이션 시작 명령을 PF 프로세스에 전달한다.

2.3 GUI 모듈

GUI 모듈은 운용자의 사용편의를 최대한 고려하기 위해 그래픽 파일(*.kmd)을 손쉽게 수정할 수 있는 편집기를 내장하고 있다. 또한, 선로 스위칭 상태 및 모선 데이터 변경 등과 같은 사용자의 임의 제어 입력을 받으면 PF 모듈과 CONV 모듈로 신호를 전달하여, 시뮬레이션이 수행되고 그 결과를 공유메모리로부터 읽어 들여 GUI 화면에 모선, 변압기, 선로의 On/Off 상태를 표시한다.

각 설비의 정보를 표시하기 위하여 TAG값에 대한 DB를 구축하였으며, TAG DB는 PSS/E raw 데이터를 기반으로 작성되고 아날로그와 디지털 입력 DB로 구분한다. 아날로그 입력 DB는 전력조류 계산 결과(모선의 유효전력, 무효전력, 전압, 위상각, 과전압, 발전기의 무효전력한계 초과)와 사용자가 임의로 지정할 수 있는 모선 정보 및 변압기의 템 값과 케이스를 처리하기 위한 것이며, 디지털 입력 DB는 선로와 변압기의 On/Off 상태를 표현하기 위한 것이다.

GUI 모듈은 사용자 훈련환경에 적합하도록 각 계통의 구성 요소를 조작(선로 상태의 On/Off, 부하 및 발전력 조절)한 후, PF의 조류 계산 결과를 이용하여 과전압, 과부하 여부를 계통도에 표시할 수 있다. 또한 복구를 수행하다가 과부하 및 과전압 문제 등이 발생했을 경우 새로운 경로 모색을 하기 위해서 바로 전 스텝으로 돌아갈 수 있는 Undo 기능을 갖고 있으며, 그밖에도 복구 수행의 자동/수동 여부를 결정하는 Run Mode 기능, 계산 과정과 종료를 나타내 주는 동작 표시기능 등이 있다.

그림 3은 전체 PSS/E raw 데이터를 기반으로 하여 구현된 시뮬레이터의 초기 화면이다. 공간의 한계 때문에 한 화면에 국내 모든 송전계통을 표현할 수 없으므로, 초기화면은 345/765kV 계통과 154kV 계통 중 시송전 계통에 포함된 서비스만을 나타내었다. 그러나, 내장된 그래픽 편집기를 사용하여 154kV 선로를 포함한 전력처 단위의 계통을 작성할 수 있으며, 새로 작성된 계통도 또한 PF 모듈과 연동한다. 표 2는 시뮬레이터의 주요 기능을 나타낸다.

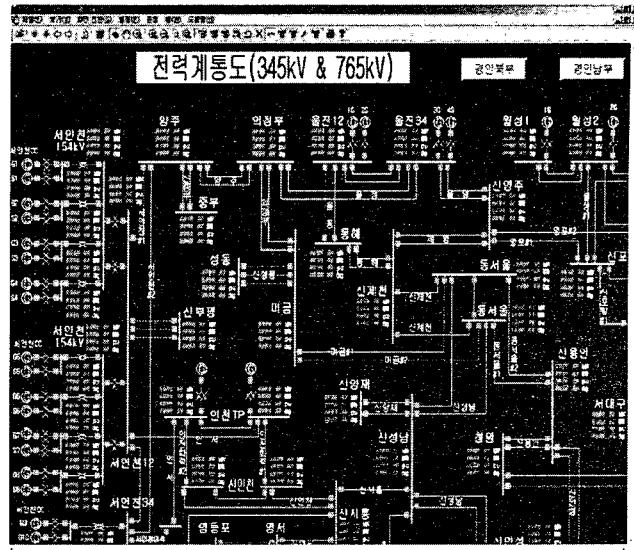


그림 3 고장복구 시스템 초기화면

Fig. 3 Initial state of the simulator

표 2 고장복구 시스템의 기능

Table 2 Functions of the simulator

아이콘	기능 설명
	계통 그래픽 파일(*.kmd)이 저장되어 있는 디렉토리에서 파일을 읽음
	kmd 파일로 작성되어 있는 메인 계통도 및 시송전 계통도 화면을 전환
	전력조류 계산을 수행
	PSS/E raw 파일을 읽어서 자체 DB 형태로 변경
	*.saf 파일을 읽음(자체 DB 형태)
	계통 연계를 위한 *.cas 파일을 읽음
	계통 데이터(*.saf)를 저장
	임시 데이터(*.cas)를 저장(연계 용)
	복구를 수행하다가, 과부하 또는 과전압 발생시 새로운 경로 모색을 위해서 바로 전 스텝으로 복귀
	모든 선로를 차단(전정전 모의용)
	선로의 CB 투입시 수동 또는 자동으로 전력조류 계산을 수행
	전력조류 계산 후 현재 복구되어 있는 계통의 정보 디스플레이
	버스의 과전압 판단 기준을 설정

3. 사례연구

본 교육 시스템에 내장된 알고리즘의 정밀도는 IEEE 39 모선 계통에 대하여 PSS/E의 결과와 비교함으로서 검증하였다[10]. 사례연구에서는 국내 계통의 전정전을 전제로 하여, 시송전 계통을 기반으로 영남지역과 중부지역을 각각 복

구한 후에 두 지역을 연계하는 임의의 복구 과정을 모의하였으며, 복구 시나리오를 표 3에 나타내었다. 그림 4는 영남 지역의 시송전 계통이 복구된 상태이며, 적색이 가압된 상태이고, 녹색이 무압 상태이다. 그림 5는 영남지역과 중부지역의 일부 계통이 복구된 후 연계된 상태이다.

4. 결 론

본 논문에서는 사고 상황에 대한 신속하고 정확한 복구과정의 모의를 위한 교육 시스템을 개발하였으며, PSS/E와 같은 상용 프로그램에서는 예정된 시나리오에 의한 모의만을 수행함으로 인해 사용자의 임의 제어가 불가능하였으나, 개발된 교육 시스템은 임의의 제어 및 실시간 모의가 가능하도록 함으로써 운용자로 하여금 사고에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 능력을 배양할 수 있다. 또한 GUI 기능에 의해 사용이 편리하도록 개발하였으며, 내장된 그래픽 편집기를 사용하여 계통 변경시 GUI 및 DB를 용이하게 수정할 수 있도록 하였으므로, 현 시스템에 포함 되지 않은 154kV 계통이 추가될 경우 운용자의 훈련효과를 향상시킬 수 있을 것이다. 본 시스템은 운용자의 훈련뿐만 아니라 실제 정전 사고의 발생시 운용자의 의사결정 지원용으로도 활용될 수 있을 것으로 보인다.

표 3 복구 시나리오

Table 3 Restorative scenario

대상계통	복구 시나리오
영남 (시송전)	삼랑진PP#1의 V=0.95, 상태=ON, 타입=slack 삼랑진P/P~울산C/C 가압
영남 지역	북부산~신울산~울주~신경산 가압 신경산~고령 가압(울주, 신경산, 고령 과전압 발생) 을 클릭하여 과전압 발생 전 상태로 돌아감 신울산 버스에 100[MW], 지상 50[MVAR] 투입 신경산~고령~서대구 가압
	무주PP#1의 V=1, 상태=ON, 타입=slack으로 설정 무주P/P~보령 가압(모든 버스에서 과전압 발생)
	무주PP#1의 V=0.9로 낮춤
	신옥천~청원~신용인 가압(과전압 발생) 을 클릭하여 과전압 발생 전 상태로 돌아감 신옥천 버스에 50[MW], 지상 40[MVAR] 투입 청원~신용인 가압
	보령GT#2의 V=1, 상태=ON으로 설정 청양 버스에 100[MW], 지상 70[MVAR] 투입 신용인~신안성~신성남 가압(과전압 발생) 을 클릭하여 과전압 발생 전 상태로 돌아감 신용인 버스에 100[MW], 지상 70[MVAR] 투입 무주P/P#1의 P=200으로 설정 신안성~신성남~화성 가압 보령GT#1,2의 V=0.9, GT#2의 P=50[MW] 화성~서서울 가압 서서울 버스에 50[MW], 지상 30[MVAR] 투입 서서울~청양 가압
중부 지역	복구된 각 지역의 계통 파일(*.cas)을 읽음 두 지역의 연계 선로인 무주P/P~서대구 가압

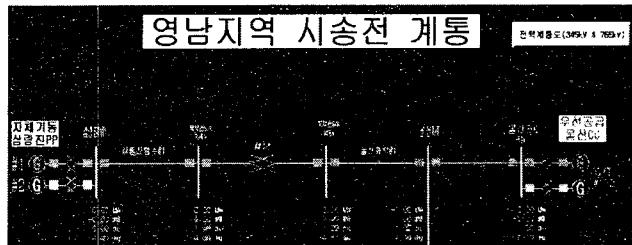


그림 4 영남지역의 시송전 계통

Fig. 4 Primary restorative system of Young-Nam

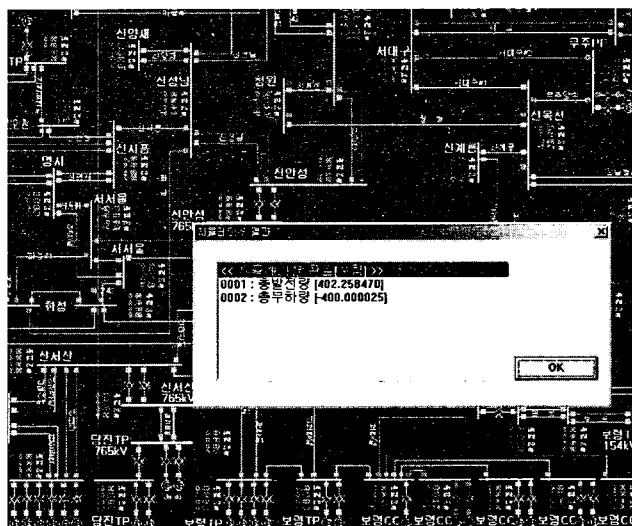


그림 5 영남지역과 중부지역의 연계

Fig. 5 Linking of Young-Nam and Joong-Boo

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-483) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] R. Kearsley, "Restoration in Sweden and Experience Gained from the Blackout of 1983", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 2, No. 2, pp. 422-428, May 1987.
- [2] J. A. Huang et al., "Power System Restoration Incorporating Interactive Graphics and Optimization", IEEE Proc. on PICA Conference, May 1991.
- [3] R. F. Chu et al., "The Uses of an Operator Training Simulator for System Restoration", IEEE Proc. of the PICA Conference, pp. 171-177, May 1991.
- [4] M. E. Cooper et al., "Bulk Power System Restoration Training Techniques", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 8, No. 1, pp. 191-197, Feb. 1993.

- [5] G. Miller et al., "Experiences Using the Dispatcher Training Simulator as a Training Tool", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 8, No.3, pp.1126-1132, August 1993.
- [6] J. M. Bucciero et al., "Dispatcher Training Simulators Lessons Learned", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 6, No. 2, pp. 594-601, May 1991.
- [7] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration - A Task Force Report", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 2, No. 2, pp. 271-277, May 1987.
- [8] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration Issues", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19-24, April 1991.
- [9] M. M. Adibi et al., "Special Consideration in Power System Restoration The Second Working Group Report", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 9, No. 1, pp. 15-21, February 1994.
- [10] 이홍재 외, "전력계통 고장복구 교육시스템에 관한 연구", 2003년도 대한전기학회 학계학술대회 논문집 A권, pp. 181-183, 2003.

저자 소개



이홍재(李興載)

1958년 1월 28일 생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1996년 미국 위싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수
Tel : 02-940-5147
E-mail : hjlee@mail.kw.ac.kr



박성민(朴誠民)

1976년 2월 13일 생. 1999년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 02-940-5147
E-mail : smpark@explore.kw.ac.kr



이경섭(李坰燮)

1974년 7월 5일 생. 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 02-940-5147
E-mail : kyeong@explore.kw.ac.kr



이종기(李宗基)

1971년 12월 12일 생. 1997년 수원대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 02-2123-2771

E-mail : leejonggi@yonsei.ac.kr



민상원(閔湘元)

1976년 5월 15일 생. 1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정
Tel : 02-880-7990

E-mail : topfive@snu.ac.kr



한중교(韓中敎)

1975년 12월 5일 생. 2002년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업. 2004년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정
Tel : 02-880-7258
E-mail : hck2136@snu.ac.kr



박종근(朴鍾根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동경대 전기공학과 졸업(석사). 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1982.4~1982.9 : 일본 도시바 중전기술 연구소. 1982.10~1983.3 : 일본 국립 에너지 물리학 연구소. 현재 서울대 공대 전기공학부 교수
Tel : 02-880-7247
E-mail : parkjk@snu.ac.kr



문영현(文永鉉)

1952년 3월 11일 생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 Oregon State Univ. 대학원 졸업(공박). 현재 연세대 공대 전기전자공학부 교수
Tel : 02-2123-2771
E-mail : moon@yonsei.ac.kr