

# 최적조류계산 프로그램과 한전계통에의 적용

남궁재용\*, 문영환\*, 최홍관\*, 윤재영\*, 추진부\*\*, 운용범\*\*

(\*한국전기연구소 전력연구단, \*\*한전전력연구원 전력계통연구부)

## 1. 서론

경쟁을 통한 효율성 증진과 적정 전기요금의 제시, 독점 철폐를 통한 새로운 자본유치 및 민간부문과의 위험 공유, 기업논리의 적용에 의한 전력산업의 투자 및 운영의 효율 향상 등을 목표로, 전세계적으로 전력산업의 구조개편이 추진되고 있다. 국내에서도 이와 같은 세계적인 추세에 동참하여, 독점사업 형태의 전력산업에 다수의 시장참여로 인한 발전시장에서의 경쟁과 소비자의 전력공급자 선택권 도입을 통한 전력산업의 효율성 증진을 목표로 전력산업의 구조개편을 추진하고 있다.

이와 같은 전력시장의 외부 환경변화에 신속히 대응하기 위해서는 적절한 준비와 다양한 테스트가 실시되어 계통에 대한 안전성과 효율성, 실용성 등이 보장되어야 할 것이다. 그러나, 국내에서는 이러한 변화에 대응하기 위한 연구와 노력이 부족한 상황이므로, 변화하는 전력시장에 대응하기 위한 운용 소프트웨어의 독자적 개발을 목표로 기존 EMS(Energy Management System ; 에너지관리시스템) 운용체제를 보완할 수 있는 정도의 독자적 기술능력 배양이 요구되고 있다.

현재, 한국전력공사에서는 Toshiba사의 표준 SCADA/EMS 시스템을 이용하고 있다. 그러나, 이 시스템은 1988년도 말에 도입된 것으로서, 최근에 개발 및 사용되고 있는 여러 이론 및 신기술이 제한적으로 적용되고 있는 상황이다. 특히, 전력시장에서 대두되고 있는 여러 문제에 합리적으로 OPF(최적조류계산 ; Optimal Power Flow) 운용기술을 적용시키는데 있어서, 기존의 시스템은 입력자료의 처리방법이라든지 프로그램의 능력측면에서 문제점이 제시되고 있다. 현재 국내 전력계통에 OPF를 적절하게 활용하는 경우 전체 송배전 손실을 감소시킬 수 있을 것으로 판단되고 있다. 만일, 10%의 송배전 손실을 감소시킬 수 있다면, 이에 따른 경제가치는 금액으로 환산할 경우 연간 수 백억원에

달할 것이다. 따라서, OPF와 관련된 연구는 전력산업 분야에서 시급하면서도 부가가치가 높은 기술개발 분야라고 할 수 있다.

본 연구에서는 주어진 한전 실계통자료(대상계통 : 2002년도 침두부하시의 한전계통 계획분)를 대입하여 고전적인 Loadflow로 계산해 본 결과와, 같은 입력자료하에서 모션 전압크기 및 선로조류 제약조건 등을 만족시키도록 하면서 유효전력 손실 최소화를 목적함수로 하여 OPF 프로그램으로 계산해본 결과를 비교하였다. 그리고, 두 결과에서 발생한 선로손실의 차이 및 그 차이의 발생원인에 대해 분석하였다.

## 2. OPF에 적용되는 최적화기법

최적조류계산(Optimal power flow ; OPF)은 전력계통의 운용 및 물리적 특성에 의하여 발생하는 여러 제약조건을 만족시키면서 특정 목적함수의 최적값을 구하는 다양한 종류의 문제를 포괄하는 용어이다. 일반적으로 OPF 문제는 유효전력과 무효전력의 수급제약조건을 만족시키면서 화력기의 연료비용을 최소화하도록 정식화시키는 경우가 많은데, 이 경우에는 각 발전기의 연료비 특성곡선을 알아야 한다. 이와 같은 형태로 정식화된 OPF문제를 해결하기 위해서는 비선형계획법, Quadratic Programming, Newton-based solutions, 선형계획법, 혼합정수계획법, Interior Point Method 등의 다양한 최적화기법이 적용되어야 하는데, 문제의 성격이나 요구되는 정확도 등에 따라 사용되는 최적화기법이 달랐다.

현재까지 사용되고 있는 최적화기법 중에서, 비선형문제의 해법으로는 Interior Point Method가 주어진 문제의 확장성이나 정확도, 계산속도 측면에서 최근에 가장 주목을 받고 있다. 각 최적화기법을 간략히 소개하면 다음과 같다.

## 2.1 비선형계획법

### (Nonlinear programming : NLP)

NLP는 비선형의 목적함수와 제약조건을 포함하는 문제를 풀 수 있는 방법이다. 제약조건은 등호 and/or 부등호로 구성될 수 있다. 부등호 제약조건은 초과나 미만으로 경계가 지어지도록 만들 수 있다. 조사에 의하면 OPF 정식화의 약 8% 정도만이 실시간 on-line 및 off-line 운용문제에 적용할 수 있도록 만들어졌다는 것이 밝혀졌다. 1962년에 경제급전문제를 풀기 위하여 비선형계획법이 처음으로 소개되었다.

## 2.2 Quadratic Programming : QP

Quadratic Programming은 비선형계획법의 한 형태이며, 선형제약조건 하에서 목적함수가 2차식으로 표현되는 최적화기법이다. 손실최소화, 경제급전 등의 문제에 적용되어 왔다. 최적조류계산문제에 Quadratic Programming이 적용된 것은 1973년도부터이다.

## 2.3 Newton-based solutions

이 기법에서는, 최적화의 필요조건으로 Kuhn-Tucker conditions를 만족시켜야 한다는 특징이 있다. 일반적으로 Newton-based solutions는 해를 반복적으로 구해야 하는 비선형 방정식인데, 1974년에 손실 및 비용 최소화문제에 처음 도입되었다.

## 2.4 선형계획법 (Linear programming : LP)

선형계획법은 목적함수 및 제약조건이 선형으로 주어진 문제를 해결하기 위한 최적화기법이다. LP문제를 풀 때는 심플렉스법(Simplex method)이 상당히 효과적이라고 알려져 있으며, 개정심플렉스법(Revised simplex method)이 가장 많이 사용된다. 전압, 손실, 경제급전, 무효전력 등과 관련된 목적함수를 갖는 경우, 이 목적함수는 LP해를 풀 수 있도록 선형화 되어야 한다. 1968년도에 Economic schedule을 결정하는 문제에 선형계획법이 적용되었다.

## 2.5 혼합정수계획법

### (Mixed integer programming : MIP)

혼합정수계획법은 선형계획법의 한 형태로서, 제약조건 중에는 변수가 정수여야 한다는 제한이 포함되어 있다. 정수계획법과 혼합정수계획법은 비선형계획법과 같이 컴퓨터에 대한 의존성이 크며, 이산변수(Discrete variables)의 총수는 MIP문제를 해결하는 것이 얼마나 어려운가를 판단하는 중요한 척도가 된다. 이 방법은 무효전력원 배분계획(VAR planning)과 같은 특정 문제의 해결에 사용된다. 1973년도에 경제급전에 대한 최적화문제의 해법으로 소개되었다.

## 2.6 Interior point method

최근에 Karmarkar에 의해 재발견된 Interior point method는 선형계획법을 종래의 심플렉스법보다도 훨씬 빨리, 그리고 더 훌륭히 계산을 하기 때문에 Operational research community를 매우 놀라게 하였다. Interior point method를 NLP와 QP문제에 적용할 수 있도록 확장한 논문이 발표됨으로써 그 뛰어난 특성과 확실한 결과가 증명되고 있다. Interior point method는 1980년대 초반에 발견되었지만, 그 방법이 전력계통의 최적화문제에 도입된 것은 1991년도가 처음이다. 처음 도입되었을 때는 전력계통의 상태추정문제를 다루었다.

## 3. PSS/OPF의 특징

국내에서도 OPF Program에 대한 연구가 지속적으로 진행되고는 있으나, 아직 상용화수준까지는 도달되지 못하고 있다. 현재 전세계적으로 발표되고 있는 OPF 상용 프로그램 중 한전 실계통을 적용할 수 있는 수준에 도달한 대표적인 프로그램으로는 Operation Technology, Inc.의 "Optimal Power Flow module of ETAP Powerstation-2000Bus"와 Power Technologies, Inc.의 "PSS/OPF"등이 있으나, 이 중 국내 전력회사에 도입되어 사용되고 있는 PTI사의 프로그램이 추후 기존 입출력자료와의 호환성측면에서 유리할 뿐만 아니라, 현재 가장 앞서 있는 Interior Point Method를 사용하고 있으며, 세계 주요 전력회사가 도입하여 실제 사용 중이므로 그 유용성이 높다고 판단된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 PTI사의 "PSS/OPF"에 한전실계통자료를 적용하였다.

### 3.1 목적함수

전술하였던 바와 같이 OPF문제는 다양한 제약조건하에서 특정 목적함수를 갖는다. PSS/OPF에서 사용 가능한 목적함수는 다음의 하나 또는 몇 개의 결합된 형태가 가능하다.

- 연료비용 최소화
- 조정가능한 모선부하의 최소화
- 조정가능한 선로리액턴스의 최소화
- 조정가능한 병렬모선설비의 최소화
- 유효전력발전의 최소화
- 무효전력발전의 최소화
- 인터페이스 조류의 최소화
- 인터페이스 유효전력 전송의 최대화
- 유효전력손실의 최소화
- 무효전력손실의 최소화

본 연구에서는 정확한 연료비 특성곡선을 알 수 없어서 연료비용 최소화 문제를 적용하지는 못하고, 유효전력손실 최소화 문제에 대하여 적용시킴으로써 선로손실을 줄일 수



있는지, 선로손실이 줄어들었다면, 기존의 조류계산과의 차이가 어디에서 발생하였는지 등을 조사하였다.

### 3.2 제약조건

제약조건 역시 다음과 같은 항목 중에서 임의의 선택이 가능하다.

- 모선전압크기 제약
- 선로조류 제약 (MW, Mvar, MVA, A)
- 인터페이스 조류제약 (MW, Mvar)
- 발전기 무효전력 용량 제약
- Generation period reserve 제약
- 발전기 유효전력 제약
- 조정가능한 병렬모선설비 제약
- 조정가능한 선로리액턴스 제약
- 조정가능한 부하 제약

본 연구에서는 모선전압크기의 상하한치를 0.95[pu]~1.05[pu]로 사용하였다. 그리고, 모선전압크기 제약만을 고려하고 OPF를 계산하였을 때 입력자료의 RATE A를 위반한 선로만을 대상으로 하여 RATE A의 값을 상한치로, -1을 곱한 값을 하한치로 사용하여 선로조류제약을 고려하였다. 또한, 이와 같은 부등호제약조건을 적용할 때는 모선전압크기 제약에 대해서는 Violations를 허용치 않는 Hard constraints를 사용하고, 선로조류 제약에 대해서는 Violations의 최소화를 의미하는 Soft constraints를 사용하였다. 즉, 모선전압에 대해서는 제약조건을 반드시 만족시키도록 계산하여도 문제가 없지만, 선로조류를 엄격히 만족시키도록 하면 해가 구해지지 않으므로(실행가능영역을 벗어나므로), 선로조류제약은 가능해가 나올 수 있도록 유도하기 위하여 제약조건에 범위에 다소 융통성을 부여하였다. 인터페이스 조류제약, Generation period reserve 제약, 조정가능한 선로리액턴스 제약, 조정가능한 부하 제약은 고려하지 않았으며, 조정가능한 병렬모선설비 제약을 포함한 기타의 제약들은 PSS/OPF에서 제공하는 Default값을 사용하였다. 결과적으로 본 논문에서는, 발전기모선전압, 변압기 탭, 병렬모선설비만을 제어변수로 사용하였다.

## 4. 한전 실계통 적용결과

2002년도의 침두부하계통에 OPF를 적용한 결과를 표.1에 나타내었다.

표 1. 2002년도의 침두부하계통 적용결과

적용시킨 방법 구분	PSS/E Loadflow		OPF	
	유효전력 [MW]	무효전력 [MVar]	유효전력 [MW]	무효전력 [MVar]
총 출력	43504.2	12752.2	43466.3	10109.6
총 손실	599.8	14061.2	562.0	13215.1

단, OPF 적용 결과의 경우 목적함수는 유효전력 손실최소화를 선택하였으며, 제약조건은 모선전압제약, 선로조류 제약 등에 대하여 3.2절에서 밝힌 방법대로 사용하였다. 이 결과를 동일 입력자료하에서의 기존 조류계산결과와 비교하여 볼 때, 선로의 총 손실이 599.8[MW]에서 562.0[MW]로 37.8[MW]만큼 감소됨을 알 수 있다. 즉, OPF를 적용하면 선로조류 제약조건 등을 만족시키면서도 6% 이상 손실이 줄어드는 결과가 나온다.

이와 같이 계통의 총 손실이 변하는 원인을 분석하기 위하여, 먼저 각 Area별로 무효전력 분포를 조사하여 보았다. 각 Area별 무효전력 분포 조사에 의하면, 발전기모선의 전압조정 등과 같은 무효전력원의 변화에 의하여 Area별 무효전력 분포가 그림 1과 같이 적정화됨을 알 수 있는데, 그 결과 송전손실이 경감됨과 아울러 송변전 설비의 이용률이 향상되었다. 그런데, 종래의 조류계산의 경우 각 모선의 전압 중 최대값은 1.0399[pu]에 불과하였으나, OPF로 계산하면서 각 모선의 전압크기가 전반적으로 상승되고 최대값도 상한치 부근의 1.0499[pu]에 도달하였다. 이와 같이 1.0499[pu]에 도달한 전압은 단지 4군데의 모선에서만 검색되었는데, 이러한 결과는 주어진 계통에 별 문제를 일으키지 않으리라 판단된다. 그러나, 계통 상황에 따라서는 Hard constraints의 경우는 범위지정에, Soft constraints의 경우는 Penalty 계수 부여에 각 모선별로 좀더 신중을 기할 필요가 있을 것으로 사료된다.

또한, 조류계산과 최적조류계산의 유효전력 출력결과를 비교해 보면, 창원전력관리처 관할의 Area 59에서 송전손실 경감분 만큼 유효전력 발전량이 줄어들음을 알 수 있는데, 그 이유는 슬랙모선으로 지정한 삼천포 #622 발전기가 Area 59에 속해 있기 때문이다.

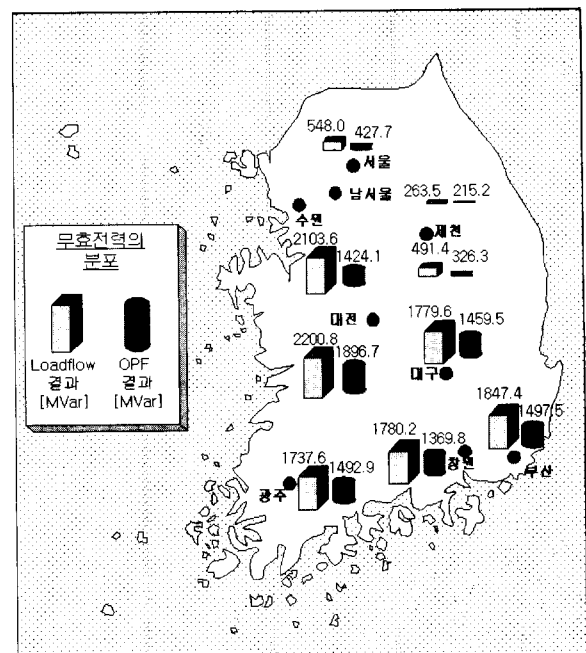


그림 1. 무효전력의 분포

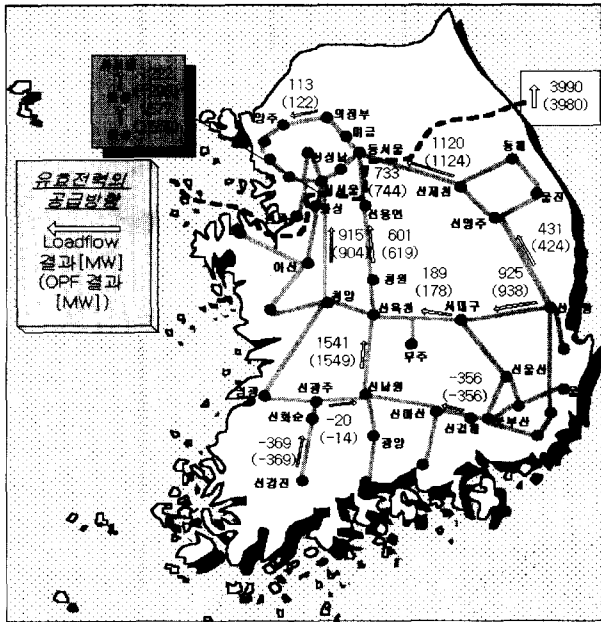


그림 2. 부상조류의 변화

그리고, 부상조류의 변화를 살펴보기 위하여 그림 2와 같이 주요 선로에서의 유효전력의 흐름을 조사하여 보았다. 그림 2에서 알 수 있듯이, OPF를 적용하는 경우 서울쪽으로 공급되는 전력은 10[MW]만큼 감소되었다. 즉, 부상조류가 감소되는 고무적인 결과가 도출되었다.

한편, 조류계산시와 OPF 결과 모두에서 모선전압은 한계치 내에 위치하였으나, 선로조류는 그림 3에 표시한 바와 같이 정격을 벗어난 경우가 있었다. 조류계산 결과 변압기를 포함한 총 7군데에서 과부하가 발생하였고 그 중 3군데는 과부하가 정격의 130%를 초과하였지만, OPF 결과에서는 과부하 발생 Branch가 5군데로 줄어들고, 과부하도 전체 Branch에서 정격의 130% 미만으로 감소되었다.

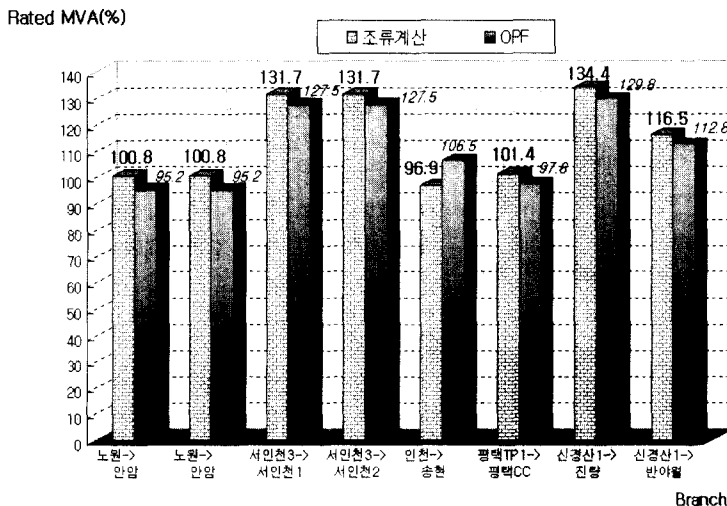


그림 3. 선로조류제약의 영향

## 5. 결론

경쟁 개념이 도입된 전력시장에서 발생하는 다양한 제약을 포용하면서 선로손실최소화나 연료비 최소화 등과 같은 목적을 달성하기 위해서는 OPF의 도입이 매우 효과적이다. 이와 같은 프로그램의 개발 및 변환기술의 확보를 위해서는 주요 상용 OPF 프로그램의 조사·분석 및 실계통의 적용을 통한 운용기술의 확보, 그리고 무엇보다도 연료비 특성곡선 등의 입력자료에 대한 고신뢰의 체계적인 Database화가 필수적이다. 본 연구에서 도출한 주요 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- (1) 실제 한전계통의 계획과 운용에는 OPF가 사용되지 않고 있다. 그러나, 2002년도의 한전계통 계획분에 대하여 기존의 PSS/E 프로그램과 PSS/OPF 프로그램을 적용한 결과를 비교해보면, 침두부하시에 37.8[MW]만큼의 선로손실을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 실계통 계획자료에 대해 적용한 결과라 실계통 운용자료에 의한 결과와는 다소 차이가 있겠지만, 단순한 조류계산 결과보다도 OPF를 사용한 계산결과가 계통 전체의 손실을 줄일 수 있는 방안임을 확인하였다.
- (2) 계통의 총손실이 줄어드는 원인은, 제어변수가 자동적으로 조정되어 그림 1에 표시한 바와 같이 무효전력의 분포가 적정화되면서 송전손실을 경감시켰기 때문으로 분석되었다. 이에 따라 송변전설비의 이용률도 향상되었다.
- (3) 주어진 계통에 OPF를 적용한 경우 상한치에 접근한 모선전압이 검색되었다. 사례연구에서 사용된 한전계통 계획분에 대하여 이 정도의 영향이 계통에 문제를 발생시키지는 않으리라고 판단되지만, 계통 상황에 따라서는 제약조건의 범위지정(또는 Penalty 계수 부여)에 세심한 주의를 기울일 필요성도 발생할 수 있다.
- (4) 정격을 벗어난 선로조류가 반드시 존재해야 하는 경우, 즉 실행가능영역에서는 해를 구할 수 없는 경우에도 선로조류제약에 Soft Constraints를 적용함으로써 Violations의 최소화를 유도하여 보다 바람직한 해를 도출할 수 있었다.
- (5) 본 연구에서는 모선전압크기 및 선로조류 제약조건을 만족시키도록 하면서 발전기모선전압이나 변압기 탭 조정 등의 무효전력 조정만으로 전력손실을 줄였다. 이와 같이 모선전압이나 선로용량 등에 대한 부등호 제약조건을 고려하기 위해서는 OPF의 적용이 최선의 방법이다.
- (6) 전력산업 구조개편이 진행되면, 전술한 제약조건 외에도 고려사항이 증가할 것이다.



복상조류라든지, 연료비용, 전압안정도해석, Interface Flow 등등의 문제가 새로운 각도에서 제기될 것인데, 이러한 문제의 해결에는 다양한 제약조건을 고려하면서도 동시에 가장 경제적인 해답을 줄 수 있는 OPF의 응용이 주요한 해결책으로 부상할 것이다.

종래의 조류계산 방법으로 허용가능한 "적정해"를 구하기 위해서는 막대한 시행착오가 요구될 수가 있었다. 그러나, OPF를 사용하면 최소의 노력으로 "최적해"를 구할 수 있게 된다. 앞으로는 Facts설비의 적용, 입찰(Bidding)자료의 처리 등에도 최적화기법 개발이 요구될 것이며, 이의 꾸준한 연구 및 적용이 기대된다.

참고문헌

[1] H. W. Dommel and W. F. Tinney, "Optimal Power Flow Solution", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, pp.1866-1876, October 1968

[2] D. W. Wells, "Methods of Economic Secure Loading of a Power System", Proceedings of IEEE, Vol. 115, No.8 pp.606-614, 1968

[3] G. F. Reid and L. Hasdorf, "Economic Dispatch Using Quadratic Programming", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp.2015-2023, 1973

[4] N. Nabona and L. L. Ferris, "Optimization of Economic Dispatch Through Quadratic and Linear Programming", Proceedings of IEEE, Vol. 120, No. 5, May 1973

[5] A. M. H. Rashed and D. H. Kelly, "Optimal Load Flow Solution Using Lagrangian Multipliers and the Hessian Matrix", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp.1292-1297, 1974

[6] K. Aoki, A. Nishikori and R. T. Yokoyana, "Constrained Load Flow Using Recursive Quadratic Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRs-2, No. 1, pp.8-16, February 1987

[7] Clements K. A., Davis P. W., Frey K. D., "An Interior Point Algorithm for Weighted Least Absolute value Power System State Estimation", IEEE/PES 1991 Winter Meeting.

[8] James A. Momoh, M. E. El-Hawary, Ramababu Adapa, "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 - Part I : NonLinear and Quadratic Programming Approaches", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRs-14, pp.96-104, 1999

[9] James A. Momoh, M. E. El-Hawary, Ramababu Adapa, "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 - Part II: Newton, Linear and Programming Interior Point Methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRs-14, pp.105-111, 1999

[10] "EMS 기능고도화 연구", 과학기술부, 1998. 8

[11] "폴/탁송모형에서의 전력시장운영시스템 구조설계에 관한 연구-중간보고서", 한국전력공사, 2000. 1

저자 소개



남궁재용(南宮在鏞)

1966년 7월 2일생. 1990년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년-현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어연구그룹 선임연구원



문영환(文英煥)

1956년 5월 13일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 U. Texas at Arlington 전기공학과 졸업(공학). 1981년-현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어연구그룹 책임연구원. 시스템제어연구그룹장



최흥관(崔興官)

1968년 2월 6일생. 1994년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년-현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어연구그룹 연구원



윤재영(尹在映)

1962년 7월 30일생. 1985년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년-현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어연구그룹 선임연구원



추진부(秋鎭夫)

1950년 1월 7일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전전력연구원 전력계통연구실 수석연구원.



윤용범(尹用範)

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한전전력연구원 전력계통연구실 차세대전송그룹 선임연구원.