

Affine Scaling Interior Point Method를 이용한 제약급전에 관한 연구

論 文

55A-3-7

A Study on the Constrained Dispatch Scheduling Using Affine Scaling Interior Point Method

金 耿 民* · 韓 錫 萬** · 鄭 求 亨*** · 金 發 鎬†

(Kim, Kyungmin · Han, Seokman · Chung, Koohyung · Kim, Balho)

Abstract - This paper presents an Optimal Power Flow (OPF) algorithm using Interior Point Method (IPM) to swiftly and precisely perform the five minute dispatch. This newly suggested methodology is based on Affine Scaling Interior Point Method, which is favorable for large-scale problems involving many constraints. It is also eligible for OPF problems in order to improve the calculation speed and the preciseness of its resultant solutions. Big-M Method is also used to improve the solution stability. Finally, this paper provides relevant case studies to confirm the efficiency of the proposed methodology.

Key Words : Optimal Power Flow(OPF), Interior Point Method(IPM), Affine Scaling Method, Big-M Method

1. 서 론

전력산업의 구조개편에 따라 기존의 수직독점체제에서의 비용최소화라는 중앙집중적 급전계획의 수정이 불가피해지고, 전력계통의 운용 및 설비계획 분야에 있어서 효율성을 극대화하기 위한 방안이 당면과제로 부각됨에 따라 계통운영기법의 주요 분야 가운데 하나인 최적조류계산(Optimal Power Flow : OPF)은 기존의 제한적인 범위를 벗어나 실질적인 계통운용의 수단으로서 그 활용 영역을 확장시키고 있다. 최적조류계산은 계통운용, 계통신뢰도와 에너지요금 및 송전망 이용가격 산정 등의 문제를 해결할 수 있는 핵심기술 중의 하나이며, 이미 선진 외국 전력시장의 경우, 최적조류계산의 활용은 일반화 되었다고 해도 과언이 아니다.

우리나라의 경우, 1980년대 에너지종합관리시스템(Energy Management System)의 일부분으로 최적조류계산이 도입되었으나, 그 간의 활용실적은 극히 저조하였으며, 최근 전력시장의 선진화 정책의 일환으로 구축된 전력시장운영시스템(Market Operating System)의 핵심 부분으로 최적조류계산이 소개된 이래 이에 대한 관심과 활용도 제고에 대한 연구가 활기를 띠고 있는 실정이다.[1]

기존의 최적조류계산은 문제의 복잡성이나 계산의 어려움 등으로 인해 시간에 제약을 받지 않는 장기계통계획이나 모션한계비용 계산 등에만 가끔 이용되었을 뿐, 실시간 급전에

서는 사용되지 못하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 분산처리기법 및 최적화 알고리즘에 대한 많은 연구가 진행되고 있고, 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 최적조류계산의 실시간 적용에 점진적인 가능성을 보여주고 있다.[2,3,4]

이에 본 연구에서는 대형문제에서 해의 수렴성 및 계산속도면에서 뚜렷한 효과를 보이는 Interior Point Method를 최적조류계산 문제에 적용하고자 한다.[5] 제안된 기법은 Linear Transformation을 이용한 Affine Scaling Method(아핀법)이고, 비선형 목적함수와 선형함수들로 구성된 최적조류계산 문제를 풀기위한 알고리즘을 제시한다.[6,7] 또한 해의 수렴성 제고와 적절한 초기값 선정을 위해 Big-M Method를 이용하였다.[8]

2. 본 론

2.1 DC-OPF 모델

먼저, 일반적인 DC-OPF 문제는 다음과 같다.

$$\min C(X) \quad : \text{유효전력 발전비용} \quad (1)$$

$$s.t. A_1 X = B_1 \quad : \text{모션 전력수급 방정식}$$

$$A_2 X \geq B_2 \quad : \text{기술적, 물리적, 환경적 제약}$$

$$X \geq 0$$

2.2 Modified DC-OPF 모델

다음은 본 연구에서 제안하는 Modified DC-OPF 모델이다.

† 교신저자, 正會員: 弘益大學 電氣情報制御工學科 副教授 · 工博

E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr

* 正會員: 弘益大學 電氣情報制御工學科 碩士課程

** 正會員: 弘益大學 電氣情報制御工學科 博士課程

*** 正會員: 弘益大學 電氣情報制御工學科 博士課程

接受日字: 2005年 12月 13日

最終完了: 2006年 1月 31日

$$\min C(X) + M \cdot S_3^l \quad (2)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & A_1 X = B_1 \\ & A_2 X + S_1 = B_2 \\ & A_3 X + S_2 - S_3^l = B_3 \\ & X \geq 0 \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } S_3^l = \begin{cases} A_3 X - B_3 & , \text{ if } A_3 X \geq B_3 \\ \text{none} & , \text{ otherwise} \end{cases}$$

M: 10^4 이상의 충분히 큰 값

제약식은 슬랙변수(S_1, S_2)를 도입하여 부등호 제약식을 등호 제약식으로 표현한 식이다. 그리고 본 연구에서는 초기값에 대해 해가 안정적으로 출발할 수 있도록 Big-M Method를 사용하였다.

Modified DC-OPF 모델을 표준형으로 표현한 식은 다음과 같다.

$$\min F(X) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & AX = B \\ & X \geq 0 \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } F(X) = C(X) + M \cdot S_3^l$$

2.3 Affine Scaling Method(ASM)

2.3.1 Starting Point (X^0)

X^0 는 feasible region 내부에 존재해야 되므로, X^0 의 모든 요소들이 non-zero이어야 하는 조건을 가지고 있고, 본 연구에서는 초기값 설정을 위해 Economic Dispatch와 DC-Power Flow의 해를 이용하는 것을 제안한다.

2.3.2 Search Direction (G^k)

일반적인 최적화 기법에서 사용되는 목적함수의 gradient를 Search Direction으로 취하게 되면, feasible region을 벗어날 우려가 있기 때문에, 다음 식(4)와 같이 목적함수의 gradient와 projection matrix의 곱으로 구성된 search direction을 사용한다.

$$G^k = M^k \nabla F(X^k) \quad (4)$$

여기서, k : iteration index

$$G^k: \text{ search direction, } G^k = [g_1^k, g_2^k, \dots, g_n^k]$$

$$M^k = [I - A^{kT} (A^k A^{kT})^{-1} A^k]: \text{ projection matrix}$$

2.3.3 Step Size (α^k)

$$\alpha^k = \min \{ |x_i^k / g_i^k| \} \quad (5)$$

$$\text{단, } g_i^k < 0, \forall i$$

2.3.4 Scaling

ASM은 linear transformation 중의 하나인 affine transformation을 이용하여, X^k 를 feasible region의 중앙 근처에 위치하도록 feasible region을 변환시키는 과정을 거친다.

$$\tilde{X}^k = (D^k)^{-1} X^k \quad (6)$$

$$\tilde{A}^k = A^k (D^k) \quad (7)$$

여기서, D^k : scaling operator (a square matrix with the components of X^k on its diagonal)

식(6),(7)은 각각 scaling operator를 이용해 매 iteration에 서 구해진 해와 제약식을 scaling 하는 식이다. Scaling 과정을 수행함으로써, X^k 를 보다 안정적인 위치에 놓아 해의 개선과정을 용이하게 해준다는 이점이 있다.

2.3.5 Affine Scaled version

- Affine Scaled Search Direction (\tilde{G}^k)

$$\tilde{G}^k = \tilde{M}^k \tilde{\nabla} F(X^k) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \tilde{M}^k = [I - \tilde{A}^{kT} (\tilde{A}^k \tilde{A}^{kT})^{-1} \tilde{A}^k]$$

$$\tilde{\nabla} F(X^k) = (D^k) \nabla F(X^k)$$

- Affine Scaled Step Size ($\tilde{\alpha}^k$)

$$\tilde{\alpha}^k = \min \{ |\tilde{x}_i^k / \tilde{g}_i^k| \} \quad (9)$$

$$\text{단, } \tilde{g}_i^k < 0 \quad i = 1, \dots, n$$

- Affine Scaled version의 해의 개선과정

$$\tilde{X}^{k+1} = \tilde{X}^k + \rho \tilde{\alpha}^k \tilde{G}^k \quad (10)$$

여기서, ρ : safety factor ($0.9 \leq \rho < 1$)

파라미터 ρ 는 search direction이 feasible region의 경계면

에 닿는 것을 막게 하는 safety factor이다.

2.3.6 Original space로 역변환

식(10)을 수행한 후, 해의 수렴관정을 위해 \tilde{X}^{k+1} 을 식(11)을 이용하여 Original space로 역변환시킨다.

$$X^{k+1} = (D^k)\tilde{X}^{k+1} \quad (11)$$

2.3.7 Stopping Criterion

$$\frac{|F(X^{k+1}) - F(X^k)|}{|F(X^k)|} \leq \epsilon_s \quad (12)$$

여기서, ϵ_s : 허용오차

2.4 알고리즘

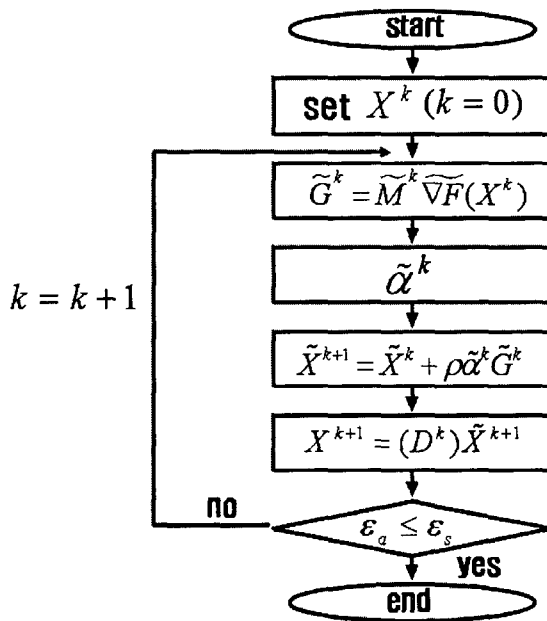


그림 1 Affine Scaling Method 알고리즘

Fig. 1 Algorithm of Affine Scaling Method

2.5 사례연구

사례연구를 위해 본 연구에서는 Modified IEEE 6 Bus, 14 Bus 2개의 시스템을 이용하였다. 본 연구에서 제안된 기법의 비교 및 검증에 위해 상용화된 최적화 프로그램 solver인 MINOS5를 이용하였다. MINOS5는 2단 심플렉스법을 기반으로 한 최적화 기법이다.[9]

2.5.1 Modified IEEE 6 Bus

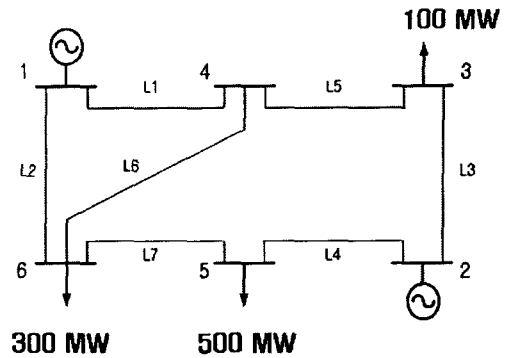


그림 2 Modified IEEE 6 Bus 시스템

Fig. 2 Modified IEEE 6 Bus System

표 1 발전기 데이터

Table 1 Generator data

	Max(MW)	Min(MW)	a	b	r
G1(Bus 1)	600	100	450	13.4	0.00264
G2(Bus 2)	400	50	560	15.7	0.00388

표 2 선로 데이터

Table 2 Line data

선로	선로 용량(MW)
Line 1 (1-4)	500
Line 2 (1-6)	400
Line 3 (2-3)	200
Line 4 (2-5)	400
Line 5 (3-4)	300
Line 6 (4-6)	400
Line 7 (5-6)	200

표 1, 표 2는 Modified IEEE 6 Bus 시스템의 발전기, 선로 데이터를 나타내고, 부하 데이터는 그림 2에 직접 표기하였다. 선로 데이터는 무손실 즉, R=0이고, 리액턴스 X는 0.001로 모든 선로가 동일하다고 가정하였다.

표 3 초기값

Table 3 Initial values

Pg1	668.1063123
Pg2	231.8936877
theta1	0.006538206
theta2	0.002516611
theta3	0.002714286
theta4	0.003911960
theta5	0.000000000
theta6	0.002483389
S3^1	5.4817276
S3^2	48.3388704

표 4 인위변수 추가여부에 따른 선로조류량
Table 4 The Result of line flows

	선로 용량(MW)	조류량(MW)
Line 1	500	262.6245847
Line 2	400	405.4817276
Line 3	200	19.7674419
Line 4	400	251.6611296
Line 5	300	119.7674419
Line 6	400	142.8571429
Line 7	200	248.3388704

표 3은 Economic Dispatch와 DC-Power Flow의 해를 이용하여 선택된 초기값을 나타내고, 표 4는 DC-Power Flow의 해를 정식화된 Modified DC-OPF 모델에서의 선로 제약식에 대입하였을 때, 선로 over flow 여부를 알아보는 과정을 나타낸다. 2번과 7번 선로에서 over flow가 발생되어 초기값으로 두개의 인위변수가 추가된다는 것을 표 3에서 보여주고 있다.

표 5 결과값 ($E_s=10^{-6}$, $M=10^7$, $\rho=0.99$)
Table 5 Computational Results

	MINOS5 (Iter=10)	ASM (Iter=9)	Error(%)
P_{g1}	571.428571	571.428777	3.605E-05
P_{g2}	328.571429	328.571246	5.5696E-05
θ_1	0.00557143	0.00557142	0.00017949
θ_2	0.00300000	0.00299999	0.00033333
θ_3	0.00271429	0.00271428	0.00036842
θ_4	0.00342857	0.00342857	0.000000
θ_5	0.00000000	0.00000000	0.000000
θ_6	0.00200000	0.00200000	0.000000

표 5는 Modified IEEE 6 Bus 시스템의 DC-OPF 결과값을 나타낸다. 허용오차 ϵ_s 는 10^{-6} , M은 10^7 , safety factor $\rho = 0.99$ 로 사례연구를 하였다. MINOS5의 결과와 비교해 볼 때 반복횟수에서는 ASM이 MINOS5와 별 차이를 보이고 있지 않고, 백분율 오차에서 θ_3 결과의 백분율 오차가 $3.6 \times 10^{-4}(\%)$ 로 다른 해들의 오차율에 비해 가장 크지만, 전체적으로 볼 때 해의 수렴성면에서 MINOS5의 결과와 거의 차이가 없음을 볼 수 있다.

2.5.2 Modified IEEE 14 Bus

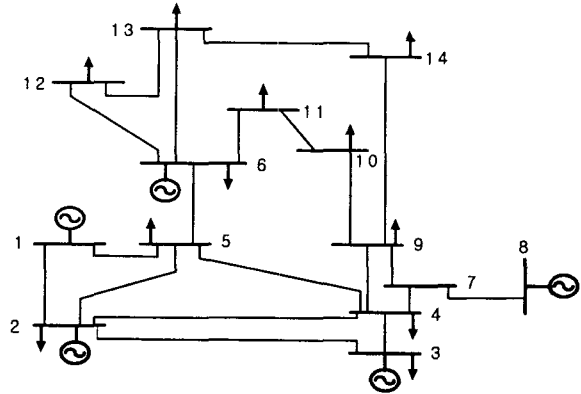


그림 3 Modified IEEE 14 Bus 시스템
Fig. 3 Modified IEEE 14 Bus System

표 6 발전기 데이터
Table 6 Generator data

	Max(MW)	Min(MW)	a	b	r
G1(Bus 1)	600	150	450.0	13.4	0.00264
G2(Bus 2)	500	100	560.0	14.1	0.00249
G3(Bus 3)	500	100	570.0	17.1	0.00279
G4(Bus 6)	300	50	922.0	15.8	0.00382
G5(Bus 8)	400	50	620.0	15.7	0.00328

표 7 선로 데이터
Table 7 Line data

선로	선로용량 (MW)	선로	선로용량 (MW)
Line 1 (1-2)	400	Line 11 (1-5)	500
Line 2 (2-3)	300	Line 12 (2-4)	300
Line 3 (3-4)	400	Line 13 (2-5)	700
Line 4 (4-5)	600	Line 14 (4-7)	300
Line 5 (5-6)	600	Line 15 (4-9)	500
Line 6 (6-11)	300	Line 16 (6-12)	400
Line 7 (7-9)	350	Line 17 (6-13)	600
Line 8 (7-8)	500	Line 18 (9-14)	400
Line 9 (9-10)	400	Line 19 (12-13)	500
Line 10 (10-11)	300	Line 20 (13-14)	500

표 8 부하 데이터
Table 8 Load data

부하 모션	부하량 (MW)	부하 모션	부하량 (MW)
BUS 2	30	BUS 10	200
BUS 3	70	BUS 11	100
BUS 4	100	BUS 12	200
BUS 5	50	BUS 13	200
BUS 6	200	BUS 14	500
BUS 9	200	-	-

표 6 ~ 표 8에 Modified IEEE 14 Bus 시스템의 발전기 및

선로 데이터, 부하 데이터를 나타내었다. 선로 데이터는 앞의 사례연구 시스템과 마찬가지로 $R=0$, $X=0.001$ 로 모든 선로가 동일하다고 가정하였다.

표 9 초기값
Table 9 Initial values

P_{g1}	600.00000000
P_{g2}	500.00000000
P_{g3}	141.97275100
P_{g4}	273.84920800
P_{g5}	334.17804100
θ_1	0.013077185
θ_2	0.011252199
θ_3	0.010100456
θ_4	0.008228986
θ_5	0.008902170
θ_6	0.003550310
θ_7	0.007820290
θ_8	0.011162070
θ_9	0.004069814
θ_{10}	0.002229979
θ_{11}	0.002390145
θ_{12}	0.001240248
θ_{13}	0.000930186
θ_{14}	0.000000000
S_3^1	25.0476230
S_3^2	2.3213320
S_3^3	6.9813795

표 10 인위변수 추가여부에 따른 선로조류량
Table 10 The Result of line flows

선로	선로 용량	조류량
Line 1(1-2)	400	182.4985408
Line 2(2-3)	300	115.1742905
Line 3(3-4)	400	187.1470415
Line 4(4-5)	600	67.3184136
Line 5(5-6)	600	535.185964
Line 6(6-11)	300	116.0165515
Line 7(7-9)	350	375.047623
Line 8(7-8)	500	334.178041
Line 9(9-10)	400	183.9834485
Line 10(10-11)	300	16.0165515
Line 11 (1-5)	500	114.9896553
Line 12 (2-4)	300	302.321332
Line 13 (2-5)	700	235.0029184
Line 14 (4-7)	300	40.869582
Line 15 (4-9)	500	415.917205
Line 16 (6-12)	400	231.0062068
Line 17 (6-13)	600	262.0124136
Line 18 (9-14)	400	406.9813795
Line 19 (12-13)	500	31.0062068
Line 20 (13-14)	500	93.0186205

표 9와 표 10은 앞의 사례연구 표 3과 표 4의 과정을 보인다.

표 11 결과값 ($E_s=10^{-5}$, $M=10^5$, $\rho=0.99$)

Table 11 Computational Results

	MINOS5 (Iter=31)	ASM (Iter=18)	Error(%)
P_{g1}	600.000000	599.999876	2.0667E-05
P_{g2}	444.660494	444.661310	0.00018351
P_{g3}	230.493827	230.492946	0.00038222
P_{g4}	300.000000	299.999981	6.3333E-06
P_{g5}	274.845679	274.846042	0.00013207
θ_1	0.01308796	0.013087961	7.6406E-06
θ_2	0.01123765	0.011237655	4.4493E-05
θ_3	0.01054012	0.010540117	2.8463E-05
θ_4	0.00823765	0.008237653	3.5204E-05
θ_5	0.00893827	0.008938270	1.1188E-06
θ_6	0.00368981	0.003689814	0.00011112
θ_7	0.00748611	0.007486112	3.0724E-05
θ_8	0.01023457	0.010234574	3.9083E-05
θ_9	0.00398611	0.003986110	2.5087E-06
θ_{10}	0.00222068	0.002220679	4.9534E-05
θ_{11}	0.00245525	0.002455247	0.00012219
θ_{12}	0.00135185	0.001351852	0.00013315
θ_{13}	0.00101389	0.001013889	0.00011836
θ_{14}	0.00000000	0.00000000	0.00000000

표 11은 ASM을 이용한 Modified IEEE 14 Bus 시스템의 DC-OPF 결과값을 나타낸다. 허용오차 ϵ_s 는 10^{-5} , M 은 10^5 , safety factor $\rho=0.99$ 로 사례연구를 하였다. MINOS5 결과와 비교해 볼 때 반복횟수에서는 MINOS5는 31번, ASM은 18번으로 ASM이 반복횟수에서 훨씬 더 적다는 것을 알 수 있다. 해의 수렴성을 알아볼 수 있는 백분율 오차에서는 P_{g3} 결과값의 백분율 오차가 3.22×10^{-4} (%)로 다른 해들의 오차율에 비해 가장 크지만, 전체적으로 볼 때 해의 수렴성면에서 MINOS5의 결과와 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 최적조류계산 문제를 풀기 위해 Affine Scaling Interior Point Method를 제안하였고, 적절한 초기값 선정과 해의 수렴성을 위해 Big-M Method를 이용하였다. 또한, 2개의 사례연구를 통해 제안된 기법에 대한 타당성을 검증하였다.

본 논문에서는 비교적 작은 계통(IEEE 6, 14 Bus)의 시스템을 이용하였지만, 100 Bus 이상의 다양한 계통 시스템을 통한 제안된 기법의 검증이 좀더 필요하다 할 수 있고, 본 연구에서는 목적함수를 제외한 제약식들이 선형함수로 구성된

선형계획법 문제를 해결하였지만, 실제 전력시스템의 문제는 비선형함수의 문제이기 때문에 본 논문에서 제안하는 최적화 기법을 비선형계획법으로 확장을 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(02-전-01) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] 김발호, "Interior Point Method를 이용한 최적조류계산 알고리즘 개발에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2005.
- [2] Balho H. Kim and Ross Baldick. "Coarse-grained distributed optimal power flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 2, 1997, pp. 932-939.
- [3] K. Ponnambalam, V.H. Quintana and A. Vannelli, "A Fast Algorithm for Power System Optimization Problems Using an Interior Point Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 2, 1992, pp. 892-899.
- [4] Sergio Granville. "Optimal reactive dispatch Through interior point methods", IEEE Transactions on Power Systems, 9(1): 136-146, February 1994.
- [5] N. K. Karmarkar. "A new polynomial-time algorithm for linear programming," Combinatorics, vol.4, pp.273-295, 1984.
- [6] Ronald E. Miller, "Optimization", JOHN WILEY & SONS, INC, pp. 491-510, 2000.
- [7] Ronald L. Rardin, "Optimization in Operations Research", Prentice-Hall International, Inc., pp. 251-274, 1998.
- [8] 류연선 외, "최적설계입문", 인터뷰전, pp.241-242, 1994
- [9] B. A. Murtagh and P. E. Gill, "GAMS The solver Manuals", GAMS Development Corporation, pp. 181-210, 2004.

저 자 소 개



김 경 민 (金 耿 民)

1978년 9월 13일생. 2004년 홍익대학교 전기 전자제어공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사 과정

Tel : 02-320-1110, Fax : 02-320-1110

E-mail : kkm2176@hanmail.net



한 석 만 (韓 錫 萬)

1976년 12월 5일생. 2002년 홍익대 전자전기 공학부 졸업. 2004년 동 대학원 전기정보제 어공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사 과정

Tel : 02-338-1621 Fax : 02-320-1110

E-mail : hseokman@gmail.com



정 구 형 (鄭 求 亨)

1974년 9월 20일생. 2001년 홍익대학교 전기 전자제어공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 02-338-1621, Fax : 02-320-1110

E-mail : ga3310401@wow1.hongik.ac.kr



김 발 호 (金 發 鎬)

1962년 7월 12일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학). 1999년~현재 홍익대학교 전자전기제어공학부 부교수

Tel : 02-320-1462, Fax : 02-320-1110

E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr