

Environmentally Constrained Economic Dispatch In Thermal Power System

金宰徹* · 白榮植** · 宋敬彬*** · 金滄守§
(Jae-Chul Kim · Young-Sik Baek · Kyung-bin Song · Chang-su Kim)

Abstract - This paper develops an efficient evolutionary programming based algorithm for solving the environmentally constrained economic dispatch problem in thermal power system. The proposed algorithm can deal with the power balance constraints and the emission constraints which are equality and inequality constraints, respectively. Numerical results show that the proposed algorithm can provide superior solutions within reasonable time through its application to a test system.

Key Words : CAAA, Power Balance, Emission, EP

1. 서 론

최근 들어 환경문제에 대한 관심이 높아지면서 전력 산출에 따른 오염원의 양을 규제하는 방안들이 광범위하게 진행되고 있다. 특히, 1990년대에 개정된 미국의 대기오염방지법 개정안인 CAAA(Clear Air Act Amendment)에서는 발전소에서의 대표적 오염원인 이산화황(SO_2)과 이산화질소(NO_2)의 배출량을 일정수준 이하로 규제하고 향후 21세기부터는 발전소의 모든 발전기들이 이의 적용을 받아야 한다고 명시되어 있다. 이에 더 나아가 최근에는 지구 온난화의 직접적인 원인이 되고 있는 이산화탄소(CO_2)의 배출량에 대해서도 관심이 높아지고 있는 실정이며 다른 모든 환경오염원에 대해서도 그 영향을 생각하지 않을 수 없게 되었다. 이에 환경 오염원의 배출량을 줄이기 위하여 여러 연구가 진행되고 있다. 먼저 오염원의 배출량이 적은 순서부터 차례대로 연료를 사용하는 Fuel Switching, 정화장치(Scrubber)의 설치, 노후, 낙후된 발전설비의 교체 등의 하드웨어적 방법이 있었으나 이러한 방법들은 설치, 운용하는데 있어서 수 많은 자본과 시간을 필요로 한다는 단점을 내포하고 있다.[1,2,3,4] 한편, 소프트웨어쪽으로도 환경오염원의 배출량을 목적함수로 하여 최소화하는 방법이 있으나 단지 오염원의 양만을 최소화하는데 그치고 그 결과로 높은 발전비용이 든다는 단점이 있다. 따라서 기존의 경제운용에

서 쓰이고 있는 발전비용의 최소화라는 목적함수에 출력상·하한 제약조건, 전력 수급 평형 제약조건 외에 환경오염에 결정적인 영향을 주는 오염원의 배출량에 대한 제약조건이 절실히 필요한 실정이다.

화력 계통에서의 경제 운용은 환경 오염원의 배출량 제약조건으로 인해 훨씬 더 복잡한 문제로 볼 수 있다. 각각의 환경 오염 물질의 특성은 대부분 비 선형이면서 그 특성이 제각기 다르며 이러한 문제들이 환경 제약을 고려한 경제운용의 복잡성(Complexity)과 비 단조성(Non-monotonicity)을 증가시킨다.[2,3] 언급한 문제들로 인해서 환경적 운용에 관한 초기의 방법들은 전역적(Global)이 아닌 국부적(Local)해를 구할 수밖에 없었고 더 나아가 Newton 방법과 같은 기울기 방법(Gradient method)들 또한 전역적 해를 구하는데 있어서 같은 문제점을 가지고 있어서 환경제약을 고려한 경제운용에 더욱 더 진보된 알고리즘 개발의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

진화 연산(Evolution Computation)은 다윈의 생물학적 진화 원리에 근거를 둔 탐색, 최적화 알고리즘으로서 자연계에서의 진화 원리를 구체화 하고 그 메카니즘을 소프트웨어로 디자인하고자 개발되었으며 확률론(Probabilistic), 통계학(Stochastic)적인 알고리즘으로 다른 탐색 방법에 비해 매우 강인(Robust)하다는 것이 큰 특징이라고 할 수 있다.[5,6,7,8] 또, 다른 탐색 방법이 한점(Single point)으로서 해를 찾는 것에 비해 진화 연산은 해의 집단(Population)을 가지고 병렬적인 탐색을 하여 해를 찾기 때문에, 국부적 탐색(Local search)이 아닌 전역적 탐색(Global search) 방법으로써 기존의 방법들에 비해 더욱 더 최적에 가까운 해를 찾을 가능성이 더 높다고 할 수 있다. 주어지는 목적함수에 대해서 미분, 연속성 등 어떤 제한된 가정에 구애받지 않고 단지 목적함수의 값(Fitness)만을 필요로 하기 때문에 계산상으로도 아주 간단하고 메모리의 절감, 수렴성 측면에서도 아주 강력한 특성을 가지고 있다.[5,6,7,8] 이러한 진화연산의 종류에는

* 正 會 員 : 慶北大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 慶北大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 啓明大 工學部 傳任講士

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究員 先任研究員

接受日字 : 2001年 1月 31日

最終完了 : 2001年 8月 30日

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA), 진화 프로그래밍(Evolution Programming, EP), 진화 전략(Evolution Strategy, ES), 유전자 프로그래밍(Genetic Programming, GP)등이 있으며 이 4 가지의 기본적인 알고리즘은 거의 비슷하다.

본 논문에서는 진화 연산의 한 종류인 진화 프로그래밍 기법을 이용하여 환경 제약을 고려한 화력 계통에서의 경제적 운용에 관한 알고리즘을 제시하였다. 각각의 환경 오염원을 경제운용의 목적함수와 유사하게 발전기의 출력에 관한 함수, 즉, 정방정식 형태로 표현하고 각각의 오염원에 대한 제한값을 부여하여 부등식 제약조건으로서 삼입을 하였다. 제안한 알고리즘을 사례계통에 대해 시뮬레이션을 수행하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 정식화

m개의 화력 발전기들로서 환경 제약을 고려한 화력 계통에서의 경제적인 운용에 관한 목적함수와 제약조건들을 다음에 나열하였다.

$$\text{Minimize } F_T = \sum_{s=1}^m \sum_{t=1}^{T_{max}} f(P_{st}) \quad (1)$$

$$f(P_{st}) = \alpha_s P_{st}^2 + \beta_s P_{st} + \gamma_s \quad (2)$$

F_T 는 일정기간(Tmax)동안 모든 화력 발전소에 드는 총 연료비를 말하며, $f(P_{st})$ 는 각각의 화력 발전기의 시간대별 출력에 따라 얻어지는 연료비용함수를 가리키고, $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$ 는 개개의 화력 발전기의 특성을 나타내어 주는 상수들의 미한다.

우선, 주어지는 시간대별 부하의 크기에 따라 각 발전기들의 출력이 배분되어야 하는 전력 수급 평형 제약조건(Power balance constraint)이 만족되어야 한다.[9.10]

$$\sum_{s=1}^m P_{st} = PD_t \quad (3)$$

PD_t 는 각각의 시간대별 부하를 의미하며 전력 손실에 관한 부분은 생략을 하여 고려하지 않았다. 또한, 각각의 발전기의 출력에는 상·하한 제약조건(Inequality Constraint)이 적용이 된다.

$$P_{s,Min} \leq P_{st} \leq P_{s,Max} \quad (4)$$

각각의 환경 오염원들은 목적함수와 같이 발전기의 출력에 따른 정방정식으로 표현을 하고 그 값이 주어지는 제한값보다 작아야 한다.[1,2,3,4]

$$\sum_{t=1}^{T_{max}} \sum_{s=1}^m E^i(P_{st}) \leq E_{Lim}^i \quad (5)$$

$$\text{where } E^i(P_{st}) = A_{s1}^i + A_{s2}^i P_{st} + A_{s3}^i P_{st}^2 \quad (6)$$

$E_{i, Lim}$ 은 i번째 환경 오염원에 대해 일정기간동안의 모든 화력 발전기에 주어지는 제한값(혹은 상한값)을 의미하며 i는 환경 오염원의 개수, $A_{s1}^i, A_{s2}^i, A_{s3}^i$ 는 연료비에 관한 발전기의 특성상수와 같이 환경 특성을 나타내어 주는 발전기

상수이다. 모든 환경 오염원들은 식 (5)와 같은 부등식 제약 조건으로써 고려될 수 있다.

2.2 제안한 알고리즘

환경 제약을 고려한 경제운용에 관한 진화 프로그래밍 알고리즘[5]을 그림 1에 제시하고 그 세부사항들을 다음에 나열하였다.

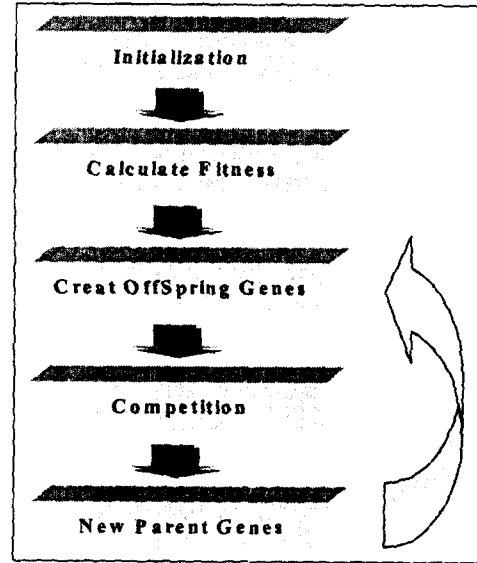


그림 1 진화 연산 알고리즘
Fig. 1 The EP Algorithm

A. Initialization(초기화 과정)

구하고자 하는 변수, 즉, 화력발전기들의 매 시간 출력(P_{st})들을 개체로 표현한 다음 각각의 개체에 주어지는 상·하한 제약조건 내에서 식 (7)과 같이 임의로 선택해서 초기화 한다.

$$P_{st}^{Pa} = P_{st, min} + P \times (P_{st, max} - P_{st, min}) \quad (7)$$

P_{st}^{Pa} : s 화력 발전기의 t 시간의 출력을 표현하는 부모(Parent) 유전자 개체

$$P: 0 \sim 1 \text{ 사이의 난수 } s = 1, 2, \dots, m$$

초기화 과정에서 만족해야 하는 제약조건은 다음과 같다.

1. 전력 수급 평형 제약조건(Power Balance Constraint)

주어진 화력 발전기중에서 출력 상·하한값의 범위가 가장 큰 발전기를 중속 발전기(DUnit)로 정한다음 주어진 부하에서 중속 발전기를 제외한 발전기들의 출력을 뺀 양을 중속 발전기의 출력으로 한다[식(8)]. 중속발전기에 대해서는 위의 식 (7)과정이 적용이 되지 않으므로 발전기의 출력 상·하한 제약조건이 위배되었을 경우에는 식 (7)을 이용하여 다시 초기화 과정을 제약조건을 만족할 때까지 수행한다.

$$P_{st}^{DUnit} = Load_t - \sum_{s \neq DUnit} P_{st} \quad (8)$$

2. 배출 제약조건(Emission Constraint)

배분된 발전기들의 출력으로써 식 (6)을 이용하여 배출량 ($E_{t,Old}^i$)을 계산하고 더하여 그 양(E_{Tot}^i)을 주어진 제한값과 비교한다. 제약조건을 위반했을 경우 다음과 같이 각각의 환경 오염원에 대한 제한값을 이용하여 시간에 따른 배출량($E_{t,New}^i$)을 구한다.

$$E_{t,New}^i = E_{Lim}^i \times \frac{E_{t,Old}^i}{\sum E_{t,Old}^i} \quad (9)$$

다시 이 각각의 배출량($E_{t,New}^i$)을 중속 발전기를 제외한 발전기에 따른 배출량($E_{s,New}^i$)으로 배분한다.

$$E_{s,New}^i = E_{t,New}^i \times \frac{E_{s,Old}^i}{\sum E_{s,Old}^i} \text{ for } s \neq DUnit \quad (10)$$

이와 같은 과정으로 해서 주어진 제한값을 각 발전기의 매 시간마다의 제한값으로 나눌수 있게 되며 이 값을 각각의 발전기의 매 시간의 오염원의 값과 비교하여 위반 될 경우 식 (10)의 값으로 고정하고 변화에 따른 출력의 변동분을 중속 발전기를 이용하여 조절한다. 고려하고자 하는 환경 오염원의 개수(i)가 N개일 경우 각각의 발전 비용함수가 비 선형일지라도 주어진 상·하한 범위 내에서는 선형으로 볼 수 있으므로 위반된 양이 가장 많은 환경 변수에 대해 위의 과정을 실행하여 식 (5)의 제약조건을 만족시키도록 한다.

B. Calculate Fitness(적합도 계산)

A 과정에서 얻어진 발전기들의 출력 값으로써 식 (2)를 이용하여 각각의 개체의 적합도 값을 구한다. 여기서 적합도(Fitness)는 발전기의 연료비, 즉, 목적함수의 값을 의미하며 발전기에서 실제 사용되고 있는 Piecewise quadratic cost curve같은 경우에 있어서도 제안한 알고리즘이 연속성의 제약조건이 불필요하므로 쉽게 이용될 수 있다.

C. CreatOffSpring(후손 유전자 생성)

부모 유전자 개체에 식 (11)과 같이 Gaussian random variable을 더해서 후손 유전자(OffSpring Genes)를 생성한 다음 후손 유전자들의 적합도 값을 구한다. 초기화과정과 마찬가지로 전력수급 평형, 배출제약조건을 만족하면서 후손 유전자를 생성시킨다.

$$P_{st}^{Off} = P_{st}^{Pa} + N(0, \sigma^2) \quad (11)$$

$$\sigma_s = \beta \times \frac{f_s}{f_{min}} (P_{s,Max} - P_{s,Min}) \quad (12)$$

where $N(0, \sigma^2)$: Gaussian random variable

β 는 스케일 상수이며 f_s 는 s 유전자 개체의 적합도 값을 의미한다.

D. Competition(경쟁)

부모 세대 N개의 집단과 후손 세대 N개를 합한 총 2N개의 집단에서 하나의 유전자개체를 선택해서 나머지 2N-1개

의 집단에서 N개를 임의로 선택한 후, 처음 선택한 것과 목적함수를 비교하여 몇 번 나은 목적함수의 값을 가지는지 그 횟수를 기억한다. 이 같은 과정을 총 2N개의 집단에 대해 수행하여 각각의 개체에 그 점수를 기록한다.

E. New Parent Genes(새로운 부모 유전자 개체)

각 유전자 개체마다 기록된 점수로부터 차례대로 많은 점수를 얻은 N개의 유전자 개체들을 다음 세대의 부모 유전자로 선택한다.

3. 사례 연구

제안한 알고리즘을 참고 문헌의 계통의 데이터[1]에 대해 다음의 4 가지의 경우에 대해 각각 시뮬레이션을 수행해 보았다.

Case A. 경제 운용(Economic Dispatch)

Case B. 이산화황(SO_2)의 제약조건을 고려한 경제운용

Case C. 이산화질소(NO_2)의 제약조건을 고려한 경제운용

Case D. 이산화황, 이산화질소의 제약조건을 고려한 경제운용

진화 프로그래밍에서 사용된 파라미터 값들을 표 1에 나타내었다.

표 1 진화 프로그래밍 파라미터

Table 1 The parameters of EP

개체 수	세대 수	스케일 상수(β)
30	1000	0.01

Case A. 경제 운용(Economic Dispatch)

환경제약을 고려하지 않은 순수한 경제 부하 배분을 실시하여 출력에 따른 환경 오염원의 총 배출량을 구하여 환경제약을 고려한 경우의 총 배출량과 비교하여 보았다. 그림 2에 경제 부하 배분에 관한 제안한 알고리즘의 수렴 특성을 나타내었다.

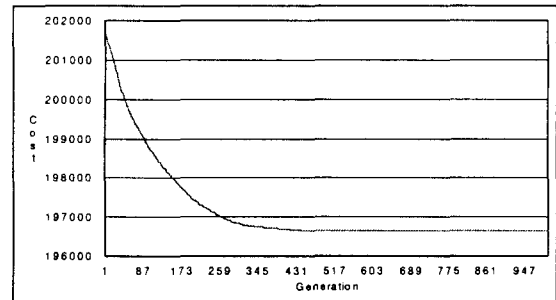


그림 2 수렴 특성 곡선(ED)

Fig. 2 The Convergence Characteristic Curve(ED)

Case B And Case C. SO_2, NO_2 각각을 고려한 경제운용

그림 3, 4는 환경 오염원을 각각 1가지씩 고려한 경우에 있어서 그 수렴 특성 곡선을 나타낸 것이다. Case A 과정(경제 운용)에서 환경 제약을 인가했을 때의 수렴 특성 곡선도 경제 운용의 것과 마찬가지로 수렴 특성이 좋음을 그림에서 알 수 있다.

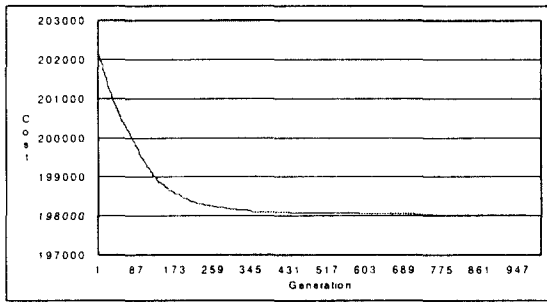


그림 3 수렴 특성 곡선(SO_2 고려)

Fig. 3 The Convergence Characteristic Curve (Considering SO_2)

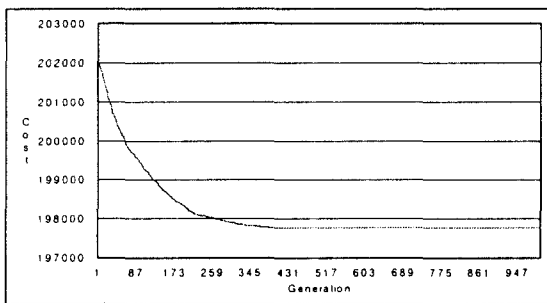


그림 4 수렴 특성 곡선(NO_2 고려)

Fig. 4 The Convergence Characteristic Curve (Considering NO_2)

Case D. SO_2, NO_2 를 동시에 고려한 경제적 운용

환경 오염원을 2개 이상 고려했을 경우 각각의 배출량은 위에서 정식화 부분에서 언급한 바와 마찬가지로 발전기의 출력에 따라 정방정식의 형태로 나타낼 수 있으며 이 중에서 주어진 제한값을 초과한 양이 가장 많은 오염원의 변수에 대해 식 (9), (10)을 적용을 하였다. 사례 계통의 데이터의 경우 SO_2 의 배출량의 초과량이 NO_2 의 초과량 보다 크기 때문에 SO_2 에 대해 언급한 식들을 적용을 하여 식 (5)로 표현된 환경 제약조건을 만족시켰다.

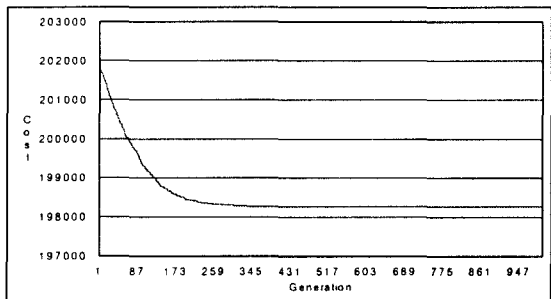


그림 5 수렴 특성 곡선(SO_2, NO_2 고려)

Fig. 5 The Convergence Characteristic Curve (Considering SO_2, NO_2)

표 2에 위에서 제시한 4가지 방법으로의 여러 수치적 결과를 나타내었다. 기존의 수치 해석적 방법의 경제 운용의 경우를 기준으로 하여 환경 변수의 결과 값들을 백분율로 표현하여 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 각각의 오염원의 배출량에 대한 제약을 인가함으로써 두 방법의 배출량 모두 경제운용의 경우의 배출량보다 더 개선되었다는 것을 퍼센테이지로써 쉽게 알 수 있으며, 발전 비용면에 있어서는 환경 제약 조건을 고려할 경우에 제안한 알고리즘에 의한 경제 운용이 수치 해석적인 방법보다 더욱 더 최적의 비용으로 경제운용을 수립할 수 있었다. 표 3은 제안한 방법으로의 수행 시간 결과를 나타내었다. 주목할 것은 표현된 시간이 주어진 세대수(1000세대)까지 수행했을 경우의 시간을 말하며 위에서 제시한 수렴 특성 곡선의 수렴 세대가 평균적으로 350세대로 가정을 하면 수렴에 도달하는데 걸리는 시간은 훨씬 더 빠르다는 것이다.

표 2 제안한 방법의 수치 결과(N. M : Numerical Method)

Table 2 The Results of Proposed Algorithm

Method	Cost	SO_2	SO_2	NO_2	NO_2
	\$	TONS	%	TONS	%
N. M(A)	196,422.90	72.904	100	19.104	100
Proposed(A)	196,486	72.8567	100	18.9188	100
N. M(B)	199,729.80	72.202	99.037	18.143	94.969
Proposed(B)	197,945	72.1979	99.096	18.0763	95.5467
N. M(C)	198,806.80	72.613	99.6	17.563	91.934
Proposed(C)	197,649	72.6149	99.676	17.5647	92.8425
N. M(D)	199,425.60	72.195	99.027	17.563	91.934
Proposed(D)	198,198	72.1979	99.096	17.5659	92.8489

표 3 제안한 알고리즘의 수행 시간

Table 3 The Simulation Time of Proposed Algorithm

CASES	수행 시간 [sec]
CASE A	5.57
CASE B	6.21
CASE C	6.15
CASE D	9.46

4. 결 론

화력 계통에서 환경 제약을 고려한 경제적, 최적의 운용에 관하여 진화 프로그래밍 기법을 이용하여 사례 계통에 대해 적용, 검증하였다. 기존의 경제운용에 환경 오염원을 발전기의 출력에 따른 정방정식의 형태로 표현한 다음 부등식 제약조건으로 삽입하여 제안한 알고리즘을 이용하여 용이하게 처리하였다. 기존의 복잡하고 수렴성이 어려운 문제들을 미분 가능, 연속성의 조건이 필요 없고 단지 목적함수의 값만을 필요로 하는 진화 연산기법을 이용하여 최적의 수렴성을 보장하였다. 사례 계통에 대해 제안한 알고리즘을 적용하여 본 결과 주어진 제약조건하에서 기존의 수치 해석적 방법보다 발전비용, 환경 오염원의 배출량 등에 있어서 최적의 해를 구하여 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] David B. Fogel and Lawrence J. Fogel, "Guest Editorial Evolutionary Computation", IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 5, No. 1, pp. 1-14, January 1994.
- [2] David B. Fogel, "An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization", IEEE TNN, Vol. 5, No. 1, pp. 3-11, 199
- [3] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Springer-Verlag, Third. Revised and Extended Edition. 1995.
- [4] Baeck, Thomas, "Evolutionary Algorithms in Theory and practice : Evolution Strategise, Evoutionary Programming", Madison Avenue, NY, 1996
- [5] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [6] IJNAGRATH, DPKOTHARI, "Power System Engineering", Tata McGraw-Hill Publishing Company, 1994, pp. 273-338.
- [7] M. E. El-Hawary and G.S. Christensen, "Optimal Economic Operation of Electric Power Systems", Academic Press, New York, 1979.
- [8] 포항종합제철주식회사, 광양제철소, "발전송풍 운전교재", 1986. 11.

저 자 소 개



김재철 (金宰徹)
 1972년 1월 2일 생. 1995년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 053-950-5602, Fax : 053-950-6600
 E-mail : kjc@palgong.knu.ac.kr



송경빈 (宋敬彬)
 1963년 9월 15일 생. 1986년 연세대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 텍사스 A&M 전기공학과 졸업(공학). 1995년-1996년 LG-EDS 시스템 전문과장. 1996년-1998년 한전전력연 구원선임연구원. 1998년-2000년 대구효성가톨릭대 전임강사. 현재 계명대 공학부 전임강사.
 Tel : 053-580-5926
 E-mail : kbsong@kmu.ac.kr



백영식 (白榮植)
 1950년 7월 8일 생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1977년 명지대 공대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전자전기공학부

교수.
 Tel : 053-950-5602
 E-mail : ysbaek@bh.kyungpook.ac.kr



김창수 (金滄守)
 1960년 7월 28일 생. 1987년 2월 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 2월 동 대학원 박사과정 수료. 1989년~1994년 한국전기연구소 연구원. 1994년~현재 한국 전기연구원 선임연구원.
 Tel : 055-280-1183
 E-mail : cskim@keri.re.kr