

Valve-Point 효과가 고려된 경제급전 문제에서의 DS알고리즘에 관한 연구

(Differential Search Algorithm for Economic Load Dispatch with Valve-Point Effects)

박시나* · 최병주 · 김규호 · 이상봉**

(Si-Na Park · Byung-Ju Choi · Kyu-Ho Kim · Sang-Bong Rhee)

Abstract

This paper presents an Differential Search(DS) Algorithm for solving the economic load dispatch(ELD) problems with Valve-Point loading constraints. DS algorithm simulates the Brownian-like random-walk movement used by an organism to migrate. Numerical results on a test system consisting of 13 units show that the proposed approach is faster, more robust and powerful than conventional algorithms. Case studies show the simulation results are better than Lagrange method, the Hopfield neural networks and GA.

Key Words : Differential Search Algorithm, Economic Load Dispatch, Optimization, Power System Control and Operation, Valve-Point Effects

1. 서 론

경제급전(Economic Load Dispatch : ELD) 문제는 전력계통에서 중요한 최적화 문제 중의 하나이다. 경제 급전 문제 해석을 위해서는 각 발전기 당 발전량에 대해 2차로 근사화된 비용 함수를 목적함수로 사용하

여 여러 제약조건들을 고려하면서 목적 함수를 최소화하는 방향으로 문제를 해결한다. 그러나 화력 발전기의 실제 입출력 특성은 'valve point' 효과에 기인하여 더욱 복잡하고 난해한 비선형 문제를 포함하여, 2차 함수 근사로는 경제급전에서의 실제적인 최적 값은 찾기가 어렵다[1]. 또한 높은 비선형성과 불연속성 때문에 기존의 라그랑지 승수를 사용하는 방법으로는 그 해를 구하기가 어려웠다. 따라서 'valve point' 효과가 고려된 경제급전 문제를 풀기 위해 자연현상을 이용한 다양한 경험적, 확률론적 탐색에 기반을 두고 있는 GA(Genetic Algorithm), 인공지능을 이용한 신경망등이 전력 시스템의 ELD 문제를 해결하기 위해 제안되었다[2-3]. GA는 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)라는 연산을 통해 전력 시스템의 최적화 문제를 좀 더 효율적으로 해결하

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
* Main author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Ph.D Candidate
** Corresponding author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Professor
Tel : 053-810-3097, Fax : 053-810-4767
E-mail : rrsd@yu.ac.kr
접수일자 : 2014년 4월 12일
1차심사 : 2014년 4월 16일
심사완료 : 2014년 6월 16일

기 위해 사용되며, 적은 계산으로 연산이 복잡하고 미분이 불가능한 함수의 최적값을 구하는데 유용하게 사용되어져 왔다. PSO(Particle Swarm Optimization) 역시 효율적인 경험적 알고리즘 중 하나로, 더 짧은 시간 내에 정확한 solution을 제공하며 다른 통계적 방법보다 안정적으로 수렴하는 특성을 지닌다. 그러나 이런 알고리즘은 수렴시간의 제약, 정확성, 알고리즘의 복잡성을 처리하는 면에 있어서 여러 가지 문제점을 가지며, 전역적인 최적해에 근사된 해를 구하는 것이 힘들다는 단점이 있었다[4-7]. DS(Differential Search) 알고리즘은 최적해 탐색에 있어서 기존의 다른 알고리즘과는 달리 한 개 이상의 개체를 동시에 사용할 수 있고, 유사 최적해중에서 전역 최적해를 선별하는 직진성 특성으로 multi-modal 함수들의 해법을 위한 성공적인 탐색 전략을 지니고 있다[8].

본 논문에서는 2차함수로 근사화된 비용함수를 갖는 'valve point' 효과가 고려된 경제급전 문제에 최근에 제안된 DS 알고리즘을 적용하여 최적 값을 분석하고 개선된 GA의 최적 값과 비교하였다.

2. Differential Search Algorithm

DS는 최적화 문제의 해를 위해 개발된 알고리즘으로 이주하는 생물의 유사 브라운 운동 형태의 임의보행(random-walk)을 모의하여 개발된 알고리즘이다. 일정 지역의 생태계 안에 존재하는 먹이와 개체 수용용량은 연중 주기적 기후변화로 인해 변화하게 되고 이때, 생물들은 최적의 생활환경을 위해 연중 계절적 이주 행위를 보인다. 이주 행위는 생물들이 자연 자원의 수용능력과 다양성이 감소한 서식지로부터 더욱 효율적인 서식지로 이주할 수 있도록 해준다. 자연 속에서 많은 종류의 생물들은 주기적 이주 사이클을 보이고, 그 과정에서 이주하는 생물종들은 수많은 개체를 포함하는 초개체(super-organism)를 이룬다. 만약 이주를 위해 관리된 한 지역의 잠재력이 그 순간 이 초개체의 필요를 충족한다면, 초개체는 한 동안 새로운 서식지에 정착하고 더욱 비옥한 지역들을 찾기 위한 탐색을 반복하면서 이주를 지속한다. DS 알고리즘에서는 각 문제에 대한 임의적 해법들 전체는 인위적

초개체의 이주에 대응한다고 가정한다. 이주를 하는 동안 인위적 초개체는 몇몇 무작위로 선택된 위치들이 이주를 하는 동안 적절한지를 검사한다. 만약 검사된 위치가 일시적인 시간 동안 머무르기에 적합하다면, 인위적 초개체를 이루는 개체들은 즉시 그곳에 정주한 이후 그곳으로부터 또 다른 곳으로의 이주를 계속하게 된다. DS 알고리즘은 이러한 이주행위를 모델링한 것이다. DS 알고리즘의 전반적 계산 순서는 다음과 같다[8].

Step 1. 문제 초기화

a) 최적화 하고자 하는 문제의 목적함수, 제약함수를 식 (1)과 같이 정식화한다.

Minimize : $y(i)$

subject to : $X_{i,\min} \leq X_i \leq X_{i,\max}$ (1)

b) 초개체의 크기(D), 최대 개체수(G)를 결정한다.

Step2. Super-organism 초기화

초개체는 인공 유기체(artificial-organism)로 구성되며 각각의 인공 유기체들은 식 (2)와 같이 랜덤함수를 이용하여 초기화한다.

$X_i = x_{ij}, i = \{1, 2, 3, \dots, N\}, j = \{1, 2, 3, \dots, D\}$

$x_{ij} = rand \cdot (up_j - low_j) + low_j$ (2)

Step3. StopoverSite 구성

초개체의 초기값은 Stopover-Site를 구성하게 되고 감마 난수 생성기(Gamma random number generator)와 랜덤 함수를 이용하여 반복 계산되어지며 초개체와 비교하여 최적해 여부를 판별한다. Stopover-Site 개선 방법의 Pseudo code는 다음과 같다.

- $donor = SuperorganismRandom_Shuffling(i)$
- $Scale = randg[2 \cdot rand_1] \cdot (rand_2 - rand_3)$
- $StopoverSite = Superorganism + Scale \cdot (donor - Superorganism)$

Step4. Super-organism 개선 및 종료

전 단계에서 새롭게 계산되어진 StopoverSite는 초개체와 비교하여 최적해의 개선이 있는 경우 초개체로 저장되고 그렇지 않은 경우 전 단계의 계산을 반복한다. 그리고 미리 정한 반복계산 수(G)에 따라 계산을 종료한다. 그림 1은 DS 알고리즘의 순서도이다.

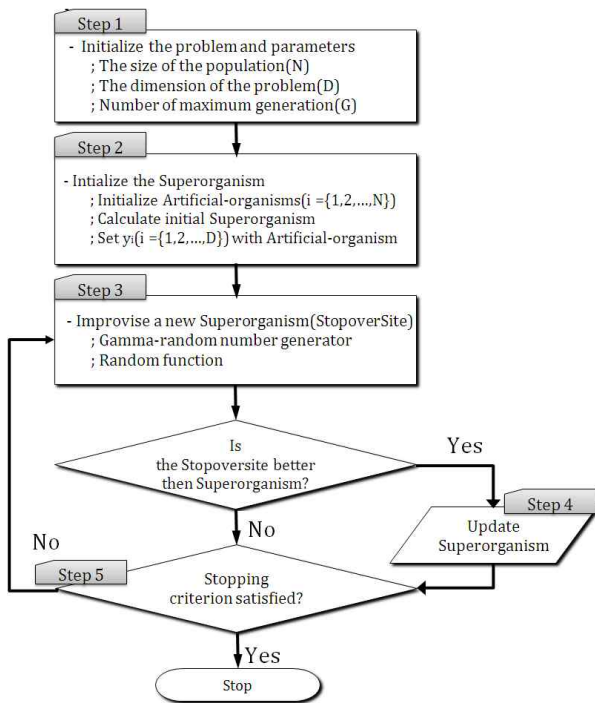


그림 1. DS 알고리즘 순서도
Fig. 1. Flowchart of DS Algorithm

3. Valve-Point 효과가 고려된 경제 급전 문제의 적용

3.1 경제급전

경제 급전의 주된 목적은 계통운영에 있어 각 발전기 발전비용의 총합을 최소화 하는 것이다. 각각의 발전기는 최소 및 최대 전력 출력 사이에서 동작해야 하며, 총 생산량은 전체 시스템 요구 부하와 동일해야 한다. DS 알고리즘을 경제급전 문제에 적용하기 위하여 비용함수를 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\text{Minimize} : C = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi})$$

$$\text{Subject to} : \sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D + P_L \tag{3}$$

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} P_i P_j$$

$$P_{Gi(\min)} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi(\max)}$$

C = 총 비용 함수

C_i = 발전기 i 에 대한 비용 함수

P_{Gi} = 발전기 i 의 출력, n = 발전기 수

P_D = 현계통의 부하, P_L = 계통의 전체 손실

B = B 계수 (손실계수)

$P_{G(\min)}$ = 발전기 i 의 최소 출력

$P_{G(\max)}$ = 발전기 i 의 최대 출력

발전비용함수는 2차 함수 근사에 의해 식 (4)와 같으며 a, b, c 는 발전기의 비용계수이다.

$$C = a + bP_{Gi} + cP_{Gi}^2 \tag{4}$$

3.2 Valve-Point 효과를 고려한 경제급전

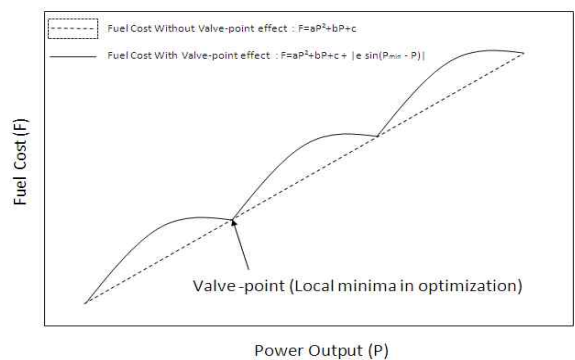


그림 2. Valve-Point 효과
Fig. 2. The valve-point loading effect

증기 흡입밸브가 열리기 시작할 때 발생하는 손실의 급작스런 증가로 인하여 생기는 결과를 Valve-Point 효과라 한다[9]. 그림 2는 화력발전기의 입출력 특성

곡선을 나타내고 있다. 실선은 Valve-Point효과를 고려한 입출력 특성 곡선이다.

Valve-Point 효과를 고려하기 위해 여러 모델들이 제시되었다. 최적화의 관점에 따라 제시된 모델들은 두 가지로 분류된다. 하나는 출력의 제한 작동 구역과 관련된 부등식 제약 조건으로 고려되며, 다른 하나는 출력 연료비용에 이러한 효과를 정류된 정현파 성분을 고려하여 구성하는 방법이다. 본 논문에서는 정류된 정현파 성분을 고려하여 수식화 하였다. 따라서 발전기의 연료 비용 함수는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$C_i = C + |e_i \cdot \sin(f_i \cdot (P_{G(\min)} - P_i))| + PF \cdot \text{abs} \left[\left(\sum_{i=1}^n P_i \right) - P_D - P_L \right] \quad (5)$$

등식제약 조건인 부하량을 만족하기 위하여 비용함수에 페널티함수로 처리하여 하나의 목적함수로 구성하여 DS 알고리즘을 적용하였다. 여기서 PF는 비용으로 처리된 penalty factor이고, e, f는 발전기 특성에 따른 계수이다. DS 알고리즘은 2개의 control parameter (P_1, P_2)에 의해 수렴성에 영향을 받는데 가장 적합한 값을 결정하기 위해 디테일한 테스트가 실시되었고, $P_1=0.3 \cdot \text{rand}$ 와 $P_2=0.3 \cdot \text{rand}$ 일 때 각각의 문제에 대한 최상의 솔루션을 제공하는 것을 볼 수 있다[8]. 본 논문에서는 두 값 모두 $0.3 \cdot \text{rand}$ 를 사용하여 3기, 6기, 13기 계통에 적용하고 결과를 기존의 최적해와 비교하였다.

4. 사례연구

4.1 CASE1(3기 시스템)

선로 손실을 고려하지 않은 3개의 발전기가 있는 시스템에 적용하였다. 각 발전기의 데이터는 표 1과 같고 부하는 850MW로 가정하였다.

DS 알고리즘을 적용한 결과는 표 2와 같다. 홉필드 신경회로망과 비교하였을 때 발전비용이 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다.

표 1. 3기 발전기 데이터
Table 1. Generator data(3 Units)

Unit	a	b	c	P_{\min} [MW]	P_{\max} [MW]
P1	561	7.92	0.001562	150	600
P2	310	7.85	0.00194	100	400
P3	78	7.97	0.00482	50	200

표 2. 3기 시뮬레이션 결과
Table 2. Three generator simulation results

방법	P1	P2	P3	총비용(\$)
홉필드 신경회로망	393.4666	334.2388	122.2946	8194.3565
Lagrange multiplier	393.1699	334.6037	122.2264	8194.3561
DS	393.1700	334.6122	122.2178	8194.3561

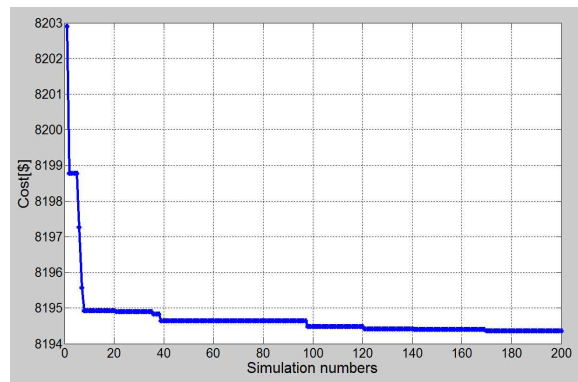


그림 3. 발전 비용변화(3 units)
Fig. 3. Generation cost(3 units)

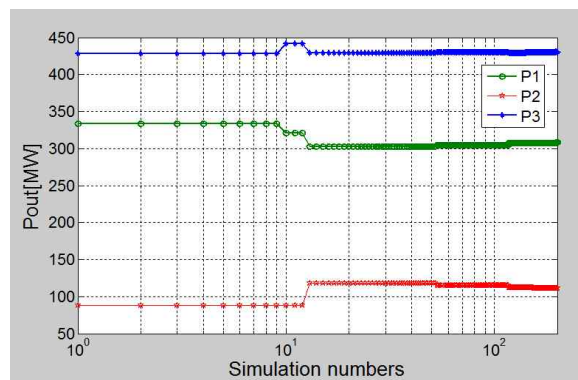


그림 4. 발전기 출력(3 units)
Fig. 4. Generator output(3 units)

그림 3은 발전기의 비용변화 결과이다. 평균 수렴 속도가 200회 내외로 최소 비용에 수렴하는 결과로 알고리즘의 빠른 계산속도를 확인할 수 있다.

그림 4는 발전기별 출력을 나타낸다. 발전기별 최소 비용이 되는 출력 값을 빠르게 찾아 가는 것을 확인할 수 있다.

4.2 CASE2(6기 시스템)

DS 알고리즘을 이용하여 선로 손실을 고려하지 않은 6개의 발전기가 있는 시스템에 적용하였다. 각 발전기의 데이터는 표 3과 같으며 전력수요는 300MW로 가정하였다.

표 3. 6기 계통 시스템 발전기 데이터
Table 3. Generator data(6 units)

발전기	a	b	c	$P_{min} [MW]$	$P_{max} [MW]$
P1	0	2	0.00375	50	200
P2	0	1.75	0.0175	20	80
P3	0	1	0.0625	15	50
P4	0	3.25	0.00834	10	35
P5	0	3	0.025	10	30
P6	0	3	0.025	12	40

DS 알고리즘을 적용한 결과는 표 4와 같다. 라그랑지 승수법과 비교하였을 때 발전비용이 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다.

표 4. 6기 시뮬레이션 결과
Table 4. Six generator simulation results

발전기	홉필드 NN	Lagrange	DS
P1	195.3465	196	195.8992
P2	49.1069	49.1	49.1469
P3	19.7499	19.8	19.7614
P4	13.3431	13.1	13.1925
P5	10.1061	10.0	10.0
P6	12.0006	12.0	12.0
총비용(\$)	824.5868	824.5830	824.5827

그림 5는 발전기의 비용변화를 출력한 결과이다. 평균 수렴 속도가 300회 내로 최소 비용을 찾는 결과로 알고리즘의 빠른 수렴성을 확인할 수 있다.

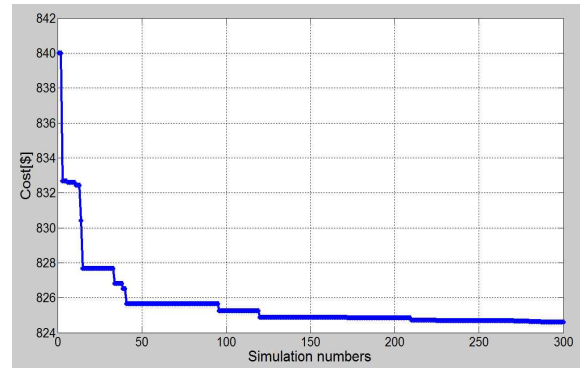


그림 5. 발전 비용변화(6 units)
Fig. 5. Generation cost(6 units)

그림 6은 발전기별 출력을 나타낸다. 발전기별 최소 비용이 되는 출력 값을 빠르게 찾아 가는 것을 확인할 수 있다.

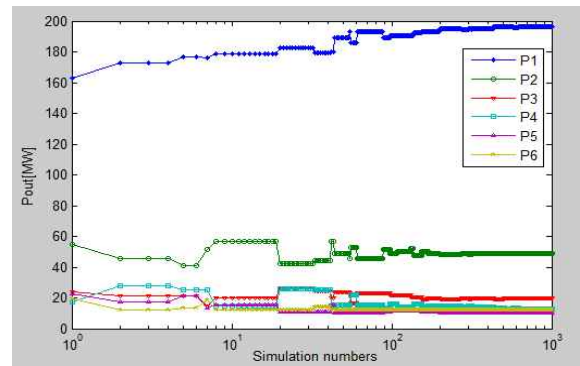


그림 6. 발전기 출력(6 units)
Fig. 6. Generator output(6 units)

4.3 CASE3(13기 시스템)

Valve-Point 효과를 고려한 13개의 발전기가 있는 시스템에 적용하였다.

각 발전기의 데이터는 표 5와 같으며 전력수요는 2,520MW로 가정하였다.

DS 알고리즘을 적용한 결과는 표 6과 같다. 개선된

GA와 비교하였을 때 발전비용이 상대적으로 낮고 수렴 속도도 좋은 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 발전기의 비용변화를 출력한 결과이다.

표 5. 13기 계통 시스템 발전기 데이터
Table 5. Generator data(13 units)

발전기	a	b	c	e	f	P_{min} [MW]	P_{max} [MW]
P1	550	8.1	0.00028	300	0.035	0	680
P2	309	8.1	0.00056	200	0.042	0	360
P3	307	8.1	0.00056	200	0.042	0	360
P4	240	7.74	0.00324	150	0.063	60	180
P5	240	7.74	0.00324	150	0.063	60	180
P6	240	7.74	0.00324	150	0.063	60	180
P7	240	7.74	0.00324	150	0.063	60	180
P8	240	7.74	0.00324	150	0.063	60	180
P9	240	7.74	0.00324	150	0.063	60	180
P10	126	8.6	0.00284	100	0.084	40	120
P11	126	8.6	0.00284	100	0.084	40	120
P12	126	8.6	0.00284	100	0.084	55	120
P13	126	8.6	0.00284	100	0.084	55	120

표 6. 13기 시뮬레이션 결과
Table 6. Thirteen generator simulation results

	개선된IGA	개선된 GAA	DS
총비용(\$)	24,305.54564	24,276.20582	24,131.3361
수렴속도	10,000내외	10,000내외	2,000내외

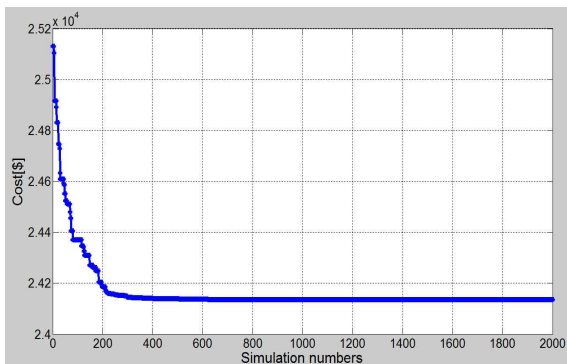


그림 7. 발전 비용변화(13 units)
Fig. 7. Generation cost(13 units)

5. 결 론

본 논문에서는 Valve-Point 효과를 고려한 경제 급전 문제에 DS 알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션 결과는 DS 알고리즘이 다른 방법과 비교했을 때 더 정확한 솔루션을 얻을 수 있고 ELD의 총 비용함수가 절감된다는 것을 확인할 수 있다. DS 알고리즘은 최적해 탐색을 위한 코딩이 간단하며, 수렴속도가 타 알고리즘과 비교하여 우수함을 사례연구를 통해 확인하였다. DS 알고리즘의 다기계통적용과 기타 제약식을 포함하는 문제의 적용을 위해서는 보다 정확한 내부 파라미터 결정방법에 관한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 향후 연구로는 본 논문의 결과를 바탕으로 다양한 여러 제약조건들을 고려한 경제급전에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] A.J.Wood, and B.F.Woolenberg, Power Generation, Operation and Control, Wiley, New York, 1984.
- [2] D. B. Fogel, Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence, 2 ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [3] K. S. Swarup and S. Yamashiro, "Unit commitment solution methodology using genetic algorithm," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 17, pp.87-91, Feb. 2002.
- [4] T. Jayabarathi, K. Jayaprakash, N. Jeyakumar, and T. Raghunathan, "Evolutionary programming techniques for different kinds of economic dispatch problems," Elect. Power Syst. Res., Vol. 73, No. 2, pp.169-176, Feb. 2005.
- [5] Zue-Lee Gaing, "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints," IEEE Trans. on Power System, Vol. 18, No.3, pp. 1187-1195, Aug. 2003.
- [6] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol. IV, pp. 1942-1948, 1995.
- [7] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput., pp. 69-73, May 1998. R. Boyce, Human Factors in Lighting, 2nd Edition, Lighting Research Center, 2003.
- [8] P. Civicioglu, "Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm," Computers & Geosciences, Vol. 46, pp. 229-247, 2012.
- [9] D. C. Walter and G. B. Sheble, "Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading," IEEE Trans. on PWRS, Vol.8, No. 3, pp. 1325-1332, Aug. 1993.

◇ 저자소개 ◇



박시나(朴恃拏)

울산대학교 전기및컴퓨터공학과 졸업.
2006년 동대학원 전기전자정보시스템공학과 졸업(석사). 현재 영남대학교 전기공학과 박사과정.



최병주(崔炳柱)

1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Kyushu대학 대학원 공학연구과 졸업(박사). 1982~1986년 현대중전기(주)기술연구소 연구원. 1986~1997년 한국전기연구원 선임연구원. 1997~2009년 서라벌대

고속전기철도과 부교수. 2014년~현재 영남대학교 전기공학과 조교수.



김규호(金圭浩)

1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 3월 안산공과대학 전기과 부교수. 2008년 9월~현재 국립환경대학교 전기공학과 부교수.



이상봉(李相奉)

1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012년~현재 영남대학교 전기공학과 조교수.