

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.4.243

IIBC 2014-4-34

이차 발전비용함수를 사용한 경제급전문제의 균형-교환 최적화

Balance-Swap Optimization of Economic Load Dispatch Problem using Quadratic Fuel Cost Function

이상운*

Sang-Un Lee*

요약 본 논문은 이차 발전비용 함수를 적용하는 경제급전의 최적화 문제에 대한 균형-교환 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 초기치 $P_i \leftarrow P_i^{\max}$, ($\sum P_i^{\max} > P_d$)에 대해 $\sum P_i = P_d$ 일 때까지 $\max\{F(P_i) - F(P_i - \alpha)\}$, $\alpha = \min(P_i - P_i^{\min})$ 인 발전기 i 의 출력량을 $P_i \leftarrow P_i - \alpha$ 로 균형과정을 수행하고, 교환과정은 $\max\{F(P_i) - F(P_i - \beta)\} > \min\{F(P_j + \beta) - F(P_j)\}$, $i \neq j$, $\beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$ 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - \beta$, $P_j \leftarrow P_j + \beta$ 로 수행하였다. 제안된 방법을 15, 20과 38-발전기 사례에 적용한 결과 간단하면서도 항상 동일한 결과가 가장 좋은 결과를 나타내었다. 또한, 73-발전기를 통합하여 경제급전을 수행한 결과 독립적으로 운영하는 경우에 비해 발전비용을 현저히 절감할 수 있음을 보였다.

Abstract In this paper, I devise a balance-swap optimization (BSO) algorithm to solve economic load dispatch with a quadratic fuel cost function. This algorithm firstly sets initial values to $P_i \leftarrow P_i^{\max}$, ($\sum P_i^{\max} > P_d$) and subsequently entails two major processes: a balance process whereby a generator's power i of $\max\{F(P_i) - F(P_i - \alpha)\}$, $\alpha = \min(P_i - P_i^{\min})$ is balanced by $P_i \leftarrow P_i - \alpha$ until $\sum P_i = P_d$; and a swap process whereby $\max\{F(P_i) - F(P_i - \beta)\} > \min\{F(P_j + \beta) - F(P_j)\}$, $i \neq j$, $\beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$ is set at $P_i \leftarrow P_i - \beta$, $P_j \leftarrow P_j + \beta$. When applied to 15, 20, and 38-generators benchmark data, this simple algorithm has proven to consistently yield the best possible results. Moreover, this algorithm has dramatically reduced the costs for a centralized operation of 73-generators - a sum of the three benchmark cases - which could otherwise have been impossible for independent operations.

Key Words : Economic load dispatch, Optimization, Balance, Swap, Centralized operation

1. 서론

주어진 시간대의 부하 P_d 를 공급할 수 있도록 발전비용이 각각 다른 n 대의 발전기 출력 P_i , $i = 1, 2, \dots, n$ 을 각각 어떻게 배분해야 전체 발전비용(생산비용)이 가장 경제적인가를 결정하는 과정을 경제부하배분(economic load dispatch, ELD) 또는 간단히 경제급전(economic

dispatch, ED)이라 한다.^[1] 2005년 기준 우리나라의 전력 시장 정산금액 17조원 중 경제급전 정산금액은 약 8조원으로 알려져 있다. 따라서 경제급전은 전력산업에 있어서 가장 중요한 최적화 문제 가운데 하나이다.^[1-10]

n 개의 발전기는 각기 다른 발전량 P_i , $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 를 가지고 있으며, 발전비용은 $F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$ 또는 $F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i| \times \sin(f_i \times (P_i^{\min}$

*정회원, 강릉원주대학교 과학기술대학 멀티미디어공학과
접수일자 : 2014년 04월 24일, 수정완료 : 2014년 7월 8일
게재확정일자 : 2014년 8월 8일

Received: 15 April, 2014 / Revised: 8 July, 2014 /
Accepted: 8 August, 2014

*Corresponding Author: sulee@gwnu.ac.kr
Dept. of Multimedia Eng., Gangneung-Wonju National University,
Korea

$-P_i$) 중 하나를 적용한다.^[7]

경제급전 최적화와 관련된 기존 알고리즘들은 대부분 수학적 최적화 기법인 라그랑주 완화법 (lagrangian relaxation), 경사법 (gradient method), 감소된 경사법 (reduced gradient method)이나 인공지능 기법인 유전자 알고리즘, 신경망, 퍼지, 군집 알고리즘 등 비결정적이며, 휴리스틱 알고리즘을 적용한다.^[7] 그러나 휴리스틱 알고리즘은 초기치를 랜덤하게 설정하고 수 십회 수행한 결과 최소값을 가진 결과로 결정하여 동일한 해를 검증하기가 사실상 불가능하다.

본 논문에서는 알고리즘이 간단하면서도 기존 알고리즘들에 비해 해를 개선한 균형-교환 최적화 (balance-swap optimization, BSO) 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 경제급전과 관련된 연구와 문제점을 고찰해 본다. 3장에서는 이차 발전비용함수의 경제급전 문제에 대해 간단하면서도 해를 개선할 수 있는 BSO 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 다양한 사례들에 적용하여 성능을 검증한다.

II. 관련연구와 문제점

주어진 시간대의 수급 균형을 맞추기 위해 총 발전량 ΣP_i 는 총 부하량 P_d 와 동일해야 한다. 즉, $\Sigma P_i = P_d$ 이다. 여기서 총 부하량은 수요 예측량과 공급예비율의 합이다.

경제급전 대상 발전소의 발전기 n 개가 존재하며, 각각의 발전비용이 차이가 발생한다고 가정한다. 이 경우 총 요구량 $\Sigma P_i^{\min} \leq P_d \leq \Sigma P_i^{\max}$ 를 충족시키기 위한 경제급전 문제의 목적함수는 경제급전 총 발전비용 $F(P)$ 를 최소화시키는 것으로 식 (1)과 같다.^[1]

$$\text{minimize } F(P) = \sum_{i=1}^n F(P_i) \quad (1)$$

여기서 $F(P_i)$ 는 발전기 i 의 발전비용 (\$/MWh)으로 식 (2) 또는 식 (3)을 적용한다. 왜냐하면 최소 발전용량으로 가동된 이후 발전 용량을 증가시키기 위해 밸브를 열면 진동 등의 발생으로 인해 밸브 효과 (valve-effect)로 인해 발전비용 $F(P_i)$ 는 식 (3)과 같이 2차함수 보다 복잡한 함수 형태를 나타낸다. 이는 그림 1에 제시되어 있다.^[1-3]

따라서, 보다 정확한 발전비용을 얻기 위해서는 식 (3)을 적용해야 하나 한국전력의 전력거래소에서는 이 함수

의 복잡성으로 인해 단순히 식 (2)의 이차함수에 대해 라그랑주 완화법을 구현하여 실무에 적용하고 있다.

$$F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

$$F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))| \quad (3)$$

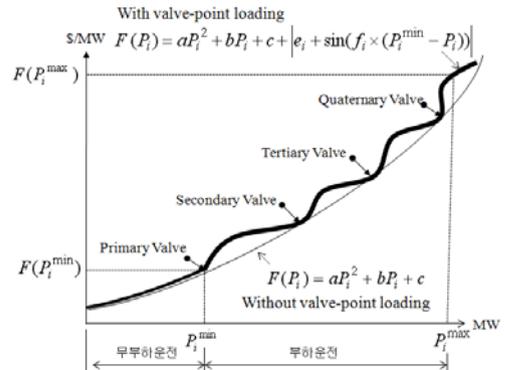


그림 1. 발전비용 함수
Fig. 1. Power Cost Function

여기서 P_i 는 발전기 i 의 발전량 (KW)이며, 각 발전기의 출력 범위 제한조건은 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 이다. 왜냐하면 발전기가 가동을 시작하는 시점부터 일정 출력 시점까지는 주파수 불안정으로 인해 안정된 전력을 공급하지 못해 무부하 운전을 수행한다. 이후 안전하게 연속적으로 운전이 가능한 최저수준의 출력에 도달한 시점인 P_i^{\min} 에서 전력을 공급하는 부하운전을 수행하게 된다. 이는 석탄 발전기는 정격의 30 ~ 40%, 중유 발전기는 25 ~ 35% 정도이다.

표 1은 이차 발전비용 함수 (smooth fuel cost function)를 적용한 15-발전기와 20-발전기와 38-발전기에 대한 사례이다.^[3,9]

Coelho와 Mariani^[10]는 경제급전 문제 해결에 적용된 다양한 기법들의 문제점을 다음과 같이 제시하고 있다. 전통적인 수학적 방법은 시작점 (starting points)에 매우 민감하게 반응하며, 빈번히 국소 최소해 (local minima solution)에 수렴하거나 발산하는 문제점을 갖고 있다. 선형 계획법 (linear programming method)은 빠르고 신뢰할 수는 있지만 조각별 선형 비용 근사 (piecewise linear cost approximation)과 관련된 단점을 갖고 있다. 미선형 프로그래밍 방법인 휴리스틱법은 전역 최소해 (global minima)가 아닌 국소 최소해 수렴 문제와 해석이 불가능한 알고리즘의 복잡성 문제를 동시에 갖고 있다.

표 1의 실험 데이터에는 대부분이 휴리스틱 방법을 적용한 연구를 수행하였다. 휴리스틱 방법은 초기 모수값을 랜덤하게 설정함에 따라 알고리즘을 시행할 때마다 다른 결과를 얻으며, 시행회수 중에서 온 좋게 최소의 발전비용을 나타낸 결과를 최적값으로 결정한다. 즉, 시행할 때마다 서로 다른 결과를 얻어 알고리즘의 성능은 일반적으로 평균, 최소, 최대값과 표준편차를 제시한다.

표 1의 실험 데이터에 적용된 휴리스틱 방법들의 최적화 결과는 표 2에 제시하였다. 표 2에서는 원래 제시된 값과 이를 MS-Office Excel 2007로 다시 계산한 값을 함께 제시하였으며, 본 논문에서는 Excel 2007로 계산한 값을 적용한다.

III. 균형-교환 최적화 알고리즘

$F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, i = 1, 2, \dots, n$ 의 발전비용함수를 적용한 경제급전 문제에 대해, 본 장에서는 그림 2와 같이 매우 간단한 균형-교환 알고리즘을 제안한다.

Step 1. 총 발전량 ΣP_i 이 수요량 P_d 보다 크게 하기 위해, 초기치로 $P_i \leftarrow P_i^{\max}$ 로 설정한다.

Step 2. $\Sigma P_i > P_d$ 로부터 $\Sigma P_i = P_d$ 로 균형을 맞추는 과정은 다음과 같이 수행한다.

$\alpha = \min(P_i - P_i^{\min})$ 으로 설정한다. $\Sigma P_i = P_d$ 가 될 때까지 $\max\{F(P_i) - F(P_i - \alpha)\}, P_i > P_i^{\min}$ 인 발전기 G_i 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - \alpha$ 로 발전량을 감소시킨다.

Step 3. 일단 $\Sigma P_i = P_d$ 가 된 이후에는 교환 과정을 다음과 같이 수행한다.

$\beta = 1.0 \rightarrow 0.1 \rightarrow 0.01 \rightarrow 0.001$ 에 대해 $\max\{F(P_i) - F(P_i - \beta)\} > \min\{F(P_i + \beta) - F(P_i)\}, i \neq j$ 인 발전기 G_i 와 G_j 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - \beta, P_j \leftarrow P_j + \beta$ 로 발전량을 교환하여 발전비용을 감소시킨다.

Step 2와 Step 3의 변형은 다음과 같이 수행된다.

Step 2'. $\Sigma P_i = P_d$ 가 될 때까지 $\max\{F(P_i) - F(P_i - 1.0)\}$ 인 발전기 G_i 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - 1.0$ 으로 발전량을 감소시킨다.

Step 3'. $\max\{F(P_i) - F(P_i - \beta)\} > \min\{F(P_i + \beta) - F(P_i)\}, i \neq j$ 인 발전기 G_i 와 G_j 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - \beta, P_j \leftarrow P_j + \beta (\beta = 0.1, 0.01, 0.001)$ 로 발전량을 교환하여 발전비용을 감소시킨다.

표 1. 실험 데이터

Table 1. Case Study Data

Case Study of 15 Generators ^[3]					
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c
1	150	455	0.000299	10.1	671
2	150	455	0.000183	10.2	574
3	20	130	0.001126	8.8	374
4	20	130	0.001126	8.8	374
5	150	470	0.000205	10.4	461
6	135	460	0.000301	10.1	630
7	135	465	0.000364	9.8	548
8	60	300	0.000338	11.2	227
9	25	162	0.000807	11.2	173
10	25	160	0.001203	10.7	175
11	20	80	0.003586	10.2	186
12	20	80	0.005513	9.9	230
13	25	85	0.00371	13.1	225
14	15	55	0.001929	12.1	309
15	15	55	0.004447	12.4	323
Sum:	965	3,532	$P_d = 2,630 MW$		
Case Study of 20 Generators ^[3]					
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c
1	150	600	0.00068	18.19	1,000
2	50	200	0.00071	19.26	970
3	50	200	0.00650	19.80	600
4	50	200	0.00500	19.10	700
5	50	160	0.00738	18.10	420
6	20	100	0.00612	19.26	360
7	25	125	0.00790	17.14	490
8	50	150	0.00813	18.92	660
9	50	200	0.00522	18.27	765
10	30	150	0.00573	18.92	770
11	100	300	0.00480	16.69	800
12	150	500	0.00310	16.76	970
13	40	160	0.00850	17.36	900
14	20	130	0.00511	18.70	700
15	25	185	0.00388	18.70	450
16	20	80	0.01120	14.26	370
17	30	85	0.00890	19.14	480
18	30	120	0.00713	18.92	680
19	40	120	0.00622	18.47	700
20	30	100	0.00773	19.79	850
Sum:	1,010	3,865	$P_d = 2,500 MW$		

Case Study of 38 Generators ^[9]					
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c
1	220	550	0.3133	796.9	64,782
2	220	550	0.3133	796.9	64,782
3	200	500	0.3127	795.5	64,670
4	200	500	0.3127	795.5	64,670
5	200	500	0.3127	795.5	64,670
6	200	500	0.3127	795.5	64,670
7	200	500	0.3127	795.5	64,670
8	200	500	0.3127	795.5	64,670
9	114	500	0.7075	915.7	172,832
10	114	500	0.7075	915.7	172,832
11	114	500	0.7075	884.2	176,003
12	114	500	0.7083	884.2	173,028
13	110	500	0.4211	1,250.1	91,340
14	90	365	0.5145	1,298.6	63,440
15	82	365	0.5691	1,298.6	65,468
16	120	325	0.5691	1,290.8	77,282
17	65	315	2.5881	238.1	190,928
18	65	315	3.8734	1,149.5	285,372
19	65	315	3.6942	1,269.1	271,676
20	120	272	0.4921	636.1	39,197
21	120	272	0.5728	630.2	45,576
22	110	260	0.3572	803.2	28,770
23	80	190	0.9415	818.2	36,902
24	10	150	52.1230	33.5	105,510
25	60	125	1.1421	805.4	22,233
26	55	110	2.0275	707.1	30,953
27	35	75	3.0744	833.6	17,044
28	20	70	16.7650	2,188.7	81,079
29	20	70	26.3550	1,024.4	124,767
30	20	70	30.5750	837.1	121,915
31	20	70	25.0980	1,305.2	120,780
32	20	60	33.7220	716.6	104,441
33	25	60	23.9150	1,633.9	83,224
34	18	60	32.5620	969.6	111,281
35	8	60	18.3620	2,625.8	64,142
36	25	60	23.9150	1,633.9	103,519
37	20	38	8.4820	694.7	13,547
38	20	38	9.6330	655.9	13,518
Sum:	3,499	10,710	$P_d = 6,000 MW$		

IV. 적용 결과 및 분석

데이터에 대해 독립적 (개별적)으로 수행한 결과는 표 3에 제시되어 있다.

제안된 BSO 알고리즘을 표 1의 15, 20과 38-발전기

표 2. 실험 데이터에 대한 휴리스틱 알고리즘 결과

Table 2. Results of the heuristic algorithms for benchmark data

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	PSO ⁽³⁾		GA ⁽³⁾		ILBO ⁽³⁾	
			P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$
1	150	455	439.1200	5,163.7671	415.3100	4,917.2032	455.00000	5,328.4005
2	150	455	407.9700	4,765.7524	359.7200	4,236.8239	380.00000	4,476.4252
3	20	130	119.6300	1,441.8586	104.4200	1,304.1734	130.00000	1,536.0294
4	20	130	129.9900	1,535.9385	74.9800	1,039.1544	130.00000	1,536.0294
5	150	470	151.0700	2,036.8065	380.2800	4,445.5576	170.00000	2,234.9245
6	135	460	459.9900	5,339.5878	426.7900	4,995.4061	460.00000	5,339.6916
7	135	465	425.5600	4,784.4089	341.3200	3,935.3418	430.00000	4,829.3036
8	60	300	98.5600	1,334.1554	124.7900	1,629.9115	60.00000	900.2168
9	25	162	113.4900	1,454.4821	133.1400	1,678.4731	56.87547	812.6158
10	25	160	101.1100	1,269.1755	89.2600	1,139.6667	160.00000	1,917.7968
11	20	80	33.9100	536.0055	60.0600	811.5474	80.00000	1,024.9504
12	20	80	79.9600	1,056.8519	50.0000	738.7825	80.00000	1,057.2832
13	25	85	25.0000	552.7319	38.7700	733.4447	25.00000	552.7319
14	15	55	41.4100	813.3688	41.9400	819.8670	15.00000	490.9340
15	15	55	35.6100	770.2031	22.6400	606.0154	28.07365	674.6181
Sum	965	3,542	2,662.3800	32,855.0941	2,653.4200	33,061.3387	2,659.94912	32,711.9511
P_d	2,630	제시된 비용		32,858.0000		33,113.0000		32,713.9510

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	PSO-CG ⁽³⁾		SOA ⁽³⁾		BBO ⁽³⁾		LI ⁽³⁾		HM ⁽³⁾	
			P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$
1	150	600	563.3155	11,462.4895	304.7058	6,605.7335	513.08920	10,512.1097	10,506.2791	512.7804	10,506.2772	
2	50	200	106.5639	3,030.4834	90.1026	2,711.1402	173.35330	4,330.1210	169.1033	4,247.2327	169.1035	
3	50	200	98.7063	2,617.7771	105.0880	2,752.5251	126.92310	3,217.7890	126.8898	3,217.0747	126.8897	
4	50	200	117.3171	3,009.5731	100.9737	2,679.5761	103.32920	2,726.9723	102.8656	2,717.6396	102.8656	
5	160	670	67.0781	1,667.3197	111.9052	2,537.9022	113.77410	2,574.8420	113.6836	2,573.0520	113.6836	
6	20	100	51.4702	1,367.5290	89.4554	2,131.8849	73.06694	1,799.9426	73.5709	1,810.1011	73.5709	
7	25	125	47.7261	1,326.0198	97.5200	2,236.6230	114.98430	2,555.2799	115.2876	2,571.0302	115.2876	
8	50	150	82.4271	2,274.7578	115.0051	2,943.4253	116.42380	2,972.9364	116.3894	2,972.4286	116.3894	
9	50	200	52.0884	1,730.8180	166.0976	3,943.6147	100.69480	2,657.6219	100.4063	2,652.0481	100.4063	
10	30	150	106.5037	2,850.1665	76.8435	2,257.7142	99.99979	2,719.2958	106.0267	2,840.4399	106.0267	
11	100	300	197.9428	4,291.7358	246.2108	5,200.2331	148.97700	3,392.9580	150.2395	3,415.8424	150.2395	
12	150	500	488.3315	9,893.6857	239.5819	5,163.3311	294.02070	6,165.7763	292.7647	6,142.4410	292.7647	
13	40	160	99.9464	2,719.9784	111.9761	2,950.4836	119.57540	3,097.3643	119.1155	3,088.4473	119.1155	
14	20	130	79.8941	2,226.6371	115.8576	2,935.1286	30.54786	1,276.0135	30.8342	1,281.4579	30.8342	
15	25	185	101.5250	2,389.5407	114.6867	2,647.1865	116.45460	2,681.6765	115.8056	2,668.9402	115.8056	
16	20	80	25.8380	785.9832	72.4539	1,776.9818	36.22787	980.0565	36.2545	980.5737	36.2545	
17	30	85	70.0153	1,863.7219	64.9063	1,759.8007	66.85943	1,799.4741	66.8590	1,799.4654	66.8590	
18	30	120	53.9530	1,721.5457	107.2208	2,790.5862	88.54701	2,411.2127	87.9720	2,399.6098	87.9720	
19	40	120	65.4271	1,935.0645	107.2200	2,751.8393	100.98020	2,628.5296	100.8033	2,625.0403	100.8033	
20	30	100	36.2529	1,577.6510	88.4224	2,660.3165	54.27250	1,946.8215	54.3060	1,947.4920	54.3060	
Sum	1,010	3,865	2,512.3338	60,742.4778	2,526.2434	61,436.0265	2,592.1011	62,456.7935	2,591.9670	62,456.6359	2,591.9670	
P_d	2,500	제시된 비용		59,804.0500		59,421.0000		62,456.7793		62,456.6391		62,456.6341

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	New-PSO ⁽³⁾		PSO-TVAC ⁽³⁾		BBO ⁽³⁾		DE/BBO ⁽³⁾		SOA ⁽³⁾	
			P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$
1	220	550	550.0000	597,880.2500	443.6590	480,001.7326	422.230586	457,112.2606	426.606060	461,762.6917	318.4260	350,302.7697
2	220	550	512.2630	555,218.4970	342.9560	374,933.6121	422.117933	456,992.6868	426.606054	461,762.6853	315.2351	347,126.4648
3	200	500	485.7530	524,847.9598	433.1170	467,874.0715	435.779411	470,715.4069	429.663164	464,194.7298	277.6897	309,684.9441
4	200	500	391.0830	423,602.7135	500.0000	540,595.0000	445.481950	481,107.5095	429.663181	464,194.7479	281.8220	313,695.1731
5	200	500	443.8460	479,351.1653	410.5390	443,956.9425	428.475732	462,931.5134	429.663193	464,194.7607	262.0443	294,598.4788
6	200	500	358.3880	389,941.6508	492.8640	532,702.8080	428.649254	463,116.0368	429.663164	464,194.7298	330.4357	361,674.6093
7	200	500	415.7290	449,425.5486	409.4830	442,846.1140	429.115368	462,548.2969	429.663185	464,194.7322	305.7628	337,139.9897
8	200	500	320.8160	352,063.1207	446.0790	481,748.9150	429.900663	464,447.4966	429.663168	464,194.7541	237.5084	271,304.0577
9	114	500	115.3470	287,888.4862	119.5660	292,433.0263	115.904947	288,470.6844	114.000000	286,416.4700	346.8533	575,562.9191
10	114	500	204.4220	389,586.4859	137.2740	311,866.0367	114.115368	286,540.7319	114.000000	286,416.4700	303.8684	388,919.6385
11	114	500	114.0000	285,996.4700	138.9330	312,503.9914	115.418662	287,481.1192	119.768032	292,050.5438	250.0769	441,365.7145
12	114	500	249.1970	437,352.8117	155.4010	327,538.6344	127.511404	297,289.9451	127.072817	296,823.0596	213.2689	393,816.4121
13	110	500	118.8860	245,911.1659	121.7190	249,739.7353	110.009948	233,947.5829	110.000000	233,946.3100	338.2986	562,440.2664
14	90	365	102.8020	202,376.0424	90.9240	185,767.3673	90.021767	184,511.7329	90.000000	184,481.4500	131.1207	242,558.9533
15	82	365	89.0390	185,605.8381	97.9410	198,113.2389	82.000000	175,779.8284	82.000000	175,779.8284	148.7008	271,154.7571
16	120	325	120.0000	240,373.0400	128.1060	251,980.8087	120.038496	240,427.9894	120.000000	240,373.0400	156.8968	293,813.6998
17	65	315	156.5620	291,644.0390	189.1080	328,509.8217	160.303855	235,603.5758	159.598036	294,851.1672	214.0227	360,409.6163
18	65	315	84.2550	409,738.0437	65.0000	376,454.6150	65.000114	376,454.8036	65.000000	376,454.6150	134.2227	509,443.1346
19	65	315	65.0410	369,804.9211	65.0000	369,733.2450	65.000137	369,733.4845	65.000000	369,733.2450	136.6392	513,869.8211
20	220	550	151.1040	155,616.3277	267.4220	260,541.7255	271.988691	264,943.3222	272.000000	264,943.7264	225.3016	225,301.6
21	220	550	225.3440	224,353.7729	221.3830	219,806.2324	217.872880	257,404.7145	272.000000	267,528.4552	192.9332	193,972.4088
22	110	260	209.2980	212,525.5328	130.8040	139,943.3528	259.733164	261,483.7621	260.000000	261,748.7200	197.8303	201,649.8064
23	80	190	85.7190	113,955.1886	124.2690	153,118.2773	125.930076	154,935.1461	130.648618	159,869.2205	153.4579	184,632.9452
24	10	150	110.0000	111,057.3000	115.5350	112,851.7121	10.413477	111,511.0689	10.000000	111,057.3000	54.3421	54,253.0065
25	60	125	60.0000	74,688.5900	77.1030	91,121.3352	109.417723	124,031.3272	113.303934	128,151.1838	87.6238	101,574.1727
26	55	110	90.4890	111,539.4673	55.0180	75,993.4304	89.377296	110,347.9347	88.069916	108,949.9636	84.4932	105,172.6689
27	35	75	39.6700	54,951.1226	75.0000	96,857.5000	36.411066	51,472.1882	37.503102	52,632.8043	32.0166	68,954.3348
28	20	70	20.0000	131,559.0000	21.6820	136,415.7729	20.008888	131,587.2744	20.000000	131,559.0000	60.2210	273,726.2101
29	20	70	20.9850	157,891.2391	29.8290	178,773.6589	20.008855	155,815.6168	20.000000	155,797.0000	56.9315	268,509.3411
30	20	70	22.8100	156,917.3043	20.3260	151,351.8420	20.000000	150,887.0000	20.000000	150,887.0000	47.4167	230,350.6202
31	20	70	20.0000	155,923.2000	20.0000	153,923.2000	20.000000	153,923.2000	20.000000	153,923.2000	35.3158	198,156.5516
32	20	60	20.4160	133,126.5755	21.8400	136,176.4524	20.003396	132,268.8146	20.000000	132,261.8000	51.4590	230,613.2426
33	25	60	25.0000	139,018.3750	25.6200	140,781.9599	25.006659	139,037.2176	25.000000	139,018.3750	53.4545	238,897.6356
34	18	60	21.3190	146,751.3236	24.2510	153,970.3325	18.022211	139,331.4757	18.000000	139,283.8880	52.0196	249,833.2390
35	8	60</										

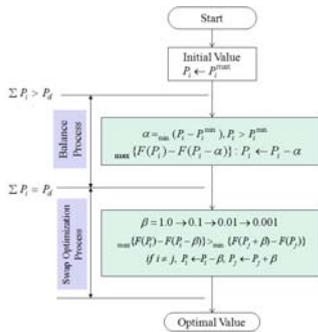


그림 2. 이차 발전비용함수의 균형-교환 최적화 알고리즘
 Fig. 2. Balance-Swap Optimization (BSO) Algorithm for Quadratic Power Cost Function

15-발전기는 $\Sigma P_i = 3,542MW$, $\Sigma F(P_i) = \$42,537.024$ 에 대해 $\Sigma P_i = P_d = 2,630MW$ 가 되는 균형 시점에서 $\Sigma F(P_i) = \$32,254.756$ 을 얻었으며, $\beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$ 에 대해 교환 대상이 존재하지 않아 최적화로 발전비용은 $\$32,254.756$ 을 얻었다. 이는 LLBO^[8]의 $\$32,711.951$ 에 비해 $\$457.195/h$ 의 비용을 절감하였다.

20-발전기는 $\Sigma P_i = 3,865MW$, $\Sigma F(P_i) = \$87,828.213$ 에 대해 $\Sigma P_i = P_d = 2,500MW$ 가 되는 균형 시점에서 $\Sigma F(P_i) = \$60,162.029$ 를 얻었으며, $\beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$ 에 대해 교환 결과 각각, $\$60,152.547, \$60,152.530, \$60,152.529, \$60,152.529$ 로 비용이 감소하여 최종적으로 $\$60,152.529$ 을 얻었다. 이는 PSO-CG^[3]에 비해 $\$589.949/h$ 의 비용이 절감되었다.

38-발전기에 대해서는, $\Sigma P_i = 10,710MW$, $\Sigma F(P_i) = \$18,318,120.774MW$ 에 대해 $\Sigma P_i = P_d = 6,000MW$ 가 되는 균형 시점에서 $\Sigma F(P_i) = \$9,416,581.892$ 를 얻었으며, $\beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$ 에 대해 교환 결과 각각, $\$9,416,569.136, \$9,416,567.665, \$9,416,567.644, \$9,416,567.644$ 로 비용이 감소하여 최종적으로 $\$9,416,567.644$ 을 얻었다. 이는 DE/BBO^[13]에 비해 $\$36.981/h$ 의 비용이 절감되었다.

3개 데이터에 대해 실험 결과 제안된 BSO 알고리즘은 기존의 휴리스틱 알고리즘들 중 최적값을 갖는 알고리즘들에 비해 모든 데이터에서 비용을 절감시키는 효과를 얻었다.

3개의 실험 데이터 각각을 하나의 국가에 존재하는 다른 발전회사들이라고 가정하여 보자. 또한, 각 발전회사들은 공개경쟁입찰에 의해 획득된 발전량에 대해 경제급전을 독립적으로 수행한다고 가정하여 보자. 이는 현재의 한국전력거래소 (KPX)에서 6개 발전 회사와 업무

를 수행하는 경우에 해당된다.

표 3. 실험 데이터의 BSO 알고리즘 결과
 Table 3. Results of the BSO Algorithm for Benchmark Data

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a_i	b_i	c_i	P_i	$F(P_i)$
1	150	455	0.000299	10.10	671.00	455.000	5,328.400
2	150	455	0.000183	10.20	574.00	455.000	5,252.886
3	20	130	0.001126	8.80	373.00	130.000	1,536.029
4	20	130	0.001126	8.80	373.00	130.000	1,536.029
5	150	470	0.000205	10.40	461.00	272.000	3,304.967
6	135	460	0.000301	10.10	630.00	460.000	5,339.692
7	135	465	0.000364	9.80	548.00	465.000	5,183.706
8	20	300	0.000338	11.20	227.00	60.000	900.217
9	20	162	0.000807	11.20	173.00	25.000	453.504
10	25	160	0.001203	10.70	175.00	25.000	443.252
11	20	80	0.005886	10.20	186.00	43.000	631.231
12	20	80	0.005513	9.90	230.00	55.000	791.177
13	25	85	0.000371	13.10	225.00	25.000	552.732
14	15	55	0.001929	12.10	309.00	15.000	490.934
15	15	55	0.004447	12.40	323.00	15.000	510.001
Sum	965	3,542				출력량 2,630.000	32,254.756
P_d	2,630					여유량 0.000	

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a_i	b_i	c_i	P_i	$F(P_i)$
1	150	600	0.00068	18.19	1000.00	600.000	12,158.800
2	30	200	0.00071	19.25	970.00	132.100	3,526.636
3	50	200	0.00650	19.80	600.00	50.000	1,606.250
4	50	200	0.00600	19.10	700.00	50.000	1,667.500
5	30	160	0.00738	18.10	420.00	91.300	2,134.407
6	20	100	0.00612	19.25	360.00	20.000	747.648
7	25	125	0.00790	17.14	490.00	125.000	2,755.938
8	50	150	0.00813	18.92	660.00	50.000	1,626.325
9	30	200	0.00522	18.27	765.00	112.800	2,892.274
10	30	150	0.00573	18.92	770.00	46.040	1,653.223
11	100	300	0.00480	16.69	800.00	287.240	5,990.068
12	150	500	0.00310	16.76	970.00	433.480	8,817.630
13	40	160	0.00850	17.36	900.00	122.810	3,160.181
14	20	130	0.00511	18.70	700.00	73.142	2,095.093
15	25	185	0.00938	18.70	450.00	94.000	2,242.967
16	20	80	0.07120	14.26	370.00	36.430	983.985
17	30	85	0.00890	19.14	480.00	30.000	1,062.210
18	30	120	0.00713	18.92	680.00	37.000	1,389.801
19	20	100	0.00822	18.47	700.00	78.658	2,191.397
20	30	120	0.00773	19.79	850.00	30.000	1,450.657
Sum	1,010	3,865				출력량 2,500.000	60,152.529
P_d	2,500					여유량 0.000	

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a_i	b_i	c_i	P_i	$F(P_i)$
1	220	550	0.3133	796.9	64782	425.800	460,905.077
2	220	550	0.3133	796.9	64782	425.800	460,905.077
3	200	500	0.3127	795.5	64670	428.900	463,382.744
4	200	500	0.3127	795.5	64670	428.900	463,382.744
5	200	500	0.3127	795.5	64670	428.900	463,382.744
6	200	500	0.3127	795.5	64670	428.900	463,382.744
7	200	500	0.3127	795.5	64670	428.900	463,382.744
8	200	500	0.3127	795.5	64670	428.900	463,382.744
9	114	500	0.7075	915.7	172832	114.000	286,416.470
10	114	500	0.7075	915.7	172832	114.000	286,416.470
11	114	500	0.7075	884.2	176003	126.890	299,590.647
12	114	500	0.7083	884.2	173028	126.700	296,426.402
13	110	500	0.4211	1250.1	91340	110.000	233,946.310
14	90	365	0.5145	1298.6	63440	90.000	184,481.450
15	82	365	0.5691	1298.6	65468	82.000	175,779.828
16	120	325	0.5691	1290.8	77282	120.000	240,373.040
17	65	315	2.5881	238.1	190928	159.500	294,746.861
18	65	315	3.8734	1149.5	285372	65.000	376,454.615
19	65	315	3.6842	1269.1	271676	65.000	369,733.245
20	120	272	0.4921	696.1	39197	272.000	264,943.726
21	120	272	0.5728	660.2	45576	272.000	267,528.435
22	110	260	0.3572	803.2	28770	260.000	261,748.720
23	80	190	0.9415	818.2	36902	130.400	159,604.697
24	10	150	52.1290	33.5	105510	10.000	111,057.300
25	60	125	1.1421	805.4	22233	113.100	127,933.038
26	55	110	2.0275	707.1	30853	87.947	108,822.377
27	35	75	3.0744	833.6	17044	37.430	52,552.899
28	20	70	16.7650	2188.7	81079	20.000	131,559.000
29	20	70	26.3550	1024.4	124767	20.000	155,797.000
30	20	70	30.5750	837.1	121915	20.000	150,887.000
31	20	70	25.0900	1305.20	120780.00	20.000	156,923.200
32	20	60	33.7220	716.60	104441.00	20.000	132,261.800
33	25	60	23.9150	1633.90	85224.00	25.000	139,018.375
34	18	60	32.5620	969.60	111281.00	18.000	139,283.888
35	8	60	18.3620	2625.80	64142.00	8.000	86,323.568
36	25	60	23.9150	1633.90	103519.00	25.000	159,313.375
37	20	38	8.4820	694.70	13547.00	22.000	32,958.688
38	20	38	9.6390	655.90	13518.00	21.033	31,601.603
Sum	3,499	10,710				출력량 6,000.000	9,416,567.644
P_d	6,000					여유량 0.000	

만약, 모든 발전 자회사들의 발전기를 전력거래소에서 통합하여 중앙집중적으로 경제급전을 하는 경우가 독립적으로 경제급전을 수행하는 경우에 비해 얼마나 경제적 효과를 얻을 수 있는지를 고찰해 보자.

3개 실험 데이터를 통합한 73-발전기에 대해 BSO 알고리즘을 적용한 경우의 발전비용과 개별적으로 BSO 알

고리즘을 적용한 결과, 휴리스틱 알고리즘의 최적해 결과를 비교한 내용은 표 4에 제시되어 있다.

73-발전기의 $P_d = 2,630+2,500+6,000=11,130\text{MW}$ 이며, 제안된 BSO 알고리즘은 발전비용이 \$7,293,362.338 을 얻었다. 이 결과는 독립적 운영 휴리스틱 알고리즘의 최적해 \$9,510,059.054에 비해 \$2,216,696.716/h의 비용을 절

표 4. 통합운영 결과

Table 4. Results for the Centralized Operation

구분	G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a_i	b_i	c_i	BSO 알고리즘 (통합 운영)		휴리스틱 알고리즘 (독립적 운영)	BSO 알고리즘 (독립적 운영)
							P_i	$F(P_i)$		
15 Gen'	1	150	455	0.00299	10.10	671.00	455.000	5,328.400	32,711.951 [LLBO]	32,254.756 [BSO]
	2	150	455	0.000183	10.20	574.00	455.000	5,252.886		
	3	20	130	0.001126	8.80	373.00	130.000	1,536.029		
	4	20	130	0.001126	8.80	373.00	130.000	1,536.029		
	5	150	470	0.000205	10.40	461.00	470.000	5,394.285		
	6	135	460	0.000301	10.10	630.00	460.000	5,339.692		
	7	135	465	0.000364	9.80	548.00	465.000	5,183.706		
	8	60	300	0.000338	11.20	227.00	300.000	3,617.420		
	9	25	162	0.000807	11.20	173.00	162.000	2,008.579		
	10	25	160	0.001203	10.70	175.00	160.000	1,917.797		
	11	20	80	0.003586	10.20	186.00	80.000	1,024.950		
	12	20	80	0.005513	9.90	230.00	80.000	1,057.283		
	13	25	85	0.000371	13.10	225.00	85.000	1,341.180		
	14	15	55	0.001929	12.10	309.00	55.000	980.335		
	15	15	55	0.004447	12.40	323.00	55.000	1,018.452		
20 Gen'	16	150	600	0.00068	18.19	1000.00	600.000	12,158.800	60,742.748 [PSO-CG]	60,152.529 [BSO]
	17	50	200	0.00071	19.25	970.00	200.000	4,850.400		
	18	50	200	0.00050	19.80	600.00	200.000	4,820.000		
	19	50	200	0.00500	19.10	700.00	200.000	4,720.000		
	20	50	160	0.00738	18.10	420.00	160.000	3,504.928		
	21	20	100	0.00612	19.25	360.00	100.000	2,347.200		
	22	25	125	0.00790	17.14	490.00	125.000	2,755.938		
	23	50	150	0.00813	18.92	660.00	150.000	3,680.925		
	24	50	200	0.00522	18.27	765.00	200.000	4,627.800		
	25	30	150	0.00573	18.92	770.00	150.000	3,736.925		
	26	100	300	0.00480	16.69	800.00	300.000	6,239.000		
	27	150	500	0.00310	16.76	970.00	500.000	10,125.000		
	28	40	160	0.00850	17.36	900.00	160.000	3,885.200		
	29	20	130	0.00511	18.70	700.00	130.000	3,217.359		
	30	25	185	0.00398	18.70	450.00	185.000	4,045.716		
	31	20	80	0.07120	14.26	370.00	80.000	1,966.480		
	32	30	85	0.00890	19.14	480.00	85.000	2,171.203		
	33	30	120	0.00713	18.92	680.00	120.000	3,053.072		
34	40	120	0.00622	18.47	700.00	120.000	3,005.968			
35	30	100	0.00773	19.79	850.00	100.000	2,906.300			
38 Gen'	36	220	550	0.3133	796.9	64782	220.000	255,263.720	9,416,604.6251 [DE/BBO]	9,416,567.644 [BSO]
	37	220	550	0.3133	796.9	64782	220.000	255,263.720		
	38	200	500	0.3127	795.5	64670	200.000	236,278.000		
	39	200	500	0.3127	795.5	64670	200.000	236,278.000		
	40	200	500	0.3127	795.5	64670	200.000	236,278.000		
	41	200	500	0.3127	795.5	64670	200.000	236,278.000		
	42	200	500	0.3127	795.5	64670	200.000	236,278.000		
	43	200	500	0.3127	795.5	64670	200.000	236,278.000		
	44	114	500	0.7075	915.7	172832	114.000	286,416.470		
	45	114	500	0.7075	915.7	172832	114.000	286,416.470		
	46	114	500	0.7075	884.2	176003	114.000	285,996.470		
	47	114	500	0.7083	884.2	173028	114.000	283,031.867		
	48	110	500	0.4211	1250.1	91340	110.000	233,946.310		
	49	90	365	0.5145	1298.6	63440	90.000	184,481.450		
	50	82	365	0.5691	1298.6	65468	82.000	175,779.828		
	51	120	325	0.5691	1290.8	77282	120.000	240,373.040		
	52	65	315	2.5881	238.1	190928	65.000	261,666.010		
	53	65	315	3.8734	1149.5	285372	65.000	376,454.615		
	54	65	315	3.6842	1269.1	271676	65.000	369,733.245		
	55	120	272	0.4921	696.1	39197	120.000	193,868.861		
56	120	272	0.5728	660.2	45576	120.000	199,708.534			
57	110	260	0.3572	803.2	28770	110.000	129,470.398			
58	80	190	0.9415	818.2	36902	80.000	108,383.600			
59	10	150	52.1230	33.5	105510	10.000	111,057.300			
60	60	125	1.1421	805.4	22233	60.000	74,668.560			
61	55	110	2.0275	707.1	30953	55.000	75,976.688			
62	35	75	3.0744	833.6	17044	35.000	49,986.140			
63	20	70	16.7650	2188.7	81079	20.000	131,559.000			
64	20	70	26.3550	1024.4	124767	20.000	155,797.000			
65	20	70	30.5750	837.1	121915	20.000	150,887.000			
66	20	70	25.0980	1305.20	120780.00	20.000	156,923.200			
67	20	60	33.7220	716.60	104441.00	20.000	132,261.800			
68	25	60	23.9150	1633.90	83224.00	25.000	139,018.375			
69	18	60	32.5620	969.60	111281.00	18.000	139,283.888			
70	8	60	18.3620	2625.80	64142.00	8.000	86,323.568			
71	25	60	23.9150	1633.90	103519.00	25.000	159,313.375			
72	20	38	8.4820	694.70	13547.00	20.000	30,833.800			
73	20	38	9.6930	656.90	13518.00	20.000	30,513.200			
Sum		5,324	17,662			출력량	11,130.000	7,293,362.338	9,510,059.054	9,508,974.929
P_d		11,130				비용감소		-2,216,696.716	-2,215,612.591	

감시할 수 있는 방법이며, BSO 알고리즘의 독립적 운영인 경우의 \$9,508,974.929에 비해 \$2,215,612.591/h의 비용을 절감할 수 있는 방법이다. 즉, 독립적 운영에서 중앙집중식으로 단지 업무수행 방식 변경 요인이 경제급전 문제의 경제적 효과를 가장 극대화 시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 이차 발전함수를 적용하는 발전분야에서 가장 경제적인 비용으로 전력을 생산할 수 있는 경제급전 최적화 문제에 대한 근사 해를 구하는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘을 3개의 실험 데이터에 적용한 결과, 제안된 알고리즘은 간단하며, 빠르면서도 기존의 휴리스틱 알고리즘들에 비해 보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

추가적으로, 독립적 운영과 중앙집중형의 통합적 운영의 경제적 효과를 분석하였다. 이 결과, 단지 업무 수행방식을 독립적 운영에서 중앙집중식으로 변경시키는 방법이 경제급전 문제의 경제적 이득을 가장 극대화 시킬 수 있는 방법임을 보였다.

References

- [1] R. Goncalves, C. Almeida, J. Kuk, and M. Delgado, "Solving Economic Load Dispatch Problem by Natural Computing Intelligent Systems", 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP), pp. 1-6, 8-12, Nov. 2009.
- [2] S. Coelho and V. C. Mariani, "Combining of Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming for Economic Dispatch Optimization with Valve-Point Effect", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 2, 2006.
- [3] L. D. S. Coelho and C. S. Lee, "Solving Economic Load Dispatch Problems in Power Systems using Chaotic and Gaussian Particle Swarm Optimization Approaches," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 30, Issue. 5, pp. 297-307, June, 2008.
- [4] A. Pereira-Neto, C. Unsihuay and O. R. Saavedra, "Efficient Evolutionary Strategy Optimisation Procedure to Solve the Non-convex Economic Dispatch Problem with Generator Constraints," IEEE Proceeding on General Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 5, pp. 653 - 660, 2005.
- [5] Z. L. 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, 2003.
- [6] C. T. Su and C. T. Lin, "New Approach with a Hopfield Modeling Framework to Economic Dispatch," IEEE Trans. on Power System, Vol. 15, No. 2, pp. 541 - 545, 2000.
- [7] B. Shaw, S. Ghoshal, V. Mukherjee, and S. P. Ghoshal, "Solution of Economic Load Dispatch Problems by a Novel Seeker Optimization Algorithm," International Journal of Electrical Engineering and Informatics, Vol. 3, No. 1, pp. 26-41, 2011.
- [8] T. Adhinarayanan and M. Sydulu, "Efficient Lamda Logic Based Optimisation Procedure to Solve the Large Scale Generator Constrained Economic Dispatch Problem," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 301-309, 2009.
- [9] M. Sydulu, "A Very Fast and Effective Non-iterative " λ -Logic Based" Algorithm for Economic Dispatch of Thermal Units," Proc. IEEE Conference on TENCON, pp. 1434-1437, 1999.
- [10] L. S. Coelho and V. C. Mariani, "An Improved Harmony Search Algorithm for Power Economic Load Dispatch," Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 2522-2526, 2009.
- [11] S. Pothiya, I. Ngamroo, and W. Kongprawechnon, "Ant Colony Optimization for Economic Dispatch Problem with Non-smooth Cost Functions," International Journal of Electrical power and Energy System, Vol. 32, pp. 478 - 487, 2010.

- [12] A. Bhattacharya and P.K. Chattopadhyay, "Biogeography-based Optimization for Different Economic Load Dispatch Problems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, pp. 1064- 1077, 2010.
- [13] A. Bhattacharya, and P.K. Chattopadhyay, "Hybrid Differential Evolution with Biogeography- based Optimization for Solution of Economic Load Dispatch," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 1, 2012.
- [14] K. T. Chaturvedi, M. Pandit, and L. Srivastava, "Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients for Non-convex Economic Power Dispatch," International Journal of Electrical Power and Energy System, Vol. 31, pp. 249 - 257, 2009.
- [15] J. B. Park, Y. W. Jeong, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "An improved particle Swam Optimization for Nonconvex Economic Dispatch Problems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 156-166, Feb. 2010.

저자 소개

이 상 운(정회원)



- 1987년 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (학사)
- 1997년 : 경상대학교 컴퓨터과학과 (석사)
- 2001년 : 경상대학교 컴퓨터과학과 (박사)
- 2003년 : 강원도립대학 컴퓨터응용과 전임강사
- 2004년 ~ 2007년 2월 : 국립 원주대학 여성교양과 조교수
- 2007년 3월 ~ 현재 : 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 부교수
- 관심분야 : 소프트웨어 프로젝트 관리, 개발 방법론, 분석과 설계 방법론, 시험 및 품질보증, 소프트웨어 신뢰성, 그래프 알고리즘
- e-mail : sulee@gwnu.ac.kr