

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.5.155

IIBC 2015-5-19

운전금지영역을 가진 이차 발전비용함수의 경제급전문제 최적화

Optimization of Economic Load Dispatch Problem for Quadratic Fuel Cost Function with Prohibited Operating Zones

이상운*

Sang-Un, Lee *

요약 본 논문은 운전금지영역을 가진 이차 볼록 발전비용 함수를 적용하는 경제급전의 최적화 문제에 대한 결정론적 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 운전금지구역을 가진 발전기는 운전금지구역을 벗어나도록 분할하고, 초기치 $P_i \leftarrow P_i^{\max}$ 에 대해 발전단가가 큰 순서대로 발전량을 감소시키고, $\max\{F(P_i) - F(P_i - \beta)\} > \min\{F(P_j + \beta) - F(P_j)\}, i \neq j, \beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$ 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - \beta, P_j \leftarrow P_j + \beta$ 의 교환 최적화 과정을 수행하였다. 제안된 방법을 15-발전기의 3가지 사례에 적용한 결과 간단하면서도 항상 동일한 결과로 휴리스틱 알고리즘들에 비해 최적의 결과를 나타내었다.

Abstract This paper proposes a deterministic optimization algorithm to solve economic load dispatch problem with quadratic convex fuel cost function. The proposed algorithm primarily partitions a generator with prohibited zones into multiple generators so as to place them afieled the prohibited zone. It then sets initial values to $P_i \leftarrow P_i^{\max}$ and reduces power generation costs of those incurring the maximum unit power cost. It finally employs a swap optimization process of $P_i \leftarrow P_i - \beta, P_j \leftarrow P_j + \beta$ where $\max\{F(P_i) - F(P_i - \beta)\} > \min\{F(P_j + \beta) - F(P_j)\}, i \neq j, \beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$. When applied to 3 different 15-generator cases, the proposed algorithm has consistently yielded optimized results compared to those of heuristic algorithms.

Key Words : Economic Load Dispatch, Optimization, Balance, Swap, Prohibited Operating Zones

1. 서 론

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] 전력 수요량 증가와 더불어 전력 생산 원자재 값 급등으로 인해, 경제급전 문제는 전력산업에 있어서 가장 중요한 최적화 문제 가운데 하나로 대두되고 있다.^[1-9]

경제급전 문제에 있어서, n 대의 발전기는 각기 다른

*정회원, 강릉원주대학교 과학기술대학 멀티미디어공학과
접수일자 : 2015년 3월 24일, 수정완료 : 2015년 9월 22일
게재확정일자 : 2015년 10월 9일

Received: 24 March, 2015 / Revised: 22 September, 2015 /
Accepted: 9 October, 2015

*Corresponding Author: sulee@gwnu.ac.kr

Dept. of Multimedia Eng., Gangneung-Wonju National University,
Korea

발전 가능량 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 를 가지고 있으며, 발전 비용은 $F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$ 의 이차 함수 형태를 가진 볼록함수 (convex function)나 밸브효과 (valve-effect) 를 반영한 비볼록 함수 (nonconvex function)인 $F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))|$ 를 적용한다.^[6]

본 논문에서는 볼록함수 경제급전 문제에 한정한다. 볼록함수 경제급전 문제는 순수한 볼록함수만 적용하는 경우와 볼록함수를 취하지만 증기량의 작동으로 인해 유발되는 축 베어링 (shaft bearing)의 견고성 문제로 특정 영역에서는 운전을 금지하는 볼록함수가 혼합된 경우를 고려한다. 본 논문에서는 이와 같이 혼합된 볼록함수 경제급전 문제를 다룬다.

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.^[6] 그러나 휴리스틱 알고리즘은 초기치를 랜덤하게 설정하고 수십 회 수행한 결과 최소치를 가진 결과로 결정하여 동일한 해를 검증하기가 사실상 불가능하며, 최소치로 구한 해가 최적해가 되지 못하기도 한다. 또한, 출력량 ΣP_i 을 수요량 P_d 와 불일치하는 알고리즘 수행으로 전력 손실 $P_{loss} = \Sigma P_i - P_d > 0$ 을 유발시키는 문제점을 갖고 있다.

본 논문에서는 알고리즘이 간단하면서도 기존 알고리즘들에 비해 해를 개선한 단순하면서도 빠른 균형-교환 최적화 (Simple and Fast Balance-Swap Optimization, SFBSO) 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 볼록 발전비용 함수 경제급전과 관련된 연구와 문제점을 고찰해 본다. 3장에서는 볼록 발전비용함수의 경제급전 문제에 대해 간단하면서도 해를 개선할 수 있는 SFBSO 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 적용하여 성능을 검증한다.

II. 관련연구와 문제점

주어진 시간대의 균형을 맞추기 위해 총 발전량 ΣP_i 는 총 부하량 (또는 수요량) P_d 와 동일해야 한다. 즉, $\Sigma P_i = P_d$ 이다.

경제급전 대상 발전기 G_i 는 $n(i=1,2,\dots,n)$ 대가 존재하며, 각 발전기의 성능과 사용 연료의 차이로 인해 발전 비용이 차이가 발생한다고 가정한다. 이 경우 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 같이 표현된다.^[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) ~ (4)를 적용한다.

- 볼록 발전비용함수 : $F(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (2)$$

- 금지영역을 가진 볼록 발전비용함수 :

$$\begin{aligned} F(P_i) &= a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \\ P_i^{\min} &\leq P_i \leq P_{i,1}^L, P_{i,k-1}^U \leq P_i \leq P_{i,k}^L, k=2,3,\dots,n_i, \\ P_{i,n}^U &\leq P_i \leq P_i^{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

- 비볼록 (non-convex) 발전비용함수 :

$$\begin{aligned} F(P_i) &= a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))|, \\ P_i^{\min} &\leq P_i \leq P_i^{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

발전기가 일단 가동된 이후 출력이 안정화되는 일정 출력 P_i^{\min} 에 도달할 때까지는 전력을 공급하지 않는 무부하 운전을 한다. 일단 발전기를 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 로 가동 중에 발전비용 과다로 인해 정지 ($P_i = 0$)시키고 P_i^{\min} 까지 재가동시키는데 소요되는 시간과 비용이 과다하기 때문에 발전기는 가능한 발전량 P_i (MW)을 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 로 유지한다. 발전량을 증가시키기 위해 밸브를 열면 진동 등의 발생으로 인해 밸브 효과 (valve-effect)로 인해 발전비용 $F(P_i)$ 는 식 (4)와 같이 2차함수 보다 복잡한 비볼록함수 형태를 나타낸다. 그러나 현실적으로는 경제급전 최적화의 어려움으로 인해 식 (2)와 식 (3)을 적용하고 있다.^[10-17] 이들 발전비용 함수는 그림 1에 제시되어 있다.

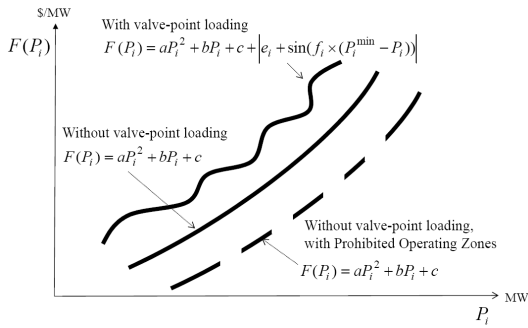


그림 1. 발전비용 함수
 Fig. 1. Power Cost Function

식 (2)는 전형적인 발전비용 함수로 2차 함수 형태를 나타내고 있다.^[15-17] 식 (3)은 증기량의 작동으로 인해 유발되는 축 베어링의 견고성 문제로 운전이 금지된 작동 영역 (prohibited operating zones)을 가진 경우이다.^[7,12] 본 논문에서는 식 (2)와 (3)만을 고려한다.

표 1은 이차 발전비용 함수를 적용한 15-발전기에 대한 사례이다.^[7,12]

Orero와 Irving^[11]은 Adhinarayanan과 Sydulu^[7]이 제시한 데이터에서 G_{02} 의 [420,450]을 [240,450]으로 잘못 표기하였다. Coelho와 Lee^[13]의 PSO와 ICA-PSO^[14]는 Adhinarayanan과 Sydulu^[7]이 제시한 데이터에 대해 b 와 c 값을 절사하고, 금지영역을 다르게 적용한 Giang^[12]의 자료를 실험 대상으로 하여 결과치가 다르게 나타났다. 또한, G_{02} 의 [185, 225]를 [185,255]로 잘못 표기하여 적용하였다.

표 1. 실험 데이터
 Table 1. Case Study Data

13 Generator with prohibited operating zones ^[7]							
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	Prohibited Operating Zones	
G01	150	455	0.000299	10.07	671.03	-	-
G02	150	455	0.000183	10.22	574.54	[185,225]	[305,335] [420,450]
G03	20	130	0.001126	8.80	374.59	-	-
G04	20	130	0.001126	8.80	374.59	-	-
G05	150	470	0.000205	10.40	461.37	[180,200]	[260,335] [390,420]
G06	135	460	0.000301	10.10	630.14	[230,255]	[365,395] [430,455]
G07	135	465	0.000364	9.87	548.20	-	-
G08	60	300	0.000338	11.21	227.09	-	-
G09	25	162	0.000807	11.21	173.72	-	-
G10	25	160	0.001203	10.72	175.95	-	-
G11	20	80	0.003586	10.21	186.86	-	-
G12	20	80	0.005513	9.90	230.27	[30,55]	[65,75]
G13	25	85	0.000371	13.12	225.28	-	-
G14	15	55	0.001929	12.12	309.03	-	-
G15	15	55	0.004447	12.41	323.79	-	-

13 Generator with prohibited operating zones ^[12]							
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	Prohibited Operating Zones	
G01	150	455	0.000299	10.1	671	-	-
G02	150	455	0.000183	10.2	574	[185,225]	[305,335] [420,450]
G03	20	130	0.001126	8.8	374	-	-
G04	20	130	0.001126	8.8	374	-	-
G05	150	470	0.000205	10.4	461	[180,200]	[305,335] [390,420]
G06	135	460	0.000301	10.1	630	[230,255]	[365,395] [430,455]
G07	135	465	0.000364	9.8	548	-	-
G08	60	300	0.000338	11.2	227	-	-
G09	25	162	0.000807	11.2	173	-	-
G10	25	160	0.001203	10.7	175	-	-
G11	20	80	0.003586	10.2	186	-	-
G12	20	80	0.005513	9.9	230	[30,40]	[55,65]
G13	25	85	0.000371	13.1	225	-	-
G14	15	55	0.001929	12.1	309	-	-
G15	15	55	0.004447	12.4	323	-	-

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 운 좋게 최소의 발전비용을 나타낸 결과를 최적의 값으로 결정한다. 즉, 시행할 때마다 서로 다른 결과를 얻어 알고리즘의 성능은 일반적으로 평균, 최소, 최대치와 표준편차를 제시한다.

경제급전 문제 해결에 적용된 다양한 기법들의 문제점을 다음과 같다. 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)와 관련된 단점을 갖고 있다. 비선형 프로그래밍 방법인 휴리스틱법은 전역 최소해 (global minima)가 아닌 국소 최소해 수렴 문제와 해석이 불가능한 알고리즘의 복잡성 문제를 동시에 갖고 있다.^[9]

III. 단순하고 빠른 균형-교환 알고리즘

운전 금지영역을 가진 블록 발전비용함수 경제급전 문제에 대해, 본 장에서는 단순하고 빠른 균형-교환 최적화 (SFBSO) 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

Step 1. 발전금지 영역을 가진 발전기에 대해서는 금지영역을 회피하도록 발전기의 출력을 분할한다.

$$\bullet P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^L - 1,$$

$$P_{i,k-1}^L - 1 \leq P_i \leq P_{i,k}^L - 1, k=2,3,\dots,n_i,$$

$$P_{i,n}^L - 1 \leq P_i \leq P_i^{\max}$$

Step 2. $P_i^{\max} - P_i^{\min}$ 에 대한 단위 발전량에 대한 발전비용 감소량 $\bar{c}_i = \frac{F(P_i^{\max}) - F(P_i^{\min})}{P_i^{\max} - P_i^{\min}}$ 를 계산한다.

Step 3. \bar{c}_i 내림차순으로 정렬시키고, 발전량 감소 순서 k 를 부여한다. 각 데이터에 대해 여유 발전량 $P_r = \Sigma P_i^{\max} - (P_i^{\max} - P_i^{\min})$ 을 계산한다. 이를 DPDB (decreasing power database) 라 하자.

Step 4. 주어진 발전기의 초기 발전량 $P_i \leftarrow P_i^{\max}$ 로 설정한다. 발전 수요량 P_d 가 주어졌을 때, DPDB에서 $P_r > P_d$ 와 $P_r < P_d$ 중 $\min\{|P_d < P_r|, |P_d > P_r|\}$ 가 될 때까지 각 발전기의 발전량을 감소시킨다. 이 때 $P_r - P_d > 0$ 이면 여유량, $P_r - P_d < 0$ 이면 부족량을 α 이라 하자.

Step 5. $\alpha > 0$ 이면 $\max\{F(P_i) - F(P_i - \alpha)\}$ 인 발전기 G_i 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - \alpha$ 로, $\alpha < 0$ 이면 $\min\{F(P_i + |\alpha|) - F(P_i)\}$ 인 발전기 G_i 에 대해 $P_i \leftarrow P_i + |\alpha|$ 로 설정하여 $\Sigma P_i = P_d$ 의 균형을 맞춘다. 단, 이 경우 α 가 금지영역을 벗어나는 값이면 금지영역 발전기를 대상으로 하며, 그렇지 않으면 금지영역 발전기는 대상에서 제외시킨다.

Step 6. $\beta = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001$ 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 발전량을 유효자리수 0.0001로 조정한다. 이 과정이 끝나면 $F(P)$ 를 계산하여 최적해로 결정한다. 단, 이 경우, 금지영역 발전기는 금지영역으로 진입하면 교환 대상에서 제외시킨다.

IV. 적용 결과 및 분석

제안된 SFBSO 알고리즘을 표 1의 15-발전기 데이터에 적용하여 발전기를 분할한 경우는 표 2에, DPDB를

구성한 경우는 표 3에 제시되어 있다.

표 1의 데이터에 대한 경제급전 실험은 $P_d = 2,650\text{MW}$ 와 $2,630\text{MW}$ 에 대해 수행되었다.

SFBSO 알고리즘은 표 3의 DPDB로부터 $P_d = 2,650\text{MW}$ 와 $2,630\text{MW}$ 에 대해 표 4와 같이 수행되었다.

기존 알고리즘들과 제안된 SFBSO 알고리즘의 결과는 표 5에 비교, 제시되어 있다.

표 2. 운전금지영역으로 발전기 분할

Table 2. Partition of Generators with Prohibited Zones

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c
G01	150	455	0.000299	10.07	671.03
G02-1	419	455	0.000183	10.22	574.54
G02-2	304	419	0.000183	10.22	574.54
G02-3	184	304	0.000183	10.22	574.54
G02-4	150	184	0.000183	10.22	574.54
G03	20	130	0.001126	8.80	374.59
G04	20	130	0.001126	8.80	374.59
G05-1	389	470	0.000205	10.40	461.37
G05-2	259	389	0.000205	10.40	461.37
G05-3	179	259	0.000205	10.40	461.37
G05-4	150	179	0.000205	10.40	461.37
G06-1	429	460	0.000301	10.10	630.14
G06-2	364	429	0.000301	10.10	630.14
G06-3	229	364	0.000301	10.10	630.14
G06-4	135	229	0.000301	10.10	630.14
G07	135	465	0.000364	9.87	548.20
G08	60	300	0.000338	11.21	227.09
G09	25	162	0.000807	11.21	173.72
G10	25	160	0.001203	10.72	175.95
G11	20	80	0.003586	10.21	186.86
G12-1	64	80	0.005513	9.90	230.27
G12-2	29	64	0.005513	9.90	230.27
G12-3	20	29	0.005513	9.90	230.27
G13	25	85	0.000371	13.12	225.28
G14	15	55	0.001929	12.12	309.03
G15	15	55	0.004447	12.41	323.79

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c
G01	150	455	0.000299	10.1	671
G02-1	419	455	0.000183	10.2	574
G02-2	304	419	0.000183	10.2	574
G02-3	184	304	0.000183	10.2	574
G02-4	150	184	0.000183	10.2	574
G03	20	130	0.001126	8.8	374
G04	20	130	0.001126	8.8	374
G05-1	389	470	0.000205	10.4	461
G05-2	304	389	0.000205	10.4	461
G05-3	179	304	0.000205	10.4	461
G05-4	150	179	0.000205	10.4	461
G06-1	429	460	0.000301	10.1	630
G06-2	364	429	0.000301	10.1	630
G06-3	229	364	0.000301	10.1	630
G06-4	135	229	0.000301	10.1	630
G07	135	465	0.000364	9.8	548

G08	60	300	0.000338	11.2	227
G09	25	162	0.000807	11.2	173
G10	25	160	0.001203	10.7	175
G11	20	80	0.003586	10.2	186
G12-1	54	80	0.005513	9.9	230
G12-2	29	54	0.005513	9.9	230
G12-3	20	29	0.005513	9.9	230
G13	25	85	0.000371	13.1	225
G14	15	55	0.001929	12.1	309
G15	15	55	0.004447	12.4	323

표 3. 15-발전기에 대한 DPDB
 Table 3. DPDB for 15-Generators

G_i	P_i^{min}	P_i^{max}	a	b	c	$F(P_i^{max})$	$F(P_i^{min})$	c_i	P_i	k
G3	25	85	0.000371	13.12	225.28	1,343.160	553.512	13.1608	342,000	1
G15	15	55	0.004447	12.41	323.79	1,019.792	510.941	12.7213	342,000	2
G14	15	55	0.001929	12.12	309.03	981.465	491.234	12.2350	340,200	3
G09	25	162	0.000807	11.21	173.72	2,010.919	454.474	11.3309	335,000	4
G08	60	300	0.000338	11.21	227.09	3,620.510	900.907	11.3317	302,500	5
G10	25	160	0.001203	10.72	175.95	1,921.947	444.702	10.9426	289,000	6
G12-1	54	80	0.005513	9.90	230.27	1,057.553	886.451	10.6389	273,000	7
G05-1	389	470	0.000205	10.40	461.37	5,394.655	4,537.991	10.5761	278,000	8
G11	20	80	0.003586	10.21	186.86	1,026.610	392.494	10.5886	263,000	9
G05-2	304	389	0.000205	10.40	461.37	4,537.991	3,168.722	10.5328	263,000	10
G05-3	179	304	0.000205	10.40	461.37	3,168.722	2,329.538	10.4898	253,000	11
G05-4	150	179	0.000205	10.40	461.37	2,329.538	2,025.983	10.4674	249,400	12
G12-2	29	64	0.005513	9.90	230.27	886.451	522.006	10.4127	249,000	13
G06-1	429	460	0.000301	10.10	630.14	5,339.632	5,018.296	10.3576	248,000	14
G02-1	339	455	0.000183	10.22	574.54	5,252.886	4,080.151	10.3353	248,000	15
G06-2	419	429	0.000301	10.10	630.14	5,018.436	4,914.894	10.3532	231,200	16
G02-2	304	419	0.000183	10.22	574.54	4,888.848	3,698.332	10.3323	230,200	17
G02-3	184	304	0.000183	10.22	574.54	3,698.332	2,461.216	10.3309	218,700	18
G02-4	150	184	0.000183	10.22	574.54	2,461.216	2,111.658	10.2811	207,000	19
G06-3	229	364	0.000301	10.10	630.14	4,346.421	2,958.825	10.2785	203,000	20
G01	150	455	0.000299	10.07	671.03	5,314.780	2,188.258	10.2509	189,000	21
G06-4	135	229	0.000301	10.10	630.14	2,958.825	1,999.126	10.2096	153,000	22
G12-3	20	29	0.005513	9.90	230.27	320.006	430.475	10.1701	149,000	23
G07	135	465	0.000364	9.87	548.20	5,216.456	1,887.284	10.0884	116,000	24
G03	20	130	0.001126	8.80	374.59	1,537.619	551.040	8.9889	105,000	25
G04	20	130	0.001126	8.80	374.59	1,537.619	551.040	8.9889	94,000	26

G_i	P_i^{min}	P_i^{max}	a	b	c	$F(P_i^{max})$	$F(P_i^{min})$	c_i	P_i	k
G3	25	85	0.000371	13.1	225	1,341.180	552.732	13.1408	342,000	1
G15	15	55	0.004447	12.4	323	1,018.452	510.001	12.7113	342,000	2
G14	15	55	0.001929	12.1	309	980.335	490.934	12.2350	340,200	3
G09	25	162	0.000807	11.2	173	2,008.579	453.504	11.3309	335,000	4
G08	60	300	0.000338	11.2	227	3,617.420	900.217	11.3217	302,500	5
G10	25	160	0.001203	10.7	175	1,917.797	443.252	10.9226	289,000	6
G12-1	54	80	0.005513	9.9	230	1,057.283	780.676	10.6387	286,400	7
G05-1	389	470	0.000205	10.4	461	5,394.285	4,537.621	10.5761	278,000	8
G11	20	80	0.003586	10.2	186	1,024.950	391.434	10.5886	272,300	9
G05-2	304	389	0.000205	10.4	461	4,537.621	3,641.545	10.5421	263,000	10
G05-3	179	304	0.000205	10.4	461	3,641.545	2,329.168	10.4990	253,000	11
G05-4	150	179	0.000205	10.4	461	2,329.168	2,025.613	10.4674	251,300	12
G06-1	429	460	0.000301	10.1	630	5,339.632	5,018.296	10.3576	248,400	13
G02-1	419	455	0.000183	10.2	574	5,252.886	4,879.928	10.3399	245,000	14
G12-2	29	54	0.005513	9.9	230	780.676	521.736	10.3576	241,700	15
G06-2	364	429	0.000301	10.1	630	5,018.296	4,346.281	10.3387	239,200	16
G02-2	304	419	0.000183	10.2	574	4,879.928	3,691.712	10.3323	237,000	17
G02-3	184	304	0.000183	10.2	574	3,691.712	2,456.996	10.2833	221,200	18
G01	150	455	0.000299	10.1	671	5,328.400	2,192.728	10.2809	209,200	19
G06-3	229	364	0.000301	10.1	630	4,346.281	2,958.685	10.2785	178,700	20
G02-4	150	184	0.000183	10.2	574	2,456.996	2,108.118	10.2611	162,000	21
G06-4	135	229	0.000301	10.1	630	2,958.685	1,998.986	10.2096	161,800	22

G12-3	20	29	0.005513	9.9	230	521.736	430.205	10.1701	152,000	23
G07	135	465	0.000364	9.8	548	5,183.706	1,877.634	10.0184	151,500	24
G03	20	130	0.001126	8.8	374	1,537.029	550.450	8.9889	118,500	25
G04	20	130	0.001126	8.8	374	1,537.029	550.450	8.9889	107,500	26

표 4. SFBSO 알고리즘 수행
 Table 4. Process of SFBSO Algorithm

구분	$P_d = 2,650MW$	$P_d = 2,630MW$	$P_d = 2,630MW$	
DPDB	$k = 10$	$k = 10$	$k = 10$	
Step.	$\alpha = 47.00$	$\alpha = -27.00$	$\alpha = 8.00$	
$F(P)$	$\Sigma P_i = P_d$	\$32,506.8323	\$32,294.4562	\$32,258.8535
	$\beta = 1.0$	\$32,506.8323	\$32,294.3675	\$32,256.7667
	$\beta = 0.1$	\$32,506.6063	\$32,294.3088	\$32,256.7558
	$\beta = 0.01$	\$32,506.5854	\$32,294.3037	\$32,256.7553
	$\beta = 0.0001$	\$32,506.5832	\$32,294.3030	\$32,256.7553

$P_d = 2,650MW$ 의 경우, Lamda-Iteration법^[11]은 $F(P)$ 는 최소치이지만 G_{05} 발전기가 운전금지영역에서 작동되어 제외시키면 동적 계획법 (Dynamic Programming)^[11]과 Lamda-Logic^[7]과 소수점 아래 부분만 차이가 발생하는 결과를 얻었다. 그러나 두 알고리즘은 운전금지영역의 하한치까지 발전하는 경우를 고려하여 발전량 조절 실패시 운전금지영역으로 진입할 가능성이 높은 단점이 있다. 그러나 제안된 SFBSO 알고리즘은 운전 금지영역의 상한과 하한치를 피해 발전할 수 있도록 설계되었다.

$P_d = 2,650MW$ 와 동일한 운전금지영역 데이터에 대해 $P_d = 2,630MW$ 를 적용한 경우, SFBSO 알고리즘은 CCPSO^[10]와 Lamda-Logic^[7]의 해를 개선하는 효과를 얻었을 뿐 아니라 전력 손실량 P_{loss} 를 0.0으로 하는 최적의 결과를 얻었다. $P_d = 2,650MW$ 와 다른 운전금지영역 데이터에 대해 $P_d = 2,630MW$ 를 적용한 경우에도, SFBSO 알고리즘은 PSO^[13]과 ICA- PSO^[14]의 해를 개선하는 효과뿐만 아니라 전력 손실량 P_{loss} 를 0.0으로 하는 최적의 결과를 얻었다.

V. 결론

본 논문은 운전금지영역을 가진 볼록함수를 적용하는 발전분야에서 가장 경제적인 비용으로 전력을 생산할 수 있는 경제급전 최적화 문제에 대한 근사 해를 빠르고 간단히 구하는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 $P_i \leftarrow P_i^{max}$ 초기 치에 대해 단순히

표 5. 실험 데이터에 대한 알고리즘 결과
Table 5. Results of the Algorithms for Benchmark Data

$P_d = 2,650MW$													Prohibited Zones
G_i	P_i^{min}	P_i^{max}	Lamda-Iteration ^[11]		Dynamic Programming ^[11]		Lamda-Logic ^[7]		ICA-PSO ^[14]		SFBSO		
			P	$F(P)$	P	$F(P)$	P	$F(P)$	P	$F(P)$	P	$F(P)$	
G01	150	455	455.0	5,314.7805	455.0	5,314.7805	455.0000	5,314.7805	455.0	5,314.7805	455.0000	5,314.780	-
G02	150	455	455.0	5,262.5256	455.0	5,262.5256	455.0000	5,262.5256	420.00	4,899.2212	455.0000	5,262.526	[185,225],[305,335],[420,450]
G03	20	130	130.0	1,537.6194	130.0	1,537.6194	130.0000	1,537.6194	130.00	1,537.6194	130.0000	1,537.619	-
G04	20	130	130.0	1,537.6194	130.0	1,537.6194	130.0000	1,537.6194	130.00	1,537.6194	130.0000	1,537.619	-
G05	150	470	295.3*	3,550.3664	260.0	3,179.2280	260.0000	3,179.2280	260.00	3,179.2280	259.9999	3,179.227	[180,200],[240,335],[390,420]
G06	135	460	460.0	5,339.8316	460.0	5,339.8316	460.0000	5,339.8316	430.00	5,028.7949	460.0000	5,339.832	[230,255],[365,395],[430,455]
G07	135	465	465.0	5,216.4559	465.0	5,216.4559	465.0000	5,216.4559	465.00	5,216.4559	465.0000	5,216.456	-
G08	60	300	60.0	900.9068	60.0	900.9068	60.0000	900.9068	60.00	900.9068	60.0000	900.907	-
G09	25	162	25.0	454.4744	25.0	454.4744	25.0000	454.4744	25.00	454.4744	25.0000	454.474	-
G10	25	160	20.0	390.8312	20.0	390.8312	20.0000	390.8312	62.60	851.7363	25.0000	444.702	-
G11	20	80	43.4	636.7284	60.0	812.3696	70.0000	919.1314	80.00	1,026.6104	65.0002	865.663	-
G12	20	80	56.3	805.1145	75.0	1,003.7806	65.0000	897.0624	77.40	1,029.5571	64.9999	897.061	[30,55], [65,75]
G13	25	85	25.0	553.5119	25.0	553.5119	25.0000	553.5119	25.00	553.5119	25.0000	553.512	-
G14	15	55	15.0	491.2640	15.0	491.2640	15.0000	491.2640	15.00	491.2640	15.0000	491.264	-
G15	15	55	15.0	510.9406	15.0	510.9406	15.0000	510.9406	15.00	510.9406	15.0000	510.941	-
Total			2650.00	32502.9706	2650.00	32506.1394	2650.00	32506.1830	2650.00	32532.7207	2650.00	32506.5832	

* : Unit loading in prohibited zone

$P_d = 2,630MW$													Prohibited Zones
G_i	P_i^{min}	P_i^{max}	a_i	b_i	c_i	CCPSO ^[10]		Lamda-Logic ^[7]		SFBSO			
						P	$F(P)$	P	$F(P)$	P	$F(P)$		
G01	150	455	0.000299	10.07	671.03	455.0000	5,314.7805	455.0000	5,314.7805	455.0000	5,314.780	-	
G02	150	455	0.000183	10.22	574.54	380.0000	4,484.5652	380.0000	4,484.5652	455.0000	5,262.526	[185,225],[305,335],[420,450]	
G03	20	130	0.001126	8.80	374.59	130.0000	1,537.6194	130.0000	1,537.6194	130.0000	1,537.619	-	
G04	20	130	0.001126	8.80	374.59	130.0000	1,537.6194	130.0000	1,537.6194	130.0000	1,537.619	-	
G05	150	470	0.000205	10.40	461.37	170.0000	2,235.2945	170.0000	2,235.2945	259.9999	3,179.227	[180,200],[260,335],[390,420]	
G06	135	460	0.000301	10.10	630.14	460.0000	5,339.8316	460.0000	5,339.8316	460.0000	5,339.832	[230,255],[365,395],[430,455]	
G07	135	465	0.000364	9.87	548.20	430.0000	4,859.6036	430.0000	4,859.6036	465.0000	5,216.456	-	
G08	60	300	0.000338	11.21	227.09	71.7526	1,033.1768	60.0000	900.9068	60.0000	900.907	-	
G09	25	162	0.000807	11.21	173.72	58.9090	836.8904	56.87547	813.9045	25.0000	454.474	-	
G10	25	160	0.001203	10.72	175.95	160.0000	1,921.9468	160.0000	1,921.9468	25.0000	444.702	-	
G11	20	80	0.003586	10.21	186.86	80.0000	1,026.6104	80.0000	1,026.6104	50.1601	708.017	-	
G12	20	80	0.005513	9.90	230.27	80.0000	1,057.5532	80.0000	1,057.5532	59.8400	842.427	[30,55], [65,75]	
G13	25	85	0.000371	13.12	225.28	25.0000	553.5119	25.0000	553.5119	25.0000	553.512	-	
G14	15	55	0.001929	12.12	309.03	15.0000	491.2640	15.0000	491.2640	15.0000	491.264	-	
G15	15	55	0.004447	12.41	323.79	15.0000	510.9406	15.0000	510.9406	15.0000	510.941	-	
Total						2,660.6616	32,741.2183	2,659.9491	32,750.7006	2,630.0000	32,294.3030		
P_{loss}						30.6616		29.9491		0.0000			
Total Cost (\$/h)							32,704.0000		32,713.9510		32,294.3030		

$P_d = 2,630MW$													Prohibited Zones
G_i	P_i^{min}	P_i^{max}	a_i	b_i	c_i	PSO ^[12]		ICA-PSO ^[14]		SFBSO			
						P	$F(P)$	P	$F(P)$	P	$F(P)$		
G01	150	455	0.000299	10.1	671	440.4900	5,178.0577	455.0000	5,328.4005	455.0000	5,328.400	-	
G02	150	455	0.000183	10.2	574	179.5947	2,411.7685	419.9900	4,890.1777	455.0000	5,252.896	[185,225],[305,335],[420,450]	
G03	20	130	0.001126	8.8	374	21.0524	559.7602	130.0000	1,537.0294	130.0000	1,537.029	-	
G04	20	130	0.001126	8.8	374	87.1376	1,149.3606	130.0000	1,537.0294	130.0000	1,537.029	-	
G05	150	470	0.000205	10.4	461	360.7675	4,239.6634	260.0000	3,178.8580	271.5881	3,300.637	[180,200],[260,335],[390,420]	
G06	135	460	0.000301	10.1	630	395.8330	4,675.0751	429.9900	5,028.5513	460.0000	5,339.692	[230,255],[365,395],[430,455]	
G07	135	465	0.000364	9.8	548	432.0085	4,849.6171	465.0000	5,183.7059	465.0000	5,183.706	-	
G08	60	300	0.000338	11.2	227	168.9198	2,128.5462	60.0000	900.2168	60.0000	900.217	-	
G09	25	162	0.000807	11.2	173	162.0000	2,008.5789	25.0000	453.5044	25.0000	453.504	-	
G10	25	160	0.001203	10.7	175	138.4343	1,679.3014	76.7000	1,002.7671	25.0000	443.252	-	
G11	20	80	0.003586	10.2	186	52.6294	732.7526	80.0000	1,024.9504	43.4120	635.561	-	
G12	20	80	0.005513	9.9	230	66.8875	916.8511	54.7700	788.7606	54.9999	791.176	[30,40],[55,65]	
G13	25	85	0.000371	13.1	225	62.7471	1,048.4477	25.0000	552.7319	25.0000	552.732	-	
G14	15	55	0.001929	12.1	309	47.5574	888.8074	15.0000	490.9340	15.0000	490.934	-	
G15	15	55	0.004447	12.4	323	27.6065	668.7097	15.0000	510.0006	15.0000	510.001	-	
Total						2,643.6747	33,135.2975	2,641.4500	32,407.6180	2,630.0000	32,256.7553		
P_{loss}						13.6747		11.4500		0.0000			
Total Cost (\$/h)							32,508.1200		32,393.2300		32,256.7553		

10개의 레코드 데이터 값만 갱신하고, $\Sigma P_i = P_d$ 의 균형을 맞춘 후 $\beta=1.0, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001$ 에 대한 $F(P_i \pm \beta)$ 의 값의 발전량을 상호 교환하는 최적화 과정을 수행하였다. 15-발전기의 3가지 경우에 대해 적용한 결과, 제안된 SFBSO 알고리즘은 가장 빠르면서도, 단 1회 수행의 결정론적인 해를 구할 뿐 아니라 기존의 휴리스틱 알고리즘들에 비해 해를 개선하는 효과를 얻었다.

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, doi:10.1109/ISAP.2009.5352843.
- [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, doi:10.1109/TPWRS.2006.873410.
- [3] A. Pereira-Neto, C. Unsuhay 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, doi:10.1049/ip-gtd:20045287.
- [4] 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, doi:10.1109/TPWRS.2003.814889.
- [5] 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, May 2000, doi:10.1109/59.867138.
- [6] 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, Mar. 2011.
- [7] T. Adhinarayanan and M. Sydul, "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, doi:10.5370/JEET.2009.4.3.301.
- [8] M. Sydul, "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, doi:10.1016/j.ijepes.2009.11.002.
- [9] L. S. Coelho and V. C. Mariani, "An Improved Harmony Search Algorithm for Power Economic Load Dispatch," Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 10, pp. 2522-2526, Oct. 2009, doi:10.1016/j.enconman.2009.05.034.
- [10] 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, doi:10.1109/TPWRS.2009.2030293.
- [11] S. O. Orero and M. R. Irving, "Economic Dispatch of Generators with Prohibited Operating Zones: A Genetic Algorithm Approach," Proceedings of IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 6, pp. 529-534, Nov. 1996, doi:10.1049/ip-gtd:19960626 .
- [12] Z. L. Gaing, "Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints," IEEE Transaction Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 1187-1195, Aug, 2003, doi:10.1109/TPWRS.2003.814889.
- [13] 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, doi:10.1016/j.ijepes.2007.08.001.
- [14] M. S. Kumari and M. Sydulu, "A Fast Computational Genetic Algorithm for Economic Load Dispatch," International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 349-356, May, 2009.
- [15] 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, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2034525.
- [16] 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. 25, No. 4, pp. 1955-1964, Nov. 2010, doi:10.1109/TPWRS.2010.2043270.
- [17] 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, No. 6, pp. 249 - 257, Jul. 2009, doi:10.1016/j.ijepes.2009.01.010.

저자 소개

이 상 윤(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 ~ 2015년 3월 : 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 부교수
- 2015년 4월 ~ 현재 : 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 정교수

<관심분야 : 소프트웨어 프로젝트 관리, 개발 방법론, 분석과 설계 방법론, 시험 및 품질보증, 소프트웨어 신뢰성, 그래프 알고리즘>

- E-Mail : sulee@gwmu.ac.kr