

비볼록 발전비용함수 경제급전문제의 개선된 밸브지점 최적화 알고리즘

Improved Valve-Point Optimization Algorithm for Economic Load Dispatch Problem with Non-convex Fuel Cost Function

이상운*

Sang-Un Lee*

요약 비 볼록 발전비용함수에 대한 최적화 문제는 다항시간으로 해를 구하는 알고리즘이 알려져 있지 않아 전기 분야에서는 부득이 2차 함수만을 사용하고 있다. 본 논문은 비 볼록 발전비용함수의 경제급전 최적화 문제에 대한 밸브지점 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 초기 치로 최대 발전량 $P_i \leftarrow P_i^{\max}$ 로 설정하고, 평균 발전단가가 $\overline{c_i}$ 인 발전기 i 의 발전량을 밸브지점 P_{ik} 로 감소시키는 방법을 적용하였다. 제안된 알고리즘을 13과 40-발전기 데이터에 적용한 결과 기존의 휴리스틱 알고리즘보다 좋은 성능을 보였다. 따라서 비 볼록 발전비용함수의 경제급전 문제 최적 해는 각 발전기의 밸브지점 발전량으로 수렴함을 보였다.

Abstract There is no polynomial-time algorithm that can obtain the optimal solution for economic load dispatch problem with non-convex fuel cost functions. Therefore, electrical field uses quadratic fuel cost function unavoidably. This paper proposes a valve-point optimization (VPO) algorithm for economic load dispatch problem with non-convex fuel cost functions. This algorithm sets the initial values to maximum powers $P_i \leftarrow P_i^{\max}$ for each generator. It then reduces the generation power of generator i with an average power cost of $\overline{c_i}$ to a valve point power P_{ik} . The proposed algorithm has been found to perform better than the extant heuristic methods when applied to 13 and 40-generator benchmark data. This paper consequently proves that the optimal solution to economic load dispatch problem with non-convex fuel cost functions converges to the valve-point power of each generator.

Key Words : Economic Dispatch, Optimization, Valve-effect, Valve-point

1. 서 론

주어진 시간대의 부하를 공급할 수 있도록 발전비용이 각각 다른 n 대의 발전기 출력을 각각 어떻게 배분해야 전체 발전비용 (생산비용)이 가장 경제적인가를 결정하는 과정을 경제부하배분 (Economic Load Dispatch, ELD) 또는 간단히 경제급전 (Economic Dispatch, ED)이

라 한다.^[1]

n 개의 발전기가 전력을 경제적으로 공급하기 위해서는 각기 다른 발전량 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 로 가동되어야 하며, 이때의 발전비용 함수는 기본적으로 $a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$ 이며, 출력량을 증가시키기 위해 밸브를 열면 출력량이 감소하여 원하는 출력량을 얻기 위해서는 보다

*정회원, 강릉원주대학교 과학기술대학 멀티미디어공학과
접수일자 : 2015년 5월 21일, 수정완료 : 2015년 11월 27일
게재확정일자 : 2015년 12월 11일

Received: 21 May, 2015 / Revised: 27 November, 2015 /

Accepted: 11 December, 2015

*Corresponding Author: sulee@gwnu.ac.kr

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

많은 비용이 소요되는 밸브 효과 (valve-effect) 함수 $|e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))|$ 가 결합되어 $a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))|$ 인 비볼록 (non-convex) 형태를 나타낸다. 이러한 함수의 미분 불가능으로 인해 수학적 방법인 라그랑주 완화법 (Lagrangian relaxation), 경사법이나 감소된 경사법으로는 해를 구할 수 없는 문제점이 발생한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 경제급전 최적화와 관련된 연구는 휴리스틱 기법들인 유전자 알고리즘, 신경망, 퍼지, 군집 알고리즘, 개미집단 등 비결정적인 알고리즘이 대부분이다. 휴리스틱 알고리즘은 초기치를 랜덤하게 설정하고 수백 회 이상 수행한 결과 도출된 최소값을 최적해로 결정하며, 보통은 최소값, 최대값, 평균값과 표준편차로 알고리즘의 성능을 제시한다.^[2] 따라서, 비록 제시된 알고리즘의 최소값 성능이 좋다 할지라도 재현이 될 가능성은 매우 희박한 단점이 있으며, 보통은 평균값의 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 알고리즘이 간단하면서도 항상 동일한 값을 얻는 결정론적 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 밸브지점 (valve-point)으로 출력량을 유지하는 것이 비볼록 발전함수에 대한 최적해가 된다는 가정에 기반하고 있다. 따라서 제안된 알고리즘은 밸브지점을 찾는 방법으로 밸브지점 최적화 (valve-point optimization, VPO) 알고리즘이라 한다. 2장에서는 13과 40-발전기의 사례에 대한 경제급전 연구를 고찰해 본다. 3장에서는 결정론적 알고리즘으로 최적의 밸브지점을 간단히 찾는 VPO 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 13과 40-발전기에 적용하여 기존의 휴리스틱 알고리즘과 성능을 비교분석하여 본다.

II. 관련연구와 문제점

전력은 저장이 불가능한 특성으로 인해, 주어진 시간대에서 전력수급 균형을 맞추기 위해 총 발전량 ΣP_i 는 식 (1)과 같이 총 부하량 (또는 수요량) P_d 과 동일해야 한다.

$$\Sigma P_i = P_d \quad (1)$$

경제급전 대상 발전소의 발전기 n 개가 존재하며, 각

각의 발전비용이 차이가 발생한다고 가정한다. 이 경우 수요량이 $\Sigma P_i^{\min} \leq P_d \leq \Sigma P_i^{\max}$ 를 충족시키기 위한 경제급전 문제의 목적함수는 식 (2)와 같이 경제급전 총 발전비용을 최소화시키는 것이다.^[1,2]

$$\begin{aligned} \min \Sigma F(P_i) &= \sum_{i=1}^n F(P_i) \\ \text{subject to } \Sigma P_i &= P_d \text{ and } P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $F(P_i)$ 는 발전기 i 의 발전비용 (\$/MWh)으로 식 (3)을 적용한다. 왜냐하면 발전기를 가동하여 일정 출력에 도달하여 출력이 안정화될 때까지는 전력을 공급하지 않는 무부하 운전을 수행한다. 일단 발전기 출력이 안정화 된 이후에 전력을 공급할 수 있는 최초 시점이 최소 발전량 P_i^{\min} 이며, 이후 발전 용량을 증가시키기 위해 밸브를 열면 진동 발생으로 인한 밸브효과로 발전비용 $F(P_i)$ 는 식 (3)과 같이 복잡한 비볼록 함수 형태를 나타낸다.^[1,2]

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

여기서 P_i 는 발전기 i 의 발전량 (KW)이며, 각 발전기의 출력 범위 제약조건은 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 이다.

Coelho와 Mariani^[3]에서 인용된 표 1은 비볼록 발전비용함수를 적용한 경제급전 문제에서 가장 널리 알려진 13과 40-발전기 사례이다.

표 1. 실험 예제 데이터
Table 1. Benchmark Data

Fuel Cost Function of 13 Generators								
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	e	f	
1	0	680	0.00028	8.10	550	300	0.035	
2	0	360	0.00056	8.10	309	200	0.042	
3	0	360	0.00056	8.10	307	150	0.042	
4	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063	
5	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063	
6	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063	
7	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063	
8	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063	
9	60	180	0.00324	7.74	240	150	0.063	
10	40	120	0.00284	8.60	126	100	0.084	
11	40	120	0.00284	8.60	126	100	0.084	
12	55	120	0.00284	8.60	126	100	0.084	
13	55	120	0.00284	8.60	126	100	0.084	
Sum:	550	2,960	$P_d = 1,800 \text{ MW}$ and $P_d = 2,520 \text{ MW}$					

Fuel Cost Function of 40 Generators							
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	e	f
1	36	114	0.00690	6.73	94.71	100	0.084
2	36	114	0.00690	6.73	94.71	100	0.084
3	60	120	0.02028	7.07	309.54	100	0.084
4	80	190	0.00942	8.18	369.03	150	0.063
5	47	97	0.01140	5.35	148.89	120	0.077
6	68	140	0.01142	8.05	222.33	100	0.084
7	110	300	0.00357	8.03	287.71	200	0.042
8	135	300	0.00492	6.99	391.98	200	0.042
9	135	300	0.00573	6.60	455.76	200	0.042
10	130	300	0.00605	12.90	722.82	200	0.042
11	94	375	0.00515	12.90	635.20	200	0.042
12	94	375	0.00569	12.80	654.69	200	0.042
13	125	500	0.00421	12.50	913.40	300	0.035
14	125	500	0.00752	8.84	1760.40	300	0.035
15	125	500	0.00708	9.15	1728.30	300	0.035
16	125	500	0.00708	9.15	1728.30	300	0.035
17	220	500	0.00313	7.97	647.85	300	0.035
18	220	500	0.00313	7.95	649.69	300	0.035
19	242	550	0.00313	7.97	647.83	300	0.035

Fuel Cost Function of 40 Generators								
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	a	b	c	e	f	
20	242	550	0.00313	7.97	647.81	300	0.035	
21	254	550	0.00298	6.63	785.96	300	0.035	
22	254	550	0.00298	6.63	785.96	300	0.035	
23	254	550	0.00284	6.66	794.53	300	0.035	
24	254	550	0.00284	6.66	794.53	300	0.035	
25	254	550	0.00277	7.10	801.32	300	0.035	
26	254	550	0.00277	7.10	801.32	300	0.035	
27	10	150	0.52124	3.33	1055.10	120	0.077	
28	10	150	0.52124	3.33	1055.10	120	0.077	
29	10	150	0.52124	3.33	1055.10	120	0.077	
30	47	97	0.01140	5.35	148.89	120	0.077	
31	60	190	0.00160	6.43	222.92	150	0.063	
32	60	190	0.00160	6.43	222.92	150	0.063	
33	60	190	0.00160	6.43	222.92	150	0.063	
34	90	200	0.00010	8.95	107.87	200	0.042	
35	90	200	0.00010	8.62	116.58	200	0.042	
36	90	200	0.00010	8.62	116.58	200	0.042	
37	25	110	0.01610	5.88	307.45	80	0.098	
38	25	110	0.01610	5.88	307.45	80	0.098	
39	25	110	0.01610	5.88	307.45	80	0.098	
40	242	550	0.00313	7.97	647.83	300	0.035	
Sum:	4,817	12,722	$P_d = 10,500.MW$					

표 1의 데이터들에 대한 기존의 연구 결과는 표 2에 제시하였다.^[1-26] 표 2에서 각 발전기의 출력량을 제시한 경우는 이를 다시 MS-Office Excel-2007로 재계산하여 ()에 제시하였다.

13-발전기 ($P_d = 1,800.MW$)의 경우 HS^[10]와 MGSO^[11] 알고리즘이 가장 좋은 결과를 얻었으며, 최적 해는 \$17,960.3682이다. 13-발전기 $P_d = 2,520(MW)$ 의 경우 SDE^[13]와 MGSO^[11] 알고리즘이 최적해 \$24,164.0510을

얻었다. 40-발전기 $P_d = (10,500.MW)$ 의 경우 MGSO^[11]와 CCPSO^[26] 알고리즘 가장 좋은 결과를 나타내었으며, \$121,412.5493의 최적 해를 찾았다.

지금까지 다양한 휴리스틱 알고리즘들이 제안되었으나 3개의 실험 데이터 모두에 적용된 사례는 IS^[8], CIS^[8], FCIS^[8]과 MGSO^[11]만이 존재하며, 가장 좋은 결과는 MGSO^[11]임을 알 수 있다.

또한, 휴리스틱 알고리즘의 특징은 초기치를 랜덤하게 설정함으로 인해 항상 다른 결과를 얻는 단점이 있다. 따라서 알고리즘 수행 결과는 최소값, 최대값, 평균과 표준편차를 제시하고 있으며, 최소값이 재현될 가능성은 매우 희박하여 일반적으로 평균값을 해당 알고리즘의 성능으로 평가한다.

III. 밸브지점 최적화 알고리즘

본 장에서 제안하는 경제급전 최적화 알고리즘의 특징은 만약, 밸브효과를 고려한 비볼록 발전비용함수를 적용할 경우, 각 발전기의 발전량을 가능한 밸브지점으로 설정하는 것이 최적 해를 얻을 수 있다는 가정에 기반하고 있다. 이를 위해 알고리즘은 다음과 같이 수행된다.

- Step 1. 각 발전기 G_i 의 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 에 대해 "1" 간격으로 $[a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))| - (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i)]$ 를 계산한 값이 최소가 되는 발전량들을 밸브 지점으로 결정한다.
- Step 2. $P_{i1} \leftarrow P_i^{\max}$, $P_{i2} \leftarrow P_{i v_j}$ 로 설정한다. 여기서 v_j 는 j 번째 밸브 지점이다.
- Step 3. 각 발전기의 발전량을 감소시키는 기준은 식 (4)의 평균 발전단가 (average unit power cost)가 $\max \bar{c}_i$ 인 발전기 i 에 대해 $P_{i1} \leftarrow P_{i2}$, $P_{i2} \leftarrow P_{i v_{j-1}}$ 로 설정한다. 이 과정을 $\Sigma P_i - P_d = \alpha \geq 0$ 일 때까지 반복 수행한다. 이때의 수행횟수를 k , $\Sigma P_i - P_d < 0$ 일 때의 수행횟수를 $k+1$ 이라 하자. 즉, α 는 $k+1$ 번째 발전기의 출력량을 다음 밸브지점으로 감소시키는 량보다 작은 값이다. $\Sigma P_i - P_d = \alpha \geq 0$ 을 α^+ -VPO, $\Sigma P_i - P_d < 0$ 를 α^- -VPO라 하자. 만

표 2. 40 발전기 최적화 결과

Table 2. Optimization Results for the 40 Generators

Case with 13 Generators and Load Demand of 1,800 MW				
Method	Min Cost	Mean Cost	Max Cost	St Dev
Improved Genetic Algorithm (IGA) ^[4]	18,063.580	18,066.40	18,293.47	45.79
Particle Swarm Optimization (PSO) ^[5]	18,030.720	-	-	-
Evolutionary Programming (EP) ^[6]	17,994.070	-	-	-
Hybrid Evolutionary Programming with SQP (HEP-SQP) ^[5]	17,991.030	-	-	-
Modified Particle Swarm Optimization (MPSO) ^[7]	17,973.340	-	-	-
Artificial Immune System (IS) ^[8]	17,972.90	17,976.14	17,989.84	5.94
Hybrid Particle Swarm with SQP (HPS-SQP) ^[5]	17,969.930	-	-	-
Pattern Search (PS) ^[9]	17,969.170	-	-	-
Cultural IS (CIS) ^[8]	17,964.68	17,974.28	17,989.23	4.81
Fuzzy CIS (FCIS) ^[8]	17,964.37	17,974.50	17,989.81	3.19
Harmony Search (HS) ^[10]	17,960.3661 (17,960.3708)	-	-	-
Modified Group Search Optimizer (MGSO) ^[11]	17,960.3661 (17,960.3682)	-	-	-
Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming (DEC-SQP) ^[3]	17,938.9521	17,943.1339	17,944.8105	1.9735

Case with 13 Generators and Load Demand of 2,520 MW				
Method	Min Cost	Mean Cost	Max Cost	St Dev
Cultural Immune System (CIS) ^[8]	24,171.13	24,190.34	24,289.44	31.68
Fuzzy CIS (FCIS) ^[8]	24,171.09	24,187.72	24,318.58	33.12
Artificial Immune System (IS) ^[8]	24,170.57	24,193.72	24,289.03	35.52
Distributed Tabu Search Algorithm (DTSA) ^[12]	24,169.950	-	-	-
Self-Adaptive Differential Evolution (SDE) ^[13]	24,164.05	24,168.28	24,200.05	-
Modified Group Search Optimizer (MGSO) ^[11]	24,164.0508 (24,164.0510)	-	-	-

Case with 40 Generators and Load Demand of 10,500 MW				
Method	Min Cost	Mean Cost	Max Cost	St Dev
Genetic Algorithm (GA) ^[11]	119,732.25 (123,966.653)	-	-	-
Embedded Evolutionary Programming-PSO (CEP-PSO) ^[14]	123,670.000	124,145.60	124,900.00	-
Particle Swarm Optimization (PSO) ^[5]	122,930.450	-	-	-
Evolutionary Programming (EP) ^[6]	122,624.350	-	-	-
Hybrid Evolutionary Programming with SQP (HEP-SQP) ^[15]	122,379.630	-	-	-
Modified Particle Swarm Optimization (MPSO) ^[16]	122,252.265	-	-	-
Hybrid Particle Swarm with SQP (HPS-SQP) ^[7]	122,094.670	-	-	-
New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex (NPSO-LRS) ^[17]	121,664.430 (121,664.8600)	122,209.31	122,981.59	-
Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming (DEC-SQP) ^[3]	121,741.9793 (121,532.104)	122,295.12	122,839.29	386.18
Improved PSO (IPSO) ^[18]	121,495.7041 (121,504.702)	121,699.30	122,168.116	155.619
Self-Organizing Hierarchical PSO (SOH-PSO) ^[19]	121,501.1400 (121,501.3719)	1	-	-
Artificial Immune System (IS) ^[8]	121,489.110	-	122,163.56	106.88
Hybrid CLONAL Selection Algorithm (SA-CLONAL) ^[20]	121,486.12	121,737.73	121,591.70	-
Quantum-inspired PSO (QPSO) ^[21]	121,448.2100 (121,447.7560)	121,507.03	-	-
Fuzzy CIS (FCIS) ^[8]	121,446.710	-	121,863.39	138.04
Genetic Algorithm (GA) ^[22]	121,432.177	121,662.67	-	-
Biogeography-Based Optimization (BBO) ^[23]	121,426.9500 (121,426.7427)	-	-	-
Cultural Immune System (CIS) ^[8]	121,423.680	-	122,147.93	144.81
Improved PSO for Nonconvex (ICA-PSO) ^[24]	121,413.2000 (121,422.1684)	121,717.97	-	-
Hybrid Differential Evolution with BBO (DE/BBO) ^[25]	121,420.8900 (121,420.9070)	-	-	-
Modified Group Search Optimizer (MGSO) ^[11]	121,412.5693 (121,412.5695)	-	-	-
Improved Coordinated Aggregation-based PSO (CCPSO) ^[26]	121,403.5362 (121,412.5493)	-	-	-

약, $k+1$ 번째와 $k+2$ 번째의 \bar{c}_i 가 동일하면 동시에 출력량을 감소시킨다.

$$c_i = \frac{F(P_{i1}) - F(P_{i2})}{P_{i1} - P_{i2}} \quad (4)$$

α^\mp -VPO에 대해 $k+1$ 번째 발전기 출력을 감소시켜 $\alpha < 0$ 을 $\alpha \geq 0$ 가 될 때까지 k 번째 발전기 출력을 증가시키는 경우와 $k-1 \rightarrow k \rightarrow k-1$ 의 발전기 출력을 증가시키는 경우에 대해 α 값을 계산한다. α^+ 와 α^\mp 의 값 중 가장 작은 경우를 선택한다.

Step 4. 선택된 $\Sigma P_i - P_d = \alpha > 0$ 에 대해, $P_{i2} \leftarrow P_{i1} - 1$ 로 설정하여 $c_i = F(P_i) - F(P_i - 1)$ 을 계산하고, $\max c_i$ 인 발전기 i 에 대해 $P_i \leftarrow P_i - 1$ 로 설정한다. 이 과정을 $\alpha = 0$ 일 때까지 수행한다.

Step 5. 밸브지점의 정밀도를 0.0001까지 맞추는 과정은 다음의 교환 방법을 적용한다.
 $P_i \pm \beta, (\beta = 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001)$ 에 대해
 $\max [F(P_i) - F(P_i - \beta)] > \min [F(P_i + \beta)]$

표 3. 13과 40-발전기의 밸브 지점
 Table 3. The Valve-point for 13 and 40-Generators

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	Valve-Point (정밀도: 1.0)								Valve-Point (정밀도: 0.0001)								P_i^{\max}
1	0	680	0	90	180	269	359	449	539	628	0.00	89.7598	179.5196	269.2794	359.0392	448.7990	538.5587	628.3185	680.00
2	0	360	0	75	150	224	299	-	-	-	0.00	74.7998	149.5997	224.3995	299.1993	-	-	-	360.00
3	0	360	0	75	150	224	299	-	-	-	0.00	74.7998	149.5997	224.3995	299.1993	-	-	-	360.00
4	60	180	60	110	160	-	-	-	-	-	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	180.00	
5	60	180	60	110	160	-	-	-	-	-	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	180.00	
6	60	180	60	110	160	-	-	-	-	-	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	180.00	
7	60	180	60	110	160	-	-	-	-	-	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	180.00	
8	60	180	60	110	160	-	-	-	-	-	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	180.00	
9	60	180	60	110	160	-	-	-	-	-	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	180.00	
10	40	120	40	77	115	-	-	-	-	-	40.00	77.3999	114.7998	-	-	-	-	120.00	
11	40	120	40	77	115	-	-	-	-	-	40.00	77.3999	114.7998	-	-	-	-	120.00	
12	55	120	55	92	-	-	-	-	-	-	55.00	92.3999	-	-	-	-	-	120.00	
13	55	120	55	92	-	-	-	-	-	-	55.00	92.3999	-	-	-	-	-	120.00	

G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	Valve-Point (정밀도: 1.0)								Valve-Point (정밀도: 0.0001)								P_i^{\max}
1	36	114	36	73	111	-	-	-	-	-	36.0000	73.3999	110.7998	-	-	-	-	36.0000	
2	36	114	36	73	111	-	-	-	-	-	36.0000	73.3999	110.7998	-	-	-	-	36.0000	
3	60	120	60	97	-	-	-	-	-	-	60.0000	97.3999	-	-	-	-	-	60.0000	
4	80	190	80	130	180	-	-	-	-	-	80.0000	129.8666	179.7331	-	-	-	-	80.0000	
5	47	97	47	88	-	-	-	-	-	-	47.0000	87.7999	-	-	-	-	-	47.0000	
6	68	140	68	105	-	-	-	-	-	-	68.0000	105.3999	-	-	-	-	-	68.0000	
7	110	300	110	185	260	-	-	-	-	-	110.0000	184.7998	259.5997	-	-	-	-	110.0000	
8	135	300	135	210	285	-	-	-	-	-	135.0000	209.7998	284.5997	-	-	-	-	135.0000	
9	135	300	135	210	285	-	-	-	-	-	135.0000	209.7998	284.5997	-	-	-	-	135.0000	
10	130	300	130	205	280	-	-	-	-	-	130.0000	204.7998	279.5997	-	-	-	-	130.0000	
11	94	375	94	169	244	318	-	-	-	-	94.0000	168.7998	243.5997	318.3995	-	-	-	94.0000	
12	94	375	94	169	244	318	-	-	-	-	94.0000	168.7998	243.5997	318.3995	-	-	-	94.0000	
13	125	500	125	215	305	394	484	-	-	-	125.0000	214.7598	304.5196	394.2794	484.0392	-	-	125.0000	
14	125	500	125	215	305	394	484	-	-	-	125.0000	214.7598	304.5196	394.2794	484.0392	-	-	125.0000	
15	125	500	125	215	305	394	484	-	-	-	125.0000	214.7598	304.5196	394.2794	484.0392	-	-	125.0000	
16	125	500	125	215	305	394	484	-	-	-	125.0000	214.7598	304.5196	394.2794	484.0392	-	-	125.0000	
17	220	500	220	310	400	489	-	-	-	-	220.0000	309.7598	399.5196	489.2794	-	-	-	220.0000	
18	220	500	220	310	400	489	-	-	-	-	220.0000	309.7598	399.5196	489.2794	-	-	-	220.0000	
19	242	550	242	332	422	511	-	-	-	-	242.0000	331.7598	421.5196	511.2794	-	-	-	242.0000	
20	242	550	242	332	422	511	-	-	-	-	242.0000	331.7598	421.5196	511.2794	-	-	-	242.0000	
21	254	550	254	344	434	523	-	-	-	-	254.0000	343.7598	433.5196	523.2794	-	-	-	254.0000	
22	254	550	254	344	434	523	-	-	-	-	254.0000	343.7598	433.5196	523.2794	-	-	-	254.0000	
23	254	550	254	344	434	523	-	-	-	-	254.0000	343.7598	433.5196	523.2794	-	-	-	254.0000	
24	254	550	254	344	434	523	-	-	-	-	254.0000	343.7598	433.5196	523.2794	-	-	-	254.0000	
25	254	550	254	344	434	523	-	-	-	-	254.0000	343.7598	433.5196	523.2794	-	-	-	254.0000	
26	254	550	254	344	434	523	-	-	-	-	254.0000	343.7598	433.5196	523.2794	-	-	-	254.0000	
27	10	150	10	51	92	132	-	-	-	-	10.0000	50.7999	91.5998	132.3997	-	-	-	10.0000	
28	10	150	10	51	92	132	-	-	-	-	10.0000	50.7999	91.5998	132.3997	-	-	-	10.0000	
29	10	150	10	51	92	132	-	-	-	-	10.0000	50.7999	91.5998	132.3997	-	-	-	10.0000	
30	47	97	47	88	-	-	-	-	-	-	47.0000	87.7999	-	-	-	-	-	47.0000	
31	60	190	60	110	160	-	-	-	-	-	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	60.0000	
32	60	190	60	110	160	-	-	-	-	-	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	60.0000	
33	60	190	60	110	160	-	-	-	-	-	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	60.0000	
34	90	200	90	165	-	-	-	-	-	-	90.0000	164.7998	-	-	-	-	-	90.0000	
35	90	200	90	165	-	-	-	-	-	-	90.0000	164.7998	-	-	-	-	-	90.0000	
36	90	200	90	165	-	-	-	-	-	-	90.0000	164.7998	-	-	-	-	-	90.0000	
37	25	110	25	57	89	-	-	-	-	-	25.0000	57.0571	89.1141	-	-	-	-	25.0000	
38	25	110	25	57	89	-	-	-	-	-	25.0000	57.0571	89.1141	-	-	-	-	25.0000	
39	25	110	25	57	89	-	-	-	-	-	25.0000	57.0571	89.1141	-	-	-	-	25.0000	
40	242	550	242	332	422	511	-	-	-	-	242.0000	331.7598	421.5196	511.2794	-	-	-	242.0000	

$-F(P_i)]$, $i \neq j$ 이면 $P_i \leftarrow P_i - \beta$, $P_j \leftarrow P_j + \beta$ 로 발전량을 교환한다.

위 알고리즘의 Step 5는 초기에 설정한 밸브지점의 정밀도 (유효 자리수)가 1.0이기 때문에 정밀도를 0.0001까지 맞추는 단계이다. 만약, 밸브지점 정밀도를 0.0001의 값을 적용할 경우 이 단계는 수행하지 않아도 동일한 결과를 얻을 수 있다.

IV. 적용 결과 및 분석

13과 40-발전기에 대해 $P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}$ 에 대해 1간격의 $[a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))]| - [a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i]$ 가 최소가 되는 발전량을 구한 밸브 지점

(정밀도 1.0)과 정밀도 0.0001의 결과는 표 3과 같다.

제안된 VPO 알고리즘을 기존의 휴리스틱 알고리즘들과 비교한 결과는 표 4에 제시하였다.

40-발전기에 대해 VPO 알고리즘을 수행하는 과정은 다음과 같다. $P_i \leftarrow P_i^{\max}$ 에 대한 초기치 $\Sigma P_i^{\max} = 12,722MW$ 에 대해 출력량을 $P_d = 10,500MW$ 로 $\Sigma P_i - P_d = 2,222MW$ 를 감소시키기 위해 $\max \bar{c}_i = G_{27} (150 \rightarrow 132) = 156.6269$ 가 첫 번째로 결정되었다. 수행되는 순서는 다음과 같다. $G_{28} (150 \rightarrow 132)$, $G_{29} (150 \rightarrow 132)$, $G_{27} (132 \rightarrow 92)$, $G_{28} (132 \rightarrow 92)$, $G_{29} (132 \rightarrow 92)$, $G_{27} (92 \rightarrow 51)$, $G_{28} (92 \rightarrow 51)$, $G_{29} (92 \rightarrow 51)$, $G_{27} (51 \rightarrow 10)$, $G_{28} (51 \rightarrow 10)$, $G_{29} (51 \rightarrow 10)$, $G_{13} (500 \rightarrow 484), \dots, G_{12} (169 \rightarrow 94) \frac{k=53}{+79} G_{35} (200 \rightarrow 165) \frac{54}{+44} G_{36} (200 \rightarrow 165) \frac{55}{+9} G_{11} (169 \rightarrow 94) \frac{56}{-66} \dots$ 으로 $k=55$ 까지 수행하면 α^+ -VPO 알고리즘이 된다.

표 4. 13과 40-발전기의 알고리즘 비교

Table 4. Comparison of Algorithms for 13 and 40-Generators

Case with 13 Generators and Load Demand of 1,800 MW																	
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	HS ^{III}		MGSO ^{III}		VPO		Valve-Point						P_i^{\max}		
			P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$									
1	0	680	628.3185	5,749.920	628.3185	5,749.920	628.31853	5,749.9197	0.00	89.7398	179.5196	269.2794	359.0392	448.7990	538.5587	628.3185	680.00
2	0	360	149.5994	1,533.290	149.5996	1,533.290	149.59965	1,533.2900	0.00	74.7998	149.5997	224.3995	299.1993	-	-	-	360.00
3	0	360	222.7491	2,149.442	222.7491	2,149.442	222.74907	2,149.4430	0.00	74.7998	149.5997	224.3995	299.1993	-	-	-	360.00
4	60	180	109.8666	1,129.477	109.8665	1,129.476	60.00000	716.0640	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.00
5	60	180	60.0000	716.064	60.0000	716.064	109.86655	1,129.4761	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.00
6	60	180	109.8666	1,129.477	109.8666	1,129.477	109.86655	1,129.4761	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.00
7	60	180	109.8666	1,129.477	109.8666	1,129.477	109.86655	1,129.4761	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.00
8	60	180	109.8666	1,129.477	109.8665	1,129.476	109.86655	1,129.4761	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.00
9	60	180	109.8666	1,129.477	109.8665	1,129.476	109.86655	1,129.4761	60.00	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.00
10	40	120	40.0000	474.544	40.0000	474.544	40.00000	474.5440	40.00	77.3999	114.7998	-	-	-	-	-	120.00
11	40	120	40.0000	474.544	40.0000	474.544	40.00000	474.5440	40.00	77.3999	114.7998	-	-	-	-	-	120.00
12	55	120	55.0000	607.591	55.0000	607.591	55.00000	607.5910	55.00	92.3999	-	-	-	-	-	-	120.00
13	55	120	55.0000	607.591	55.0000	607.591	55.00000	607.5910	55.00	92.3999	-	-	-	-	-	-	120.00
Sum	550	2,960	1,800.0000	17,960.3708	1,800.0000	17,960.3682	1,800.0000	17,960.36613									
		차이		+0.0026		0		-0.00207									

Case with 13 Generators and Load Demand of 2,520 MW															
G_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}	MGSO ^{III}		VPO		Valve-Point						P_i^{\max}		
			P_i	$F(P_i)$	P_i	$F(P_i)$									
1	0	680	628.3185	5,749.920	628.3185	5,749.9197	0.0000	89.7398	179.5196	269.2794	359.0392	448.7990	538.5587	628.3185	680.0000
2	0	360	299.1993	2,782.646	299.1993	2,782.6457	0.0000	74.7998	149.5997	224.3995	299.1993	-	-	-	360.0000
3	0	360	294.4840	2,770.397	294.4840	2,770.3967	0.0000	74.7998	149.5997	224.3995	299.1993	-	-	-	360.0000
4	60	180	159.7331	1,559.002	159.7331	1,559.0017	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.0000
5	60	180	159.7331	1,559.002	159.7331	1,559.0017	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.0000
6	60	180	159.7331	1,559.002	159.7331	1,559.0017	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.0000
7	60	180	159.7331	1,559.002	159.7331	1,559.0017	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.0000
8	60	180	159.7331	1,559.002	159.7331	1,559.0017	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.0000
9	60	180	159.7331	1,559.002	159.7331	1,559.0017	60.0000	109.8666	159.7331	-	-	-	-	-	180.0000
10	40	120	77.3999	808.653	77.3999	808.6530	40.0000	77.3999	114.7998	-	-	-	-	-	120.0000
11	40	120	77.3999	808.653	77.3999	808.6530	40.0000	77.3999	114.7998	-	-	-	-	-	120.0000
12	55	120	92.3999	944.886	92.3999	944.8864	55.0000	92.3999	-	-	-	-	-	-	120.0000
13	55	120	92.3999	944.886	92.3999	944.8864	55.0000	92.3999	-	-	-	-	-	-	120.0000
Sum	550	2,960	2,520.0000	24,164.0510	2,520.0000	24,164.0510									
		차이		0		0									

G_2 (299→224)로 감소시키고, k 번째를 G_3 (299←224)로 설정하면 α^+ -VPO와 동일하게 $\alpha = 22$ 를 얻는다. 따라서, $k+1$ 번째를 G_2 (299→224)로 감소시키고, $k-1$ 번째를 G_1 (539←449)로 증가시킨 후 k 번째를 G_3 (224→150)으로 감소시키고, 다시 $k-1$ 번째를 G_1 (628←539)로 증가시킨 α^+ -VPO의 $\alpha = 2$ 로 가장 작은 값을 얻는다. 이를 $\alpha = 0$ ($\Sigma P_i = P_d$)로 감소시킨 경우 발전비용은 19,960.3671을 얻었다. $P_i \pm \beta$, ($\beta = 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001$)에 대한 교환을 수행하여 정밀도 0.0001까지 맞춘 결과 40-발전기와 동일하게 각 발전기의 밸브지점으로 수렴하였으며, 최적 해는 \$17,960.3671을 얻었다.

13-발전기 ($P_d = 2,520 MW$)의 경우, $k-1$ 번째는 G_{10} (115→77), k 번째는 G_{11} (115→77), $k+1$ 번째는 G_{12} (92→55), $k+2$ 번째는 G_{13} (92→55)으로 $k-1 = k, k+1 = k+2$ 인 경우이다. k 번째까지 발전량을 감소시킨 α^+ -VPO의 $\alpha = 6$ 이다. $k+1$ 과 $k+2$ 번째를 G_{12} (92→55), G_{13} (92→55)로 감소시키고, $k-1$ 과 k 번째를 G_{10} (115←77), G_{11} (115←77)로 설정한 α^+ -VPO는 $\alpha = 4$ 로 감소시킬 수 있다. 이를 $\alpha = 0$ 으로 감소시킨 경우 발전비용은 24,185.133을 얻는다. $P_i \pm \beta$, ($\beta = 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001$)에 대한 교환을 수행하여 정밀도 0.0001까지 맞춘 결과 각 발전기가 밸브지점으로 수렴하였으며, 최적 해는 \$24,164.0510을 얻었다.

VPO는 13-발전기 ($P_d = 1,800 MW$ 와 $P_d = 2,520 MW$)과 40-발전기 ($P_d = 10,500 MW$) 모두에서 기존의 휴리스틱 알고리즘들에 비해 좋은 결과를 얻었음을 알 수 있다.

결론적으로, 밸브효과를 고려한 비볼록 발전비용함수에 대한 경제급전 문제의 최적 해는 밸브지점에 위치함을 알 수 있으며, α 값을 가능한 적도록 각 발전기의 밸브지점들을 어떻게 효율적으로 찾을 수 있는가가 문제 해결의 핵심임을 알 수 있다. 따라서, 제안된 알고리즘이 기반을 두고 있는 “가능한 밸브지점의 출력을 유지해야 가장 경제적인 발전을 수행할 수 있다.” 가정이 증명되었다.

제안된 VPO 알고리즘은 간단하면서도 빠르며 항상 동일한 해를 구할 수 있으면서도 기존의 휴리스틱 알고리즘에 비해 가장 좋은 해를 구할 수 있는 장점을 갖고 있다.

V. 결론

본 논문은 밸브효과를 고려한 비볼록 발전비용함수에 대한 경제급전 알고리즘을 제안하였다. 제안된 VPO 알고리즘은 경제급전 문제의 최적 해는 각 발전기를 밸브지점으로 가동시킬 경우 최소의 발전비용이 소요된다는 가정에 기반하였다. 이 가정에 기반하여, 각 발전기의 밸브지점들을 구하고, 평균 발전단가가 가장 큰 발전기부터 각 밸브지점으로 발전량을 감소시켜 빠르게 수요량과의 균형을 맞추었다. 다음으로, 정확한 밸브지점을 찾기 위해 교환 방법을 적용하였다.

제안된 VPO 알고리즘을 40-발전기에 적용한 결과 빠르게 정확한 하나의 값을 찾는 장점이 있으면서도 기존의 휴리스틱 알고리즘들에 비해 보다 좋은 결과를 나타내었다.

References

- [1] A. A. El-Fergany, "Solution of Economic Load Dispatch Problem with Smooth and Non-Smooth Fuel Cost Functions Including Line Losses Using Genetic Algorithm," International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 3, No. 5, pp. 706-710, doi:10.7763/IJCEE.2011.V3.407, Oct. 2011.
- [2] B. Shaw, S. Ghoshal, V. Mukherjee, and S. P. Ghoshal, "Solution of Economic Load Dispatch Problems by a Novel Seeker Optimization Algorithm," International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. 3, No. 1, pp. 26-42, doi:10.15676/ijeei.2011.3.1.3, Mar. 2011.
- [3] L. 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, doi:10.1109/TPWRS.2006.873410, May 2006.
- [4] S. H. Ling, H. K. Lam, F. H. F. Leung, and Y. S. Lee, "Improved Genetic Algorithm for Economic Load Dispatch with Valve-point Loadings," The

- 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 1, pp 442–447, doi: 10.1109/IECON.2003.1280021, Nov. 2003.
- [5] T. A. A. Victoire and A. E. Jeyakumar, "Hybrid PSO–SQP for Economic Dispatch with Valve–point Effect," *Electric Power Systems Research*, Vol. 71, No. 1, pp. 51–59, doi: 10.1016/j.epsr.2003.12.017, Sep. 2004.
- [6] N. Sinha, R. Chakrabarti, and P. K. Chattopadhyay, "Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch," *IEEE Trans. on Evolutionary Computing*, Vol. 7, No. 1, pp. 83–94, doi: 10.1109/TEVC.2002.806788, Feb. 2003.
- [7] Y. Hou, L. Lu, X. Xiong, and Y. Wu, "Economic Dispatch of Power Systems Based on the Modified Particle Swarm Optimization Algorithm," *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, pp. 1–6, doi:10.1109/TDC.2005.1546751, Aug. 2005.
- [8] 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, doi:10.1109/ISAP.2009.5352843, Nov. 2009.
- [9] J. S. Al–Sumait, J. K. Sykulski, and A. K. Al–Othman, "Solution of Different Types of Economic Load Dispatch Problems Using a Pattern Search Method," *Electric Power Components and Systems*. Vol. 36, No. 3, pp. 250–265, doi:10.1080/15325000701603892, Mar. 2008.
- [10] 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, doi:10.1016/j.enconman.2009.05.034, Oct. 2009.
- [11] K. Zare, M. T. Haque, and E. Davoodi, "Solving Non–convex Economic Dispatch Problem with Valve Point Effects using Modified Group Search Optimizer Method," *Electrical Power Systems Research*, Vol. 84, No. 1, pp. 83–89, doi:10.1016/j.epsr.2011.10.004, Mar. 2012.
- [12] K. S. Pothiya, and S. Boonseng, "Distributed Tabu Search Algorithm for Solving the Economic Dispatch Problem," *TENCON*, Vol. C, pp. 484–487, doi:10.1109/TENCON.2004.1414813, Nov. 2004.
- [13] R. Balamurugan and S. Subramanian, "Self–Adaptive Differential Evolution Based Power Economic Dispatch of Generators with Valve–Point Effects and Multiple Fuel Options," *International Journal of Computer Science and Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 10–17, Mar. 2007.
- [14] N. Sinha and B. Purkayastha, "PSO Embedded Evolutionary Programming Technique for Nonconvex Economic Load Dispatch," *IEEE PES–Power Systems Conference and Exposition*, Vol. 1, pp. 66–71, doi: 10.1109/PSCE.2004.1397447, Oct. 2004.
- [15] P. Attaviriyanupap, H. Kita, E. Tanaka, and J. Hasegawa, "A Hybrid EP and SQP for Dynamic Economic Dispatch with Non–smooth Fuel Cost Function," *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 22, No. 4, pp. 411–416, doi: 10.1109/MPER.2002.4312139, Apr. 2002.
- [16] J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Non–smooth Cost Function," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 20, No. 1, pp. 34–42, doi: 10.1109/TPWRS. 2004.831275, Feb. 2005.
- [17] A. I. Selvakumar, and K. Thanushkodi, "A New Particle Swarm Optimization Solution to Non–convex Economic Dispatch Problems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 42–51, doi: 10.1109/TPWRS.2006.889132, Feb. 2007.
- [18] J. B. Park, W. N. Lee, and J. R. Sin, "An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch Problems with Non–Smooth Cost Functions," *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–7,

- doi:10.1109/PES.2006.1709300, 2006.
- [19] K. T. Chaturvedi, M. Pandit, L. Srivastava, "Self-organizing hierarchical particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1079-1087, doi:10.1109/TPWRS.2008.926455, Aug. 2008.
- [20] A. Khamseh and Y. Y. Alinejad-Beromi, "Hybrid CLONAL Selection Algorithm with SA for Solving Economic Load Dispatch with Valve-Point Effect," Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, Vol. 2, No. 10, pp. 463-467, 2011.
- [21] K. Meng, Z. Y. Dong, H. G. Wang, K. P. Wong, "Quantum-inspired Particle Swarm Optimization for Valve-point Economic Load Dispatch," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 215-222, doi:10.1109/TPWRS.2009.2030359, Jan. 2010.
- [22] P. H. Chen and H. C. Chang, "Large-Scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 1919-1926, doi:10.1109/59.476058, Nov. 1995.
- [23] A. Bhattacharya, P. K. Chattopadhyay, "Biogeography-based Optimization for Different Economic Load Dispatch Problems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 2, pp. 1064-1077, doi:10.1109/TPWRS.2009.2034525, May 2010.
- [24] J. B. Park, Y. W. Jeong, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "An Improved Particle Swarm Optimization for Nonconvex Economic Dispatch Problems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 156-166, doi:10.1109/TPWRS.2009.2030293, Jan. 2010.
- [25] A. Bhattacharya, P. K. Chattopadhyay, "Hybrid Differential Evolution with Biogeography-based Optimization for Solution of Economic Load Dispatch," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 4, pp. 1955-1964, doi:10.1109/TPWRS.2010.2043270, Mar. 2010.
- [26] J. G. Vlachogiannis and K. Y. Lee, "Economic Load Dispatch - A Comparative Study on Heuristic Optimization Techniques with an Improved Coordinated Aggregation-based PSO," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 991-1001, doi:10.1109/TPWRS.2009.2016524, Apr. 2009.

저자 소개

이 상 운(정회원)



- 1987년 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (학사)
- 1997년 : 경상대학교 컴퓨터과학과 (석사)
- 2001년 : 경상대학교 컴퓨터과학과 (박사)
- 2003년 : 강원도립대학 컴퓨터응용과 전임강사

- 2004년 ~ 2007.2 : 국립 원주대학 여성교양과 조교수
 - 2007.3 ~ 2015.3 : 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 부교수
 - 2015.4 ~ 현재 : 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 정교수
- <관심분야 : 소프트웨어 프로젝트 관리, 개발 방법론, 분석과 설계 방법론, 시험 및 품질보증, 소프트웨어 신뢰성, 그래프 알고리즘>
- e-mail : sulee@gwnu.ac.kr