The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 17, No. 4, pp.219-224, Aug. 31, 2017. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.4.219
JIIBC 2017-4-28

# 발전정지와 교환방법을 적용한 실시간급전문제 최적화 알고리즘

# Optimization Algorithm for Real-time Load Dispatch Problem Using Shut-off and Swap Method

이상운*

**Sang-Un, Lee***

**요 약** 경제급전 최적화 문제를 해결하는 결정론적인 알고리즘에 존재하지 않아 지금까지는 비결정론적인 휴리스틱 알고리즘들이 제안되고 있다. 이와 더불어 실시간 급전문제에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 논문은 발전정지 개념을 도입하여 실시간 급전의 최적화 문제를 풀 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 단위 발전량당 최대 비용이 소요되는 발전기는 발전을 중지시키는 기준을 적용하였다. 본 논문에서 제안한 발전정지 기준은 발전비용함수에서 밸브효과에 따른 비선형 절대치 함수를 제외한 2차 함수만을 대상으로 하였다. 경제급전 문제의 시험사례로 빈번히 활용되고 있는 데이터에 대해 제안된 알고리즘을 적용한 결과 기존 알고리즘들의 해를 크게 감소시킬 수 있었다.

**Abstract** In facing the lack of a deterministic algorithm for economic load dispatch optimization problem, only non-deterministic heuristic algorithms have been suggested. Worse still, there is a near deficiency of research devoted to real-time load dispatch optimization algorithm. In this paper, therefore, I devise a shut-off and swap algorithm to solve real-time load dispatch optimization problem. With this algorithm in place, generators with maximum cost-per-unit generation power are to be shut off. The proposed shut-off criteria use only quadratic function in power generation cost function without valve effect nonlinear absolute function. When applied to the most prevalent economic load dispatch benchmark data, the proposed algorithm is proven to largely reduce the power cost of known algorithms.

**Key Words :** Economic Load Dispatch, Real-time Load Dispatch, Optimization, Shut-off, Deterministic algorithm

## Ⅰ. 서 론

전력분야에서 발전량이 부하량(수요 예측량 + 여유량)보다 적을 경우 주파수 난조와 정전(블랙아웃) 발생으로 전력계통에 큰 문제를 발생시키고, 산업 전반에 걸쳐 경제적 손실도 막대해진다. 반면에 발전량이 부하량보다 충분하면 여분의 발전량은 저장이 불가능하여 엄청난 비용 낭비를 초래한다. 따라서 해당시간대 별로 필요한 부하량 만을 발전(발전량과 총 부하량 일치)해야 하며, 이 경우 가능한 연료효율이 좋은(최소의 비용으로 최대의 발전량 공급) 경제성의 원칙을 적용하도록 해당 발전기의 발전량을 동적으로 조절해야만 한다.

여름과 겨울의 특정 기간에 한정된 최대 발전량에 근접한 부하량을 필요로 하는 경우를 제외한 년 중 대부분

*정회원, 강릉원주대학교 과학기술대학 멀티미디어공학과
접수일자: 2017년 5월 5일, 수정완료: 2017년 7월 5일
게재확정일자: 2017년 8월 11일

Received: 5 May, 2017 / Revised: 5 July, 2017 /
Accepted: 11 August, 2017
*Corresponding Author: sulee@gwnu.ac.kr
Dept. of Multimedia Eng., Gangneung-Wonju National University, Korea

의 기간 동안에는 발전량이 부하량을 초과하여 발전량의 여유가 발생한다. 이 경우 모든 발전기를 기동시킬 필요가 없으며, 이 때 경제성의 원칙에 따라 최소의 비용으로 부하량을 충족시키는 경제급전(economic dispatch, ED) 문제가 발생한다.[1-5]

각기 다른 발전비용 함수 $F(P_i)$를 가진 $n$대의 발전기 $G_i, (i=1,2,\cdots,n)$가 존재한다. 이 경우, 주어진 시간대의 부하 $P_d$를 충족시키기 위한 전체 발전량 $\sum_{i=1}^{n} P_i$를 발전하기 위해 각 발전기의 출력 $P_i$를 어떻게 효율적으로 배분해야 가장 적은 비용이 소요되는가를 결정(경제적 발전)하는 문제를 경제급전이라 한다. 경제급전 문제는 $n$대의 대상 발전기 모두를 기동한다는 가정에 기반하고 있다. 그러나 실제적으로는 수요량에 따라 발전량을 조정하며, 기동 및 정지와 경제적 배분을 수행하는 실시간 급전(real-time load dispatch)을 적용하고 있다. 이는 발전단가가 비싼 발전기는 되도록 가동을 정지(shut-off)시키는 개념을 적용한다는 가정에 기반을 두고 있다. 따라서 경제급전과 실시간 급전의 가장 큰 차이점은 가동 정지 유무이다.

경제급전 최적화와 관련하여 초기에는 대부분 수학적 최적화 기법으로는 라그랑즈 완화법(Lagrangian relaxation)이나 경사법(gradient method)을 적용하였으나 더 이상의 최적화 성능을 갖지를 못해 인공지능 기법을 연구하고 있다. 인공지능 기법으로는 유전자 알고리즘(genetic algorithm, GA), 신경망(neural network, NN), 퍼지(Fuzzy), 군집 알고리즘(particle swarm optimization, PSO)등 비결정적이며, 휴리스틱 알고리즘을 적용하고 있다. 반면에, 실시간 급전에 대한 연구는 일부 수행되고 있다.[6-8]

타 분야의 최적화는 고정된 상수값을 갖는 수량을 최적화하는 보다 단순한 문제이나 경제급전 문제는 기본적으로 발전비용 $F(P_i)$이 발전량 $(P_i)$에 대해 $F(P_i)=a_iP_i^2+b_iP_i+c_i$의 2차함수로 변화되며, 출력을 높이기 위해 밸브를 열 때 발생하는 진동으로 인한 밸브효과(valve-effect)로 인해 발생하는 추가비용인 사인함수의 절대치 $|e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min}-P_i))|$ 이 추가된다. 따라서 발전비용은 $F(P_i)=a_iP_i^2+b_iP_i+c_i+|e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min}-P_i))|$ 로 2차 함수 이상의 복잡한 비선형 형태를 갖고 있다. 이러한 복잡한 비선형 발전비용 함수에 대해 수학적 방법은 $F'(P_i)=a_i'P_i^2+b_i'P_i+c_i'$로 근사시킨 평활함수(smooth function)에 대한 기울기 $2a_i'P_i+b_i'$를 이용해 해를 구한다.[4-8]

인공지능 기법은 초기치를 랜덤하게 설정하고 수많은 시행 결과 최소치를 해로 결정하기 때문에 동일한 해를 검증하기가 사실상 불가능하다. 또한, 다양한 휴리스틱 알고리즘 적용에도 불구하고 획기적으로 해를 개선한 알고리즘이 알려져 있지 않다.[6,7

본 논문에서는 경제급전에 적용된 휴리스틱 알고리즘들에 비해 해를 개선할 수 있으면서도 결정론적 방법으로 쉽고 빠르게 실시간 급전의 해를 구하는 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 경제급전과 관련된 연구의 문제점과 실제 적용사례를 고찰해 본다. 3장에서는 발전정지 개념을 적용한 실시간 급전의 결정론적 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 사례들에 적용하여 경제급전의 휴리스틱 방법들과 성능을 비교 검증한다.

## II. 관련연구 문제점과 실제 적용사례

각기 다른 발전비용 함수 $F(P_i)$를 가진 $n$개의 발전기 $G_i, (i=1,2,\cdots,n)$가 있는 경우, 주어진 시간대의 총 발전량 $\Sigma P_i$는 수급 균형을 맞추기 위해 총 부하량 $P_d$와 동일($\sum_{i=1}^{n} P_i = P_d$)해야 한다.[4-8]

발전기 $n$개는 사용되는 발전연료 차별성으로 인해 발전단가가 상이하며, 비록 동일 종류의 발전기라 하더라도 성능이나 연식 차이로 인해 발전효율성이 차이가 발생할 수 있다. 따라서 각 발전기의 발전비용에는 차이가 발생한다고 가정한다. 또한, $P_d \le \Sigma P_i^{\max}$ 조건을 만족시킨다고 가정한다.

경제급전 문제의 목적함수는 경제급전 총 발전비용을 최소화시키는 것으로 $\min imize\ F(P)=\sum_{i=1}^{n} F(P_i)$로 표현된다.[1-8] 여기서 $F(P_i)$는 발전기 $i$의 발전비용($/MWh)으로 $F(P_i)=a_iP_i^2+b_iP_i+c_i+|e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min}-P_i))|$ 로 표현된다.[1-8] 여기서 $P_i$는 발전기 $i$의 발전량 (KW)이며, 각 발전기의 출력 범위 제한조건은 $P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max}$ 이다. 일단 발전기가 기동된 이후 안전하게 연속적으로 운전이 가능한 최저수준의 출력에 도달해야 발전기를 전력계통에 연결시켜 전력을 공급하게 되며, 이 시점이 $P_i^{\min}$ 이다.[1-8]

기존 연구들은 $P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max}$ 로 한정시킨 인공지

능법을 적용하고 있다. 이는 비록 고비용 발전기가 존재하더라도 모든 발전기는 기동시킨다는 가정 하에 최적화를 수행한다는 특징을 갖고 있다.[1-5]

반면에, 한국전력공사 전력거래소에서는 수요에 따른 발전기 기동중지(기동정지)와 발전량을 배분하고 있다. 즉, 현실적으로 수행되는 실시간 급전에서는 고비용 발전기에 대해서는 $P_i=0$도 적용하기 때문에, 경제급전에 적용되는 이론적 최적화 제약조건 $P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max}$ 은 현실과 괴리를 나타내고 있다.

Lee[4]은 이차 발전비용함수에 대한 경제급전 문제의 해를 다항시간으로 구하는 알고리즘을 제안하였으며, Lee[5]는 운전금지구역을 가진 이차 발전비용함수에 대한 경제급전 문제의 해를 구하는 알고리즘을 제안하였다. 그러나 발전 정지 개념을 적용한 실시간 경제급전 문제에 대해서는 연구가 수행되지 않고 있다.

본 논문의 제안될 알고리즘의 검증에 적용된 데이터는 경제급전 문제에서 가장 많이 활용되고 있는 실험 데이터로 Coelho와 Lee[3]가 제시한 13-발전기와 40-발전기의 사례이다. Coelho와 Mariani[2]는 13-발전기 데이터의 최소 발전총량 $\Sigma P_i^{\min}=550MW$,최대 발전 총량 $\Sigma P_i^{\max}=2,960MW$,요구량은 $P_d=1,800MW$와 $2,520MW$의 2가지 경우이다. 40-발전기는 $\Sigma P_i^{\min}=4,817MW$, $\Sigma P_i^{\max}=12,722MW$, $P_d=10,500MW$이다.[8] 본 논문의 실험에 적용된 데이터에 대해 현재까지 연구한 결과는 표 1과 같다.

**표 1. 시험사례의 알고리즘 최적화 결과**
**Table 1. Results of Algorithm Optimization for the Test Cases**

| Case with 13 Generators and Load Demand of 1,800 MW | |
|---|---|
| Method | Min Cost |
| Improved Genetic Algorithm (IGA)[9] | 18,063.580 |
| Particle Swarm Optimization (PSO)[10] | 18,030.720 |
| Evolutionary Programming (EP)[11] | 17,994.070 |
| Hybrid Evolutionary Programming with SQP (HEP-SQP)[10] | 17,991.030 |
| Modified Particle Swarm Optimization (MPSO)[12] | 17,973.340 |
| Artificial Immune System (IS)[1] | 17,972.90 |
| Hybrid Particle Swarm with SQP (HPS-SQP)[10] | 17,969.930 |
| Pattern Search (PS)[13] | 17,969.170 |
| Cultural IS (CIS)[1] | 17,964.68 |
| Fuzzy CIS (FCIS)[1] | 17,964.37 |
| Harmony Search (HS)[16] | 17,960.3661 |
| Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming (DEC-SQP)[2] | **17,938.9521** |

| Case with 13 Generators and Load Demand of 2,520 MW | |
|---|---|
| Method | Min Cost |
| Cultural Immune System (CIS)[1] | 24,171.13 |
| Fuzzy CIS (FCIS)[1] | 24,171.09 |
| Artificial Immune System (IS)[1] | 24,170.57 |
| Distributed Tabu Search Algorithm (DTSA)[12] | 24,169.950 |
| Self-Adaptive Differential Evolution (SDE )[13] | **24,164.050** |

| Case with 40 Generators and Load Demand of 10,500 MW | |
|---|---|
| Method | Min Cost |
| Genetic Algorithm (GA)[16] | 123,966.653 |
| Embedded Evolutionary Programming-PSO (CEP-PSO)[14] | 123,670.000 |
| Particle Swarm Optimization (PSO)[10] | 122,930.450 |
| Evolutionary Programming (EP)[11] | 122,624.350 |
| Hybrid Evolutionary Programming with SQP (HEP-SQP)[10] | 122,379.630 |
| Modified Particle Swarm Optimization (MPSO)[15] | 122,252.265 |
| Hybrid Particle Swarm with SQP (HPS-SQP)[10] | 122,094.670 |
| Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming (DEC-SQP)[2] | 121,741.970 |
| New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex (NPSO-LRS)[17] | 121,664.430 |
| Improved PSO (IPSO)[15] | 121,495.702 |
| Artificial Immune System (IS)[1] | 121,489.110 |
| Valve-point Balance and Swap Optimization(VPBSO)[6] | 121,464.95 |
| Fuzzy CIS (FCIS)[1] | 121,446.71 |
| Cultural Immune System (CIS)[1] | **121,423.68** |

# Ⅲ. 발전정지-교환 실시간 급전 알고리즘

본 장에서는 $P_d$를 만족하는 최소비용의 최적 해를 구하는 발전정지-교환(shut off & swap) 알고리즘을 제안한다.

제안 알고리즘은 특정 발전기를 정지시키는 개념을 적용한다. 단, 정지를 시키는 기준은 식 (3)의 발전비용함수에서 밸브효과 부분인 $|e_i \times \sin(f_i \times (P_i^{\min} - P_i))|$ 부분을 제외한 2차 함수 $F(P_i)=a_iP_i^2+b_iP_i+c_i$만을 적용하여 단위 발전량당 단가 (기울기)가 높은 발전기를 정지시킨다. 따라서 발전정지 결정 기준은 식 (1)을 적용한다.

$$\frac{[(a_iP_i^{\max 2}+b_iP_i^{\max}+c_i)-(a_iP_i^{\min 2}+b_iP_i^{\min}+c_i)]}{(P_i^{\max}-P_i^{\min})} \qquad (1)$$

식 (1)을 적용하여 알고리즘은 그림 1과 같이 수행된다. 제안된 알고리즘은 결정론적 알고리즘으로 항상 동일한 결과를 얻으며, 발전비용의 복잡성과 발전기 대수 $n$과 무관하게 간단히 수행될 수 있는 장점이 있다.[7]

**Main( )**
Step 1. 식 (1)의 최대치 내림차순으로 $\Sigma P_i - P_i \ge P_d$ 인 발전기 $G_i$ 순서 $n$개 결정.
Step 2. Step 1에서 얻은 발전기들에 대해 $n, n-1, n-2, \cdots, 2, 1$에 대해 발전량을 $P_i=0$로 설정, 남은 $\Sigma P_i - P_d > 0$에 대해 Optimize() 수행.
만약, 현재 $P_i=0$로 설정된 발전기들에 대한 Optimize() 결과가 이전 $P_i=0$로 설정된 발전기들의 Optimize() 결과보다 크면 알고리즘을 종료하고 이전 발전비용을 최적해로 결정. 만약, 현재 발전비용이 이전 발전비용보다 작으면 Optimize() 계속 수행.
**Optimize( )**
Step 1. Main( )의 Step 2 대상 발전기를 제외한 모든 발전기에 대해 $P_i \leftarrow P_i^{\max}$, $P_i - 1 \leftarrow P_i^{\max} - 1$ 로 설정.

Step 2. $\Sigma P_i \geq P_d$가 될 때까지 ${}_{\max}\triangle^{-}$ 발전기의 발전량을 1 감소. $(P_i \leftarrow P_i - 1)$[6-8]

$\triangle^{-} = F(P_i) - F(P_i - 1)$

Step 3. $\Sigma P_i = P_d$이면 다음의 동일 발전량 교환 최적화 수행.[6-8]

$\triangle_{1.0}^{-} = F(P_i) - F(P_i - 1.0)$ ,

$\triangle_{1.0}^{+} = F(P_i + 1.0) - F(P_i)$

만약, ${}_{\max}\triangle_{1.0}^{-}(G_i) > {}_{\min}\triangle_{1.0}^{+}(G_j)$, $G_i \neq G_j$이면 $P_i \leftarrow P_i - 1, P_j \leftarrow P_j + 1$ 로 발전량 교환.

이 과정을 $\triangle_{0.1}(P_i \pm 0.1), \triangle_{0.01}(P_i \pm 0.01)$, $\triangle_{0.001}(P_i \pm 0.001)$ 수행 Kw 단위까지 조절.

**그림 1. 실시간급전 최적화 알고리즘**
**Fig. 1. Optimize algorithm for Real-time Load Dispatch**

## Ⅳ. 적용 결과 및 분석

13-발전기와 40-발전기에 대해 제안된 알고리즘을 수행한 결과는 표 2에 제시되어 있다.

13-발전기($P_d = 1{,}800MW$)의 경우 $\Sigma P_i^{\max} - P_d > 0$로 발전정지($P_i = 0$) 대상은 #12,#13,#10,#11,#4,#5,#6이다. 첫 번째로 #12,#13,#10,#11,#4,#5,#6에 대해 발전정지를 시키고 제안된 알고리즘을 수행한 결과 $P_d = 1{,}800MW$를 발전하는데 소요되는 총 발전비용은 $17,045.215이었으며, #6을 제외한 #12,#13,#10,#11,#4,#5에 대해 발전정지를 시키고 제안된 알고리즘을 수행한 결과 $P_d = 1{,}800MW$를 발전하는데 소요되는 총 발전비용은 $17,241.349로 보다 많은 비용이 소요되어 알고리즘이 종료되었다. 결국, 이 경우의 최적 해는 #12,#13,#10, #11,#4,#5,#6 발전기를 정지시키고 다른 발전기들의 발전량을 조절한 경우의 $17,045.215로 결정되었다.

13-발전기($P_d = 2{,}520MW$)의 경우 #12,#13,#10 발전기 정지시 $24,526.442의 비용이 소요되었으며, #12, #13 발전기 정지시는 $24,114.256으로 비용이 감소되었다. 따라서 #12 발전기만을 정지시킨 경우의 비용을 계산한 결과 $24,272.335로 비용이 증가하여 최적 해는 #12와 #13 발전기가 정지된 상태의 $ 24,114.256로 결정되었다.

40-발전기($P_d = 10{,}500MW$)의 경우 #27,#28,#29,#10, #12,#11,#13 발전기 정지시 $117,055.658 비용이 소요되었으며, #27,#28,#29,#10,#12,#11 발전기 정지시는 $117, 159.831로 비용이 증가하여 알고리즘이 종료되었다. 즉,

**표 2. 시험사례의 발전정지-교환 최적화 알고리즘 수행 결과**
**Table 2. Results of the Shutoff-Swap Optimization Algorithm for Test Cases**

Case Study 13 Units and $P_d = 1{,}800\,MW$

| 발전량 / 발전정지 | $G_1$ (680) | $G_2$ (360) | $G_3$ (360) | $G_4$ (180) | $G_5$ (180) | $G_6$ (180) | $G_7$ (180) | $G_8$ (180) | $G_9$ (180) | $G_{10}$ (120) | $G_{11}$ (120) | $G_{12}$ (120) | $G_{13}$ (120) | $\Sigma P_i$ | $\Sigma F(P_i)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| #12,#13,#10,#11,#4,#5,#6 | 628.319 | 360.000 | 332.482 | 0.0 | 0.0 | **0.0** | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1,800 | **17,045.215** |
| #12,#13,#10,#11,#4,#5 | 628.319 | 360.000 | 172.749 | 0.0 | 0.0 | **159.733** | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1,800 | **17,241.349** |

Case Study 13 Units and $P_d = 2{,}520\,MW$

| 발전량 / 발전정지 | $G_1$ (680) | $G_2$ (360) | $G_3$ (360) | $G_4$ (180) | $G_5$ (180) | $G_6$ (180) | $G_7$ (180) | $G_8$ (180) | $G_9$ (180) | $G_{10}$ (120) | $G_{11}$ (120) | $G_{12}$ (120) | $G_{13}$ (120) | $\Sigma P_i$ | $\Sigma F(P_i)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| #12, #13, #10 | 680.000 | 360.000 | 360.000 | 159.800 | 159.800 | 159.800 | 160.600 | 180.000 | 180.000 | **0.0** | 120.000 | 0.0 | **0.0** | 2,520 | **24,526.442** |
| #12, #13 | 628.318 | 360.000 | 343.684 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | **114.800** | 114.800 | 0.0 | **0.0** | 2,520 | **24,114.256** |
| #12 | 628.319 | 360.000 | 251.303 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | 159.733 | **114.800** | 114.800 | 0.0 | **92.400** | 2,520 | **24,272.335** |

Case Study 40 Units and $P_d = 10{,}500\,MW$

| #27,#28,#29,#10,#12,#11,#13 | | | | | | #27,#28,#29,#10,#12,#11 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $G_i$ | $P_i$ | $F(P_i)$ | $G_i$ | $P_i$ | $F(P_i)$ | $G_i$ | $P_i$ | $F(P_i)$ | $G_i$ | $P_i$ | $F(P_i)$ |
| #1(114) | 114.000 | 978.156 | #21(550) | 523.280 | 5,071.302 | #1(114) | 110.800 | 925.099 | #21(550) | 523.280 | 5,071.302 |
| #2(114) | 114.000 | 978.156 | #22(550) | 523.280 | 5,071.302 | #2(114) | 110.800 | 925.099 | #22(550) | 523.280 | 5,071.302 |
| #3(120) | 120.000 | 1,544.653 | #23(550) | 523.280 | 5,057.236 | #3(120) | 97.400 | 1,190.550 | #23(550) | 523.280 | 5,057.236 |
| #4(190) | 179.733 | 2,143.550 | #24(550) | 550.000 | 5,558.049 | #4(190) | 179.733 | 2,143.550 | #24(550) | 523.280 | 5,057.236 |
| #5( 97) | 97.000 | 853.178 | #25(550) | 523.280 | 5,275.101 | #5( 97) | 87.800 | 706.502 | #25(550) | 523.280 | 5,275.101 |
| #6(140) | 140.000 | 1,596.464 | #26(550) | 523.280 | 5,275.101 | #6(140) | 140.000 | 1,596.464 | #26(550) | 523.280 | 5,275.101 |
| #7(300) | 300.000 | 3,216.424 | #27(150) | 0.000 | 0.000 | #7(300) | 259.600 | 2,612.891 | #27(150) | 0.000 | 0.000 |
| #8(300) | 300.000 | 3,052.310 | #28(150) | 0.000 | 0.000 | #8(300) | 284.600 | 2,779.843 | #28(150) | 0.000 | 0.000 |
| #9(300) | 291.190 | 2,918.125 | #29(150) | 0.000 | 0.000 | #9(300) | 284.600 | 2,798.237 | #29(150) | 0.000 | 0.000 |
| #10(300) | 0.000 | 0.000 | #30( 97) | 97.000 | 853.178 | #10(300) | 0.000 | 0.000 | #30( 97) | 87.800 | 706.502 |
| #11(375) | 0.000 | 0.000 | #31(190) | 190.000 | 1,643.991 | #11(375) | 0.000 | 0.000 | #31(190) | 190.000 | 1,643.991 |
| #12(375) | 0.000 | 0.000 | #32(190) | 190.000 | 1,643.991 | #12(375) | 0.000 | 0.000 | #32(190) | 190.000 | 1,643.991 |
| #13(500) | **0.000** | 0.000 | #33(190) | 190.000 | 1,643.991 | #13(500) | **394.279** | 6,496.361 | #33(190) | 190.000 | 1,643.991 |
| #14(500) | 484.039 | 7,801.195 | #34(200) | 200.000 | 2,101.017 | #14(500) | 484.038 | 7,801.190 | #34(200) | 164.800 | 1,585.547 |
| #15(500) | 484.039 | 7,816.058 | #35(200) | 200.000 | 2,043.727 | #15(500) | 484.038 | 7,816.053 | #35(200) | 164.800 | 1,539.873 |
| #16(500) | 484.039 | 7,816.058 | #36(200) | 200.000 | 2,043.727 | #16(500) | 484.038 | 7,816.053 | #36(200) | 164.800 | 1,539.873 |
| #17(500) | 489.280 | 5,296.724 | #37(110) | 110.000 | 1,220.166 | #17(500) | 489.280 | 5,296.724 | #37(110) | 110.000 | 1,220.166 |
| #18(500) | 489.280 | 5,288.779 | #38(110) | 110.000 | 1,220.166 | #18(500) | 489.280 | 5,288.779 | #38(110) | 94.879 | 1,053.101 |
| #19(550) | 550.000 | 6,271.211 | #39(110) | 110.000 | 1,220.166 | #19(550) | 511.280 | 5,540.943 | #39(110) | 89.115 | 959.311 |
| #20(550) | 550.000 | 6,271.191 | #40(550) | 550.000 | 6,271.211 | #20(550) | 511.280 | 5,540.923 | #40(550) | 511.280 | 5,540.943 |
| 계 | | | | 10,500 | **117,055.658** | 계 | | | | 10,500 | 117,159.831 |

#27,#28,#29,#10,#12,#11,#13 발전기 정지시 $117, 055.658 이 최적 해로 결정되었다.

시험사례들에 대해 휴리스틱 방법으로 최적화 과정을 수행한 최적의 연구 결과와 본 논문에서 제안된 알고리즘의 결과를 비교하여 표 3에 제시하였다. 제안된 발전정지-교환 알고리즘을 표 3에 제시된 기존의 최적해와 비교한 결과 13-발전기 ($P_d = 1{,}800MW$)의 경우 $17,963.94를 $17,045.215로 $918.725(5.114%)를 개선시켰다. 13-발전기 ($P_d = 2{,}520MW$)에 대해서는 $24,164.05를 $24,114.256으로 $49. 794(0.2061%)를, 40-발전기($P_d = 10{,}500MW$)의 경우 $ 119.732.250을 $117, 055.658로 $2,676.592 (2.235%)를 감소시켰다.

**표 3. 알고리즘 최적화 결과 비교**
**Table 3. Compare with Algorithm Optimization results**

| Case with 13 Generators and Load Demand of 1,800 MW | |
|---|---|
| Method | Min Cost |
| Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming (DEC-SQP)[2] | 17,938.9521 |
| Shut off and Swap Algorithm (SSA) - Proposed | 17,045.215 |

| Case with 13 Generators and Load Demand of 2,520 MW | |
|---|---|
| Method | Min Cost |
| Self-Adaptive Differential Evolution (SDE )[13] | 24,164.050 |
| Shut off and Swap Algorithm (SSA) - Proposed | 24,114.256 |

| Case with 40 Generators and Load Demand of 10,500 MW | |
|---|---|
| Method | Min Cost |
| Cultural Immune System (CIS)[1] | 121,423.68 |
| Shut off and Swap Algorithm (SSA) - Proposed | 117,055.658 |

## V. 결론

본 논문은 전력발전분야에서 가장 경제적인 비용으로 전력을 생산할 수 있는 실시간 급전의 최적 해를 구하는 발전정지-교환 알고리즘을 제안하였다. 기존 알고리즘들은 휴리스틱 방법들을 적용하여 다수의 시행 결과 얻은 해 들 중에서 최소치를 선택하는 방법을 적용하였음에도 불구하고 최적 해를 구하지 못하였다.[6]

반면에, 본 논문에서는 발전정지 기준을 적용한 방법으로 항상 최소의 비용으로 동일한 결과를 얻을 수 있는 간단하면서도 결정론적인 방법을 제안하였다.

제안된 방법은 3개의 시험사례들에 적용한 결과 기존의 휴리스틱 방법들에 비해 해를 크게 개선하였다.

## 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] L. 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, No. 5, pp. 297-307, June, 2008. doi: 10.1016/ j.ijepes.2007.08.001

[4] S. U. Lee, "Balance-Swap Optimization of Economic Load Dispatch Problem using Quadratic Fuel Cost Function," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 14, No. 4, pp.243-250, Aug. 2014. do:10.7236/JIIBC.2014. 14.4.243

[5] S. U. Lee, "Optimization of Economic Load Dispatch Problem for Quadratic Fuel Cost Function with Prohibited Operating Zones," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 15, No. 5, pp.155-162, Oct. 2015. doi:/10.7236/ JIIBC.2015.15.5.155

[6] S. U. Lee, "Dynamic Economic Load Dispatch Problem Applying Valve-Point Balance and Swap Optimization Method," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 16, No. 1, pp. 253-262, Feb. 2016. doi:10.7236/JIIBC. 2016.16.1.253

[7] S. U. Lee, "A Swap Optimization for Dynamic Economic Dispatch Problem with Non-smooth

Function," Journal of the Korea Society of Computer Information(KSCI), Vol. 17, No. 11, pp. 189-196, Nov. 2012. doi:10.9708/ jksci/2012.17.11.189
[8] S. U. Lee, "Economic Profit Analysis for Centralized Operation of Economic Load Dispatch Problem," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 16, No. 2, pp. 181-188, Apr. 2016. doi:10.7236/ JIIBC.2016.16.2.181
[9] 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, 2003. doi:10.1109/IECON.2003.1280021
[10] 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, Sep. 2004. doi:10.1016/j.epsr.2003.12.017
[11] 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, Feb. 2003. doi:10.1109/TEVC. 2002.806788
[12] 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, 2005. doi:10.1109/TDC.2005.1546751
[13] 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, Mar. 2008. doi: 10.1080/ 15325000701603892
[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, Oct. 2004. doi:10.1109/ PSCE.2004.1397447
[15] 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, 2006. doi:10.1109/PES.2006.1709300
[16] 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, Oct. 2011. doi: 10.7763/ IJCEE.2011.V3.407
[17] A. I. Selvakumar, and K. Thanushkodi, "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 42-51, Feb. 2007. doi:10.1109/TPWRS.2006. 889132

## 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 ~ 2015년 3월 : 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 부교수
• 2015년 4월 ~ 현재 : 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 정교수
<주관심분야 :소프트웨어 프로젝트 관리, 개발 방법론, 분석과 설계 방법론, 시험 및 품질보증, 소프트웨어 신뢰성, 그래프 알고리즘
• e-mail : sulee@gwnu.ac.kr