

# DS 알고리즘을 이용한 마이크로 그리드 최적운영기법

(Optimal Operation Method of Microgrid System Using DS Algorithm)

박시나\* · 이상봉\*\*

(Si-Na Park · Sang-Bong Rhee)

## Abstract

This paper presents an application of Differential Search (DS) meta-heuristic optimization algorithm for optimal operation of micro grid system. DS algorithm has the benefit of high convergence rate and precision compared to other optimization methods. The micro grid system consists of a wind turbine, a diesel generator, and a fuel cell. The simulation is applied to micro grid system only. The wind turbine generator is modeled by considering the characteristics of variable output. One day load data which is divided every 20 minute and wind resource for wind turbine generator are used for the study. The method using the proposed DS algorithm is easy to implement, and the results of the convergence performance are better than other optimization algorithms.

Key Words : Diesel Generator, Fuel Cell, DS Algorithm, Micro Grid System, Optimization, Optimal Operation, Wind Turbine Generator

## 1. 서 론

최근 전력변환기술의 발전과 전력산업 환경의 변화에 따라 마이크로 그리드 기반의 계통은 현재 새로운 전력계통으로 인식되고 있다. 국내의 환경 보호에 대한 관심이 더욱 높아지면서 대규모 그리드와 분리된 디젤발전기로 운전되는 마이크로 그리드에 다양한 신재생 전원을 이용한 방식에 대한 관심이 높아지고 있

다[1]. 그러나 여러 전원의 다양성은 최적 운영 문제 해법을 위한 수식의 정식화를 복잡하게 하고 환경적 요인에 의해 발전량이 결정되는 일부 신재생 전원은 정확한 전력 출력 모델링에 어려움이 있다. 무엇보다 마이크로 그리드 시스템의 근본적 적용 목적을 만족하기 위해서는 그리드 내 전원의 실시간 운영이 필요하며, 정확하고 빠른 최적화 알고리즘의 적용이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 자연현상을 이용한 다양한 경험적 알고리즘이 적용되었다. 짧은 시간 내에 정확한 솔루션을 제공하며 다른 통계적 방법보다 안정적으로 수렴하는 특성을 지닌 개체군집최적화(Particle Swarm Optimization : PSO)와 전역적 탐색기법의 일종인 하모니서치 알고리즘(Harmony Search Algorithm : HSA)등이 적용되었다. 그러나 이

\* Main author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Ph.D Candidate  
\*\* Corresponding author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Professor  
Tel : 053-810-3097, Fax : 053-810-4767  
E-mail : rrsd@yu.ac.kr  
Received : 2014. 8. 8  
Accepted : 2015. 3. 18

런 최적화 알고리즘은 전역적 최적해를 탐색할 가능성은 높으나 수렴시간의 제약, 정확성, 알고리즘의 복잡성을 처리하는 면에 있어서 여러 가지 문제점을 갖고 있다[2-6]. DS 알고리즘(Differential Search Algorithm)은 최적해 탐색에 있어서 기존의 다른 알고리즘과는 달리 한 개 이상의 개체를 동시에 사용할 수 있고, 유사 최적해 중에서 전역 최적해를 선별하는 직진성 특성으로 멀티 모달 함수들의 해법을 위한 성공적인 탐색 전략을 지니고 있다.

본 논문에서는 마이크로 그리드 최적운용기법을 위해 코딩의 단순성과 빠른 수렴속도, 정확성 면에서 우수성과 효율성을 갖고 있는 DS 알고리즘을 적용하였다[7].

## 2. Differential Search Algorithm

DS는 최적화 문제의 해를 위해 개발된 알고리즘으로 이주하는 생물의 유사 브라운 운동 형태의 임의보행(random-walk)을 모의하여 개발된 알고리즘이다. 자연 속에서 많은 종류의 생물들은 최적의 생활환경을 위해 주기적 이주 사이클을 보이고, 그 과정에서 이주하는 생물종들은 수많은 개체를 포함하는 초개체(super-organism)를 이룬다. 이주를 위해 관리된 지역의 요소들 중 하나가 어떤 이유로 서식지의 한계들을 넘는다면, 이 요소는 그 서식지 내 다른 위치로 무작위 연기되고 한 지역의 잠재력이 그 순간 이 초개체의 필요를 충족한다면, 초개체는 한 동안 새로운 서식지에 정착하고 더욱 비옥한 지역들을 찾기 위한 탐색을 반복하면서 이주를 지속한다. 반면 인위적 유기체(artificial-organism)들이 장소를 바꾸면, 이 인위적 유기체들을 포함하고 있는 초개체는 가장 안정적 상태(global minimum)를 향한 이동을 지속한다. DS 알고리즘에서는 각 문제에 대한 임의적 해법들 전체는 인위적 초개체(artificial-superorganism)의 이주에 대응한다고 가정한다. DS 알고리즘은 이러한 이주행위를 모델링한 것이다. DS 알고리즘은 2개의 제어 파라미터(P1, P2) 의해 수렴성에 영향을 받는데 가장 적합한 값을 결정하기 위해 디테일한 테스트가 실시되었고, P1=0.3\*rand와 P2=0.3\*rand 일 때 각각의 문제에

대한 최상의 솔루션을 제공하는 것을 볼 수 있다. DS 알고리즘의 전반적 계산 순서는 다음과 같다[7].

Step 1. 문제 초기화

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

목적함수 :  $y(i)$

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

b) 초개체의 크기(D), 최대 개체수(G)를 결정한다.

Step 2. 초개체 초기화

초개체는 인위적 유기체로 구성되어지며 각각의 인위적 유기체들은 식 (2)와 같이 랜덤 함수를 이용하여 초기화한다.

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

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

Step 3. 경유 서식지(Stopover-Site) 구성

경유 서식지는 초개체의 초기값으로 구성하게 되고 척도값(scale value)은 [0-1] 범위에서 감마 난수 생성기(Gamma random number generator)와 랜덤 함수를 이용하여 반복 계산되어지며 초개체와 비교하여 최적해 여부를 판별한다. 경유 서식지 개선 방법의 수도 코드는 다음과 같다.

- $donor = Superorganism_{Random\_Shuffling(i)}$
- $Scale = randg[2 \cdot rand_1] \cdot (rand_2 - rand_3)$
- $StopoverSite = Superorganism + Scale \cdot (donor - Superorganism)$

척도값 계산에 사용된 구조는 각 인위적 초개체들이 해당 서식지에서 방향을 급진적으로 바꿀 수 있도록 해준다.

Step 4. 초개체 개선 및 종료

전 단계에서 새롭게 계산되어진 경유 서식지는 초개

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

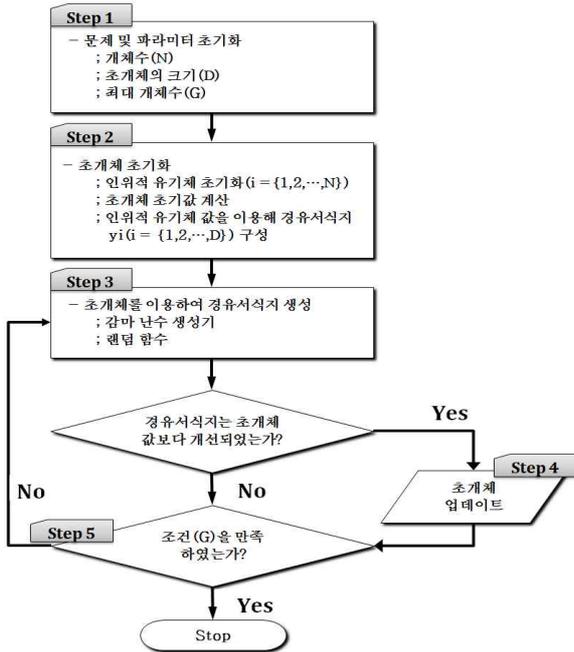


그림 1. DS 알고리즘 순서도  
Fig. 1. Flowchart of DS Algorithm

### 3. 마이크로 그리드 최적운영

마이크로 그리드의 최적운영은 그리드 내 각 발전원의 발전능력 범위 내에서 전체출력이 부하 요구량을 만족시키면서 전체발전 비용이 최소가 되도록 각 발전원의 발전량을 최적화하는 것이다. 풍력 및 연료전지의 경우에는 각 발전원의 특성에 따라 출력식이 결정된다.

#### 3.1 마이크로 그리드 구성

##### 3.1.1 디젤 발전기

디젤 발전기(Diesel Generator : DiG) 는 기존의 화석연료 발전비용 모델을 이용해 비용함수를 모델링하였다. 연료비, 유지보수 비용을 제외한 비용함수는

식 (3)과 같다.

$$C_{DiG,i} = \sum_{i=1}^n (a + bP_{DiG,i} + cP_{DiG,i}^2) \quad (3)$$

일반적으로 발전기의 비용계수 a, b, c는 DiG의 성능에 의해 결정되며 본 논문에서 사용된 데이터는 표 1과 같다[8].

표 1. 디젤 발전기의 비용계수  
Table 1. Cost coefficient of DiG

| Unit  | a      | b      | c      | P <sub>min</sub><br>(kW) | P <sub>max</sub><br>(kW) |
|-------|--------|--------|--------|--------------------------|--------------------------|
| DiG#1 | 0.4333 | 0.2333 | 0.0074 | 0.5                      | 5.0                      |
| DiG#2 | 0.2731 | 0.1453 | 0.0042 | 0.3                      | 3.0                      |
| DiG#3 | 0.8467 | 0.5142 | 0.0092 | 0.7                      | 8.0                      |

##### 3.1.2 풍력 발전기

풍력 발전기는 풍속에 관한 환경적인 요인이 발전량에 상당한 영향을 주게 되므로 주변조건에 따른 운전 제약이 포함되어야 한다. 풍력 발전기는 가변 출력특성을 이용하여 모델링 하였다. 풍속에 따른 풍력 발전기의 출력은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며 표 2는 풍력 발전기의 데이터를 나타낸 것이다[8]. 같은 지역에 설치하는 2대의 풍력 발전기는 유사한 출력결과가 나타나기 때문에 파라미터의 값에 차이를 두고 최적화를 진행하였다.

$$C_{WT} = \sum C_{WT(M/O)} P_{WT} \quad (4)$$

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ cv^2 + bv + a & v_{ci} < v < v_r \\ P_{WTR} & v > v_{co} \end{cases}$$

여기서

$C_{WT}$  : 풍력발전비용[\$/kW]

$C_{WT(M/O)}$  : 유지 및 운전비용[\$/kW]

$v, v_{ci}, v_{co}, v_r$  : 풍속, 시동, 중단, 정격풍속 [m/sec]

$P_{WT}, P_{WTR}$  : 발전, 정격출력 [kW]

표 2. 풍력 발전기 데이터  
Table 2. Wind Turbine Data

| Unit   | a      | b      | c      | P <sub>min</sub><br>(kW) | P <sub>max</sub><br>(kW) | C <sub>WT(M/O)</sub> |
|--|--------|--------|--------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| WT#1   | 0.4333 | 0.2333 | 0.0074 | 0.5                      | 3.0                      | 0.022                |
| WT#2   | 0.2731 | 0.1453 | 0.0042 | 0.3                      | 3.0                      | 0.032                |
| v <sub>ci</sub> : 2.5m/sec, v <sub>co</sub> , v <sub>r</sub> : 14.5m/sec |        |        |        |                          |                          |                      |

### 3.1.3 연료전지

연료전지의 운영비용은 거의 대부분이 연료투입 비용이며 여기에 연료가 전력으로 변환되는 경우의 효율을 포함시켜 비용함수를 계산한다. 본 논문에서 사용한 연료전지의 비용함수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 표 3은 연료전지 데이터를 나타낸 것이다[8].

$$C_{FC} = C_{natural} \sum \frac{P_{FC}}{\eta_{FC}} \quad (5)$$

여기서

P<sub>FC</sub> : 연료전지 발전출력 [kW]

C<sub>FC</sub> : 연료전지 발전비용 [\$/kW]

C<sub>natural</sub> : 천연가스비용 [\$/kW]

η<sub>FC</sub> : η<sub>1</sub>η<sub>2</sub> 연료전지 효율 [%]

표 3. 연료전지 데이터  
Table 3. Fuel Cell Data

| Unit                      | C <sub>natural</sub> | P <sub>min</sub> (kW) | P <sub>max</sub> (kW) | η <sub>FC</sub> |
|---------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| FC#1                      | 0.03                 | 0.0                   | 1.5                   | 90              |
| FC#2                      | 0.03                 | 0.0                   | 1.5                   | 90              |
| FC#3                      | 0.04                 | 0.0                   | 2.5                   | 85              |
| M/O : 0.02\$/kW, FC 1,2,3 |                      |                       |                       |                 |

## 3.2 최적운영의 정식화

마이크로 전원에 관한 최적운영 문제를 위해 다음과 같이 정식화 하였으며 주 계통과 분리된 상태에서의 마이크로 그리드 단독 운용에 관해서만 분석하였다.

### 3.2.1 목적함수

각 발전기들의 비용함수를 이용해 전체 비용함수를 구성하였고 이를 목적함수로 사용하여 식 (6)과 같이 나타 내었다.

$$Total Cost = \sum_{i=1}^n C_{Dg,i} + \sum_{i=1}^m C_{WT(M/O)i} P_{WT,i} + \sum_{i=1}^k C_{FC,i} \quad (6)$$

### 3.2.2 제약함수

24시간 부하 프로파일을 이용해 제약함수를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 디젤 발전기와 연료전지의 상, 하한 발전 한계는 정해져 있어 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 그러나 풍력의 경우에는 기후에 영향을 받기 때문에 지역별 풍속데이터를 이용해 식 (4)에 의해 발전기의 상한치가 결정되어 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$s.t : P_{Load} = \sum_{i=1}^n P_{Dg,i} + \sum_{i=1}^m P_{WT,i} + \sum_{i=1}^k P_{FC,i} \quad (7)$$

$$Dg, FC : P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (8)$$

$$WT : 0 \leq P_i \leq P_{WT} \quad (9)$$

본 논문에서는 목적 함수와 제약 함수를 하나의 평가 함수로 구성하기 위해 일반적 페널티법을 사용하여 식 (10)과 같이 나타내고 DS 알고리즘에 적용하였다[9].

$$eval(x) = f(x)p(x) \quad (10)$$

$$\begin{cases} p(x) = 1; \text{if } x \text{ is feasible} \\ p(x) > 1; \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서

f(x) : 목적함수

p(x) : 제약함수

## 4. 사례연구

본 논문에서는 마이크로 그리드 최적운영을 위하여

디젤발전기, 풍력 발전기 및 연료전지 등을 사용하여 DS 알고리즘에 적용하였다.

하루를 기준으로 20분 간격, 전체 72구간으로 나누어 최적화를 진행하였다. 풍력 발전기의 출력을 결정하고자 그림 2의 일일 풍속데이터와 그림 3의 일일 부하 데이터를 이용하였다.

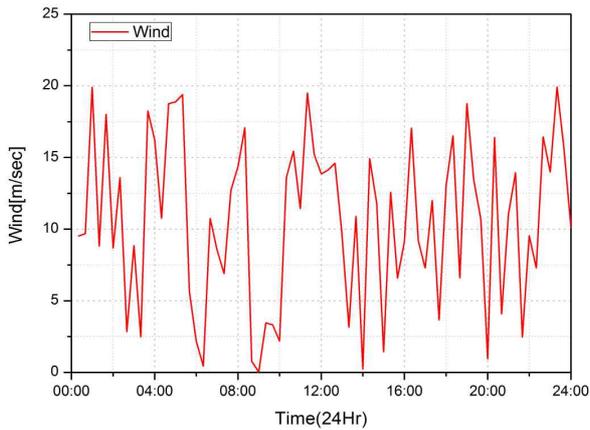


그림 2. 일일 풍속 데이터  
Fig. 2. Wind Speed Data for a day

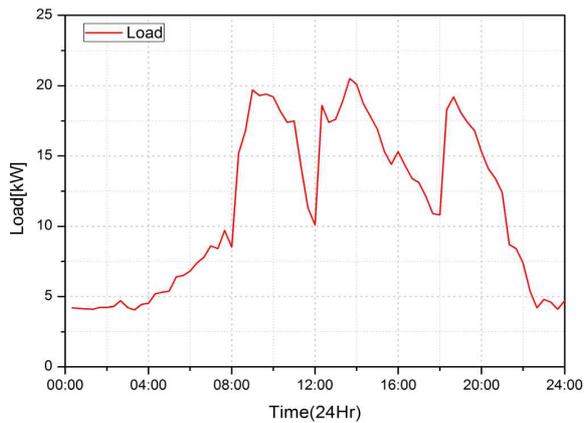


그림 3. 일일 부하 데이터  
Fig. 3. Load Data for a day

그림 4는 디젤발전기 출력 결과이다. 3 대의 발전기 중 발전비용이 상대적으로 낮은 #2 발전기가 우선적으로 투입되었음을 확인할 수 있다. 부하 데이터가 높을 때는 낮은 발전비용을 갖는 발전기를 우선 투입 후 발전비용이 상대적으로 높은 #1, #3 발전기들이 투입되었음을 확인할 수 있다. 그림 5는 연료전지, 그림 6

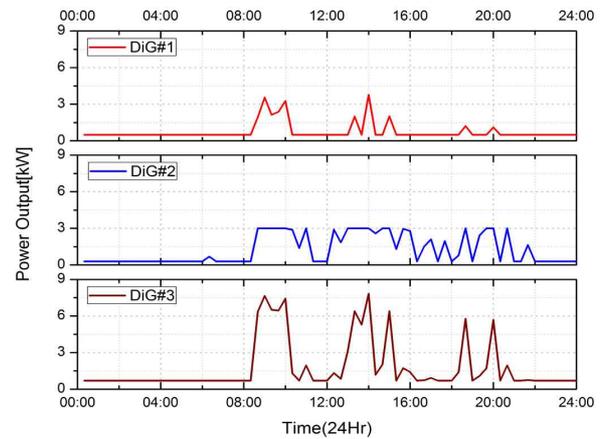


그림 4. 디젤발전기 출력 결과  
Fig. 4. Diesel Generator Output Result

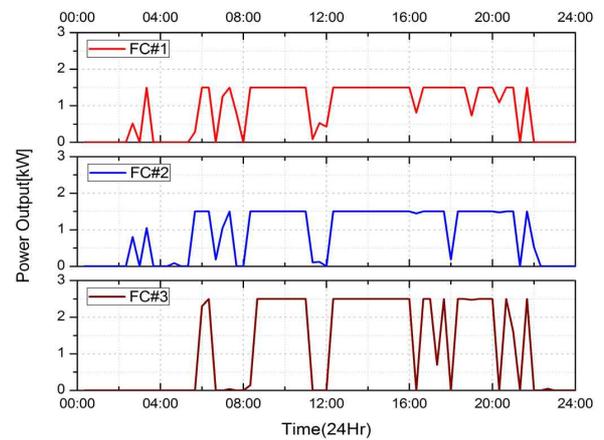


그림 5. 연료전지 출력 결과  
Fig. 5. Fuel Cell Output Result

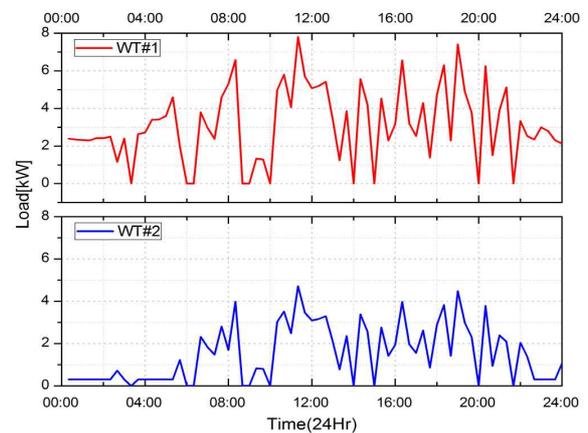


그림 6. 풍력 발전기 출력 결과  
Fig. 6. Wind power Generator Output Result

은 풍력에 관한 발전량 출력 결과이다.

그림 7은 풍속에 따른 풍력발전 출력결과를 비율로 나타낸 것이다. 풍력 발전기의 경우 풍속에 의해 발전량이 결정되어 일정 출력을 나타내지는 못하지만 다른 발전기 보다 낮은 비용의 발전비용으로 우선 선택되는 발전원임을 확인할 수 있다.

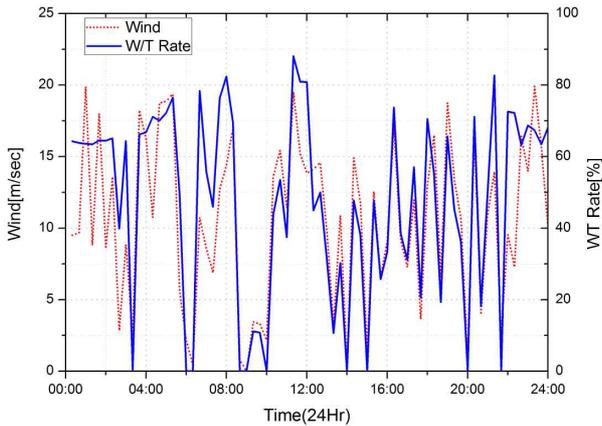


그림 7. 풍속별 풍력발전 출력 결과  
Fig. 7. The output of wind power Generator corresponding to wind speed

그림 8은 전체 결과인 마이크로 그리드의 1일 운용 비용과 풍속데이터이다.

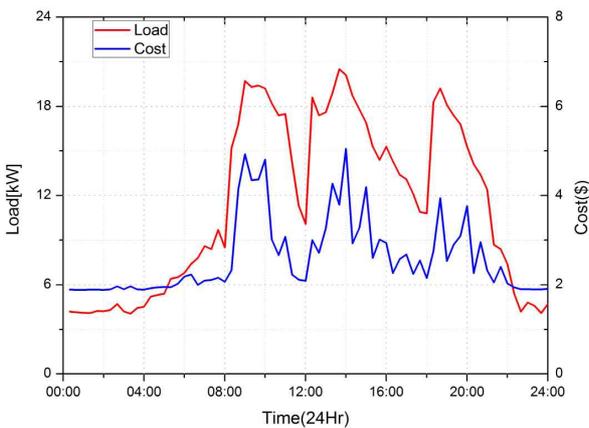


그림 8. 일일 운용비용 결과  
Fig. 8. Result of Operating Cost for a day

표 4는 일일 운용비용 결과 중 경부하, 중부하, 최대 부하 3구간에서의 DS 알고리즘을 적용한 결과이다.

풍력 발전기와 연료전지의 경우 디젤발전기 보다 낮은 비용의 발전비용으로 우선 선택되는 발전원임을 확인할 수 있다.

표 4. 발전량 출력결과 및 비용  
Table 4. Power Output and Cost

| 시간  | 00:00-00:20             | 18:00-18:20               | 09:00-09:20              |
|---|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 운전 조건   | 풍속:9.51m/s<br>부하량:4.2kW | 풍속:13.04m/s<br>부하량:10.8kW | 풍속:3.46m/s<br>부하량:19.3kW |
| 결과  |                         |                           |                          |
| DiG#1   | 0.5000                  | 0.5000                    | 2.1417                   |
| DiG#2   | 0.3000                  | 0.3000                    | 3.0000                   |
| DiG#3   | 0.7000                  | 0.7000                    | 6.5053                   |
| WT#1  | 2.4000                  | 4.7356                    | 1.3278                   |
| WT#2  | 0.3000                  | 2.8831                    | 0.8253                   |
| FC#1  | 0.0000                  | 1.4990                    | 1.5000                   |
| FC#2  | 0.0000                  | 0.1823                    | 1.5000                   |
| FC#3  | 0.0000                  | 0.0000                    | 2.5000                   |
| $\Sigma P_i$ (kW)   | 4.2                     | 10.8                      | 19.3                     |
| Cost(\$)  | 1.8842                  | 2.1079                    | 4.2782                   |
| Total Cost(\$/24hr): 183.3950, Total Load(kW/24hr):818.95<br>부하량, 발전출력 비용은 20분간 운전 결과임. |                         |                           |                          |

## 5. 결론

본 논문에서는 마이크로 그리드 최적운용 기법을 위해 DS 알고리즘을 이용한 해석 방안을 제안하였다. DS 알고리즘은 최소운전비용으로 부하조건을 만족시키면서 코딩 및 적용이 간단하고 수렴속도 또한 1500번 이내로 최적값이 수렴함을 확인하였다.

향후 본 논문의 결과를 바탕으로 주 계통과 마이크로 그리드의 연계, 다양한 여러 제약조건들을 고려한 종합적 최적운용 기법에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

이 논문은 한국조명 전기설비학회 2014년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천 논문으로 선정된 논문임.

## References

- [1] Lasseter, R., "MicroGrids," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002., New York, NY, 2002, p. 305-08.
- [2] Zwe-Lee Gaing, "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints," IEEE Trans. on Power System, Vol. 18, No.3, pp. 1187-1195, Aug. 2003.
- [3] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol. IV, pp. 1942-1948, 1995.
- [4] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput., pp. 69-73, May 1998. R. Boyce, Human Factors in Lighting, 2nd Edition, Lighting Research Center, 2003.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol. IV, pp. 1942-1948, 1995.
- [6] Geem, Z.W., Tseng, C-L. and Park, Y. "Harmony search for generalized orienteering problem: best touring in China," Book Advanced in Natural Computation, Vol. 361, No. 2, Springer Berlin/Heidelberg, 2005.
- [7] P. Civicioglu, "Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm," Computers & Geosciences, Vol. 46, pp. 229-247, 2012.
- [8] Sang-Bong Rhee, Kyu-Ho Kim, Chul-Hwan Kim, "An Application of Harmony Search Algorithm for Operational Cost Minimization of MicroGrid System", Trans. KIEE, Vol. 58, No. 7, pp.1287-1293, JUL, 2009.
- [9] Michalewicz, Z., "A Survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Method" Proc. 4th Annual Conference on Evolutionary Programming, pp. 135-155, 1995.

## ◇ 저자소개 ◇



### 박시나(朴特拏)

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



### 이상봉(李相奉)

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