

마이크로그리드의 효율적 운영을 위한 최적화기법의 응용

(An Application of Optimization method for Efficient Operation of Micro Grid)

김규호*

(Kyu-Ho Kim)

Abstract

This paper presents an application of optimization method for efficient operation in micro grid. For operational efficiency, the objective function in a diesel generator consists of the fuel cost function similar to the cost functions used for the conventional fossil-fuel generating plants. The wind turbine generator is modeled by the characteristics of variable output. The cost function of fuel cell plant considers the efficiency of fuel cell. Particle swarm optimization(PSO) and sequential quadratic programming(SQP) are used for solving the problem of microgrid system operation. Also, from the results this paper presents the way to attend power markets which can buy and sell power from upper lever grids by connecting a various generation resources to micro grid.

Key Words : Efficient Operation, Micro Grid, Particle Swarm Optimization(PSO),
Sequential Quadratic Programming(SQP), Operational Cost, Renewable Energy Sources

1. 서 론

최근 재생에너지는 계통에 설치되는 위치, 운영방법에 의해 계통손실을 감소하고 대규모 전원설치를 줄일 수 있으며, 계통사고시 더 큰 사고로 확대되는 것을 방지할 수 있다. 마이크로 그리드의 최적운영은 그리드내 각 발전원의 발전출력 범위 내에서 전체출력이

부하 요구량을 만족시키면서 전체발전 비용이 최소가 되도록 각 발전원의 발전량을 최적화하는 것이다. 이때 목적함수인 비용함수는 각 발전기의 특성에 의해서 결정되며 디젤 터빈의 경우에는 일반적으로 발전출력에 대해 2차로 근사화된 함수를 사용한다. 풍력 및 연료전지의 경우에는 각 발전원의 특성에 따라 출력식이 결정된다[1-4]. Meliopoulos는 불평형상태에 대한 운전을 위하여 소프트웨어를 이용하여 마이크로 그리드를 설계하는 것을 다루었다[3]. Krishnamurthy는 plug and play 방법을 이용하여 부하의 요구조건에 맞추어 마이크로그리드의 규모를 확장하고 줄이는 방안을 연구하였으며, 인버터를 사용하는 분산전원들을 모델링하여 운영 및 제어하였다[4]. 또한 문헌 [1], [5]와 [6]에서는 전역적 탐색기법의 일종인 Harmony

* 주(교신)저자 : 국립한경대학교 전기공학과 부교수
* Main(Corresponding) author : Associate Professor,
Dept of Electrical Engineering, Hankyong
National University
Tel : 031-670-5324, Fax : 031-670-5329
E-mail : kyuhoh@hknu.ac.kr
접수일자 : 2012년 10월 14일
1차심사 : 2012년 10월 16일, 2차심사 : 2012년 11월 15일
심사완료 : 2012년 11월 19일

Search Algorithm(HSA)와 Particle Swarm Optimization (PSO)을 이용하여 네트워크의 운영에 관하여 다루었다. 그러나 이러한 최적화기법은 알고리즘의 특성상 전역적 최적해를 탐색할 가능성은 높으나 일반적으로 기존의 전형적인 탐색기법 보다 탐색시간이 오래 걸릴 수 있다는 단점이 제시되고 있다.

본 논문은 전역적 탐색기법의 하나인 PSO와 기존의 전형적인 탐색기법의 하나인 Sequential Quadratic Programming(SQP)를 이용하여 비교하고 마이크로 그리드의 효율적인 운영에 관한 방안을 제시하였다. 또한 향후 마이크로그리드의 상위계통으로부터 전력 구입과 판매를 고려하여 전력시장에 참여하기 위한 방안을 제안하였다.

2. 최적운영을 위한 정식화

디젤 발전기, 풍력 발전기 및 연료전지 발전기 등 각 발전방식에 따른 운전비용을 비용함수로 모델링하여야 한다[1,4,5].

2.1 분산전원의 모델링

디젤 발전기

디젤 발전기(Diesel Generator : DiG)는 기존의 화석 연료 발전비용 모델을 이용해 비용함수를 모델링 할 수 있으며 식 (1)과 같다[4].

$$C_{DiG} = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{DiG,i} + c_i P_{DiG,i}^2) \quad (1)$$

- N : DiG 발전기 수
- P_{DiG} : 디젤 발전출력[kW]
- C_{DiG} : 디젤 발전기 발전비용[\$/kWh]
- a_i, b_i, c_i : 발전기의 비용계수 (i, \dots, N)

풍력 발전기

풍력 발전기에서의 발전 출력은 풍속에 의해 그 양이 결정되며 일반적으로 유도 발전기를 사용한다. 여기서 디젤 발전기와 연료전지 발전기의 상, 하한 발전

한계는 정해져 있으나 풍력 발전기의 경우에는 기후에 영향을 받기 때문에 지역별 풍속데이터를 이용해 식 (2)에 의해 발전기의 상한치가 결정된다.

$$C_{WT} = \sum_{i=1}^M C_{(M/O)i} P_{WT,i} \quad (2)$$

$$P_{WT,i} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ a_i + b_i v + c_i v^2 & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{WTR,i} & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases}$$

여기서

v, v_{ci}, v_{co}, v_r : wind, cut-in, cut-out, rated speed [m/sec]

$P_{WT,i}$: 발전기 정격출력[kW]

C_{WT} : 풍력 발전비용[\$/kW]

$C_{(M/O)i}$: 유지 및 운전비용[\$/kW]

M : 풍력 발전기 수

연료전지 발전기

연료전지 발전기의 운영비용은 거의 대부분이 연료 투입 비용이며 여기에 연료가 전력으로 변환되는 경우의 효율을 포함시켜 비용함수를 계산한다.

$$C_{FC} = C_{natural} \sum \frac{P_{FC}}{\eta_{FC}} \quad (3)$$

여기서

P_{FC} : 연료전지 발전기 출력[kW]

$C_{FC}, C_{natural}$: 연료전지 발전기 발전비용[\$/kWh] 및 천연가스비용[\$/kWh]

η_{FC} : $\eta_1 \eta_2$ 연료전지 발전기 효율 [%]

2.2 목적함수

목적함수는 식 (4)와 같이 각 재생에너지의 비용합수와 네트워크로부터 구입하는 구입전력비용 C_{Buy} 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Total\ Cost\ Func. = C_{DiG} + C_{WT} + C_{FC} + C_{Buy} \quad (4)$$

여기서 C_{Buy} 는 다음과 같이 정의할 수 있으며, K_c 는 전력구입비용 계수이고, $P_{s,Buy}$ 는 네트워크로부터 구입하는 전력이다.

$$C_{Buy} = K_c P_{s,Buy}, \quad (5)$$

2.3 제약조건

제약함수는 식 (6)~(8)로 나타낼 수 있다.

전력조류방정식

$$F(x_i, P_k) = 0 \quad (6)$$

여기서 P_k 는 모선 k 에서 발전량이고 x_i 는 상태변수이다.

전력수급 방정식

$$\sum_{i=1}^N P_{DG,i} + \sum_{i=1}^M P_{WT,i} + \sum_{i=1}^K P_{FC,i} + P_{s,Buy} = P_{Load} + P_{loss} \quad (7)$$

여기서 발전기출력과 구입전력의 합은 마이크로그리드의 전체부하와 손실의 합과 같아야 한다.

발전기출력

$$P_{k,min} \leq P_k \leq P_{k,max} \quad (8)$$

여기서 $P_k, P_{k,min}, P_{k,max}$ 는 각각 모선 k 의 발전기출력과 상하한치이다.

3. 최적화기법

3.1 Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization(PSO)의 기본 개념은 새들이 무리를 지어 다니는 현상이 매우 질서 정연하며 방향성이 있으면서도 예측하기 힘든 특징이 있는

데 바로 이러한 새들 무리의 위치 및 방향을 그래픽으로 표현하는 것을 연구하다가 기본 개념이 만들어졌다[4,7,8]. PSO는 초기에 랜덤한 해공간(모집단)을 가지고 시작한다는 점에서 그 시스템이 유전 알고리즘과 매우 비슷하다. 그러나 입자(particle)라고 하는 잠재 해집단이 랜덤한 속력을 갖게 되는 점과 이 입자들이 전체 해집합의 공간을 탐색한다는 점이 유전알고리즘과는 다르다. 각 입자들은 해 공간상에서 그들 좌표의 자취를 기억하고 있으며 지금까지의 자취 중 최선의 해(fitness)를 가지고 있는데 이를 $pbest$ 라고 부른다. 또 하나의 ‘최선의 해’는 전역해의 개념인데 지금까지 입자들이 가지고 있는 최선의 해의 집합중에서 가장 최선의 해이고 이를 $gbest$ 라고 한다. PSO의 개념은 각 단계에서 각각의 입자들은 그들의 $pbest$ 와 $gbest$ 를 향하여($pbest$ 와 $gbest$ 의 벡터합) 그들의 움직이는 속도를 바꾼다는 것이다. PSO의 연산 과정은 다음과 같다.

절차 1 d 차원의 해 공간상에서 위치와 속도를 랜덤하게 가진 입자들의 모집단을 구한다(초기화).

절차 2 각 입자들에 대해 적합도를 평가한다.

절차 3 각 입자들의 적합도를 그 입자의 $pbest$ 와 비교한다. 만일 현재의 적합도가 $pbest$ 보다 낮다면 $pbest$ 에 현재값을 할당한다.

절차 4 각 입자들의 적합도를 지금까지 모집단의 해 중 $best$ 와 비교한다. 만일 현재값이 $gbest$ 보다 낮다면 $gbest$ 에 현재값을 할당한다.

절차 5 각 입자들의 속도와 위치는 다음의 식에 따라서 계산한다. 각 입자는 현재의 위치벡터 x_i , 속도벡터 v_i , $pbest$ 와 $gbest$ 를 이용해서 식 (9)와 같이 속도가 결정 된다. 또한 각 입자의 위치벡터의 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (10)과 같이 이루어진다.

$$v_{i+1} = w * v_i + c_1 * rand() * (pbest - x_i) + c_2 * rand() * (gbest - x_i) \quad (9)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_i \quad (10)$$

여기서 w 는 관성하중이고, c_1, c_2 는 가중치상수이다.

절차 6 의사결정기준에 부합되거나 충분히 좋은 적합도를 가진 해를 얻거나 충분히 많은 세대를 거치게 될 때까지 2단계부터 루프를 계속 돌린다.

3.2 순차적2차계획법

순차적2차계획법(Sequential Quadratic Programming : SQP)은 매 번의 반복 계산 시 모든 제약조건을 만족하는 실현가능 해를 순차적 방법으로 탐색하는 비선형 문제의 해법이다. 기본적인 알고리즘 구성은 라그랑제 함수의 헤시안 행렬을 사용하며 QP와 line search 등의 여러 가지 탐색 방법이 조합된 탐색 기법이다[9]. SQP는 실현 가능한 초기해를 기반으로 라그랑제 함수의 헤시안 행렬을 구성하고 이 헤시안 행렬을 이용해 QP를 해석함으로써 탐색 방향을 결정한다. SQP에서 탐색방향 및 step size는 여러 가지 방법을 조합해서 사용하므로 목적함수, 제약식의 형태에 따라 다양하게 사용될 수 있다. 본 연구에서 사용된 방법은 line search (monotone, nonmonotone line search) 및 Armijo type arc search를 사용하였다. 계산된 탐색 방향은 목적함수를 감소시키는 방향으로 진행하며 모든 제약식을 만족한다.

절차 1 : 초기화(initialize)

- i) 변수 x_0 , 탐색방향 d_0 , step size t_0 가 실행불가능 영역의 초기값일 경우 실행가능영역의 초기해를 구성한다.

절차 2 : 최적해 탐색(search)

- i) 변수 및 헤시안 행렬로 구성된 QP 문제의 해를 계산함으로써 탐색 방향을 결정한다.
- ii) 목적함수와 등식, 부등식의 모든 제약을 만족하는 step size를 결정한다.

절차 3 : 반복계산(update)

- i) 헤시안 행렬 업데이트.
- ii) $x_{k+1} = x_k + t_k d_k + t_k^2 \tilde{d}_k$, 여기서 t_k 는 k 번째 step size, d_k 는 k 번째 탐색 방향, \tilde{d}_k 는 d_k 를 사용해 얻

어지는 QP 문제의 해

iii) 제약식을 포함한 라그랑제 문제의 해석

$$\min \left\| \sum_{j=1}^{n_f} \zeta_{k,j} \nabla f_j(x_{k+1}) + \xi_k + \sum_{j=1}^{t_i} \lambda_{k,j} \nabla g_j(x_{k+1}) + \sum_{j=1}^{t_e} \mu_{k,j} \nabla h_j(x_{k+1}) \right\|^2 \quad (11)$$

여기서 $\zeta_{k,j}, \xi_k, \mu_{k,j}, \lambda_{k,j}$ 는 QP 문제 및 제약식과 관련된 K-T 승수이다. $\nabla f_j, \nabla g_j, \nabla h_j$ 는 각각 목적함수, 부등식 제약 및 등식 제약조건에 관한 식이며, n_f, t_i, t_e 는 각각 목적함수, 부등식 제약 및 등식 제약조건의 수이다. 식 (11)로부터 제약조건을 만족하면서 라그랑제 함수가 최소가 되는 해를 탐색하면 최적의 해를 얻을 수 있다.

4. 사례연구

본 연구에서는 마이크로그리드에 있어서 최적운행을 위하여 디젤 발전기, 풍력 발전기 및 연료전지 발전기 등을 사용하여 효율적인 운전을 위한 방안을 제시하였다.

그림 1은 IEEE 13-buses system이며 IEEE에서 배전계통 해석을 위해 제공한 표준계통이다. 이 계통에 표 1에 나타낸 다수의 재생에너지를 적용하였다. 여기에서 다수의 부하지점에 재생에너지가 연결되어 있다고 가정하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 2는 1일 풍속 및 부하패턴 데이터이다[10,11]. 표 1은 본 논문에서 사용하는 각 발전기에 대한 비용계수 등을 나타내었다. 표 2는 주어진 데이터를 이용하여 마이크로그리드의 최적운영 전후의 결과를 나타내었다. 최적운영 전에는 네트워크로부터 전력 구입비용이 \$1,255,443.6로 전체 운영비용이었다. 그러나 디젤 발전기, 풍력 발전기, 연료전지 발전기 등을 이용하여 마이크로그리드를 운영하였을 때는 마이크로그리드를 운영하는 비용은 \$84,127.1이고 네트워크로부터 전력을 구입하는 비용은 \$205,118.8가 되어 전체 운영비용은 \$1,255,443.6에서 \$289,245.9로 감소되었다. 결국 재생에너지를 마이크로그리드에 설치하여

운영함으로써 상위계통으로부터 전력을 구입하는 비용을 감소하여 마이크로그리드의 경제적 운영에 크게 기여할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 전역적 탐색기법인 PSO의 결과와 기존의 전형적인 탐색기법인 SQP의 결과를 비교함으로써 PSO의 결과가 우수함을 확인하였다. 그러나 계산시간에 있어서는 하루 24시간에 대하여 20분 단위로 계산을 하였으며 SQP가 PSO 보다 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 향후 규모가 더 크고 복잡한 계통에 대하여 상위계통으로부터 전력구입과 판매를 고려한 전력시장에 참여하는 것을 포함시킬 예정이다. 이를 위하여 PSO 보다는 SQP가 더욱 적합할 것으로 사료된다. 마이크로 그리드는 초 단위 혹은 분단위의 계통 상황의 변화에 대하여 운영하여야 하므로 탐색시간이 많이 걸리는 전역적 탐색기법 보다는 탐색시간이 적게 걸리는 SQP와 같은 최적화기법이 적합하기 때문이다.

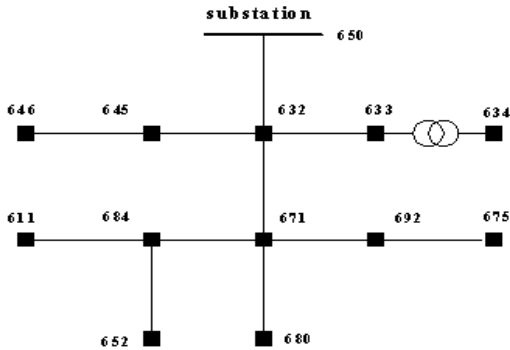


그림 1. IEEE 13-bus system
Fig. 1. IEEE 13-bus system

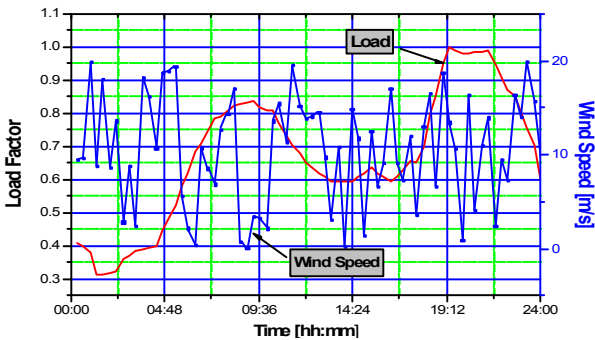


그림 2. 하루 동안의 풍속과 부하패턴
Fig. 2. Wind speed and load pattern for a day

표 1. 발전기 비용계수
Table 1. Coefficients of Generators

Bus no.	Gen. Type	a	b	c	P_{min} (kW)	P_{max} (kW)	Eff (%)
671	D 1	0.2731	0.1453	0.0042	0	800	0
646	D 2	0.4333	0.2333	0.0074	0	400	0
634	F 1	0	0.05	0	0	150	90
611	F 2	0	0.05	0	0	100	90
652	F 3	0	0.07	0	0	100	85
692	W 1	0	0.022	0	0	300	0
675	W 2	0	0.032	0	0	300	0

표 2. 시뮬레이션 결과
Table 2. Simulation Results

	Pre-operation with the renewable energy	Post-operation with the renewable energy	
		PSO	SQP
Total operating costs of the micro grid(\$)	1,255,443.6	289,245.9	291,351.3
Operating costs of the Micro grid(\$)	-	84,127.1	84,923.7
Buying power costs from network(\$)	1,255,443.6	205,118.8	206,427.6
CPU Time(sec.)		13.9	2.5

5. 결론

본 연구에서는 최적화기법을 이용하여 마이크로그리드의 최적운영 방안을 제시하였다.

마이크로그리드의 효율적인 운영을 위하여 디젤 발전기, 풍력 발전기, 연료전지 발전기 등의 운전특성을 고려하였으며, 최소운전비용으로 부하조건을 만족시키면서 전체 운영비용을 상당히 감소시킬 수 있었다. 특히 PSO와 SQP를 이용하여 해를 비교하여 전역적 탐색기법인 PSO가 더 우수한 해를 탐색한다는 것을 확인할 수 있었으나, 계산시간에 있어서는 PSO 보다 SQP가 더 빠르다는 것을 확인하였다. 따라서 마이크

로 그리드는 초단위 혹은 분단위의 계통 상황의 변화에 대하여 운영하여야 하므로 탐색시간이 많이 걸리는 전역적 탐색기법 보다는 탐색시간이 적게 걸리는 SQP와 같은 최적화기법이 적합하다.

향후 SQP와 같은 최적화기법을 이용하여 복잡한 계통에 대하여 다수의 재생에너지를 연결하여 상위계통으로부터 전력구입과 판매를 고려한 전력시장에 참여하는 것을 포함시킬 예정이다.

References

[1] Sang-Bong Rhee, Kyu-Ho Kim, Chul-Hwan Kim, "Harmony Search Algorithm for Optimal Placement Problem of Distributed Generations", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.58, No.5, pp.866~870, 2009.

[2] G. Venkataramanan and C. Marnay. "A larger role for microgrids," IEEE Power & Energy Magazine, Vol.6, Num.3, pp.78-82, May/June2008.

[3] S. Meliopoulos, "Challenges in simulation and design of grids," Proc. of the 2002 IEEE/PES Winter Meeting, NewYork ,NY, 2002.

[4] S. Krishnamurthy, T. M. Jahns, and R.H. Lasseter. "The operation of diesel gensets in a CERTS Microgrid," IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.

[5] Kyu-Ho Kim, Sang-Bong Rhee, Kyung-Bin Song, "Minimization of a Micro Grid Operation Cost Using PSO", The Korean Institute of Electrical Engineers, Autumn Meeting, 2012. 10, pp.454-456.

[6] J. B. Park, Y. W. Jeong, J. R. Shin and K. Y. Lee, "An Improved Particle Swarm Optimization for Nonconex economic Dispatch Problems," IEEE Trans. Power System, Vol. 25, No. 1, pp.156-166, 2010.

[7] C. Reynolds, "Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model," 1987 Computer Graphics, Vol.21 ,No.4, pp.25-34.

[8] J. S. Heo and K. Y. Lee, "A Multiagent-System-Based Intelligent Reference Governor for Multiobjective Optimal Power Plant Operation," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 23, NO. 4, pp. 1082-1092, Dec. 2008.

[9] C. T. Lawrence and A. L. Tits, "Nonlinear Equality Constraints in Feasible Sequential Quadratic Programming", Optimization Methods and Software 6, pp.265-282, 1996.

[10] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders," IEEE Trans. on Power System, Vol.6, No.3, pp.975-979, 1991.

[11] IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, Radial Test Feeders, [Online]: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.

◆ 저자소개 ◆



김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 3월 안산공과대학 전기과 부교수. 2008년 9월~현재 국립한경대학교 전기공학과 부교수.