

분산형 전원의 배전계통 연계시 경제적 발전 계획 수립에 대한 연구

김지홍, 정현수, 김진오  
 한양대학교 전기공학과

A Study of Economic Generation Planning  
 for operating power systems with Dispersed Generation

Ji Hong Kim, Hyeon Soo Jung, Jin O Kim  
 Department of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - This paper presents an economical generation planning for operating power systems with dispersed generation. As dispersed generation introduced into an electric power distribution system, the power system will be complicated and have much variable aspects. So there is need for developing new generation scheduling. In this paper, the proposed method is tested for distribution system with two battery storage resources. Optimal generation planning of 15 thermal units in 24-hours is achieved by improved genetic algorithm. Also, to show its effectiveness, the results are compared with those of not including battery storage resources.

1. 서 론

근래 경제성장과 산업 및 사회활동의 고도화에 따라서 증대되는 전력수요에 대해, 전력수급의 안정적인 확보를 위해 종래의 중앙 집중식 대규모 전원의 개발보다는 다양한 에너지원의 효율적 활용을 위한 방법으로써 분산형 전원의 적극적 개발과 도입이 요구되고 있다. 또한 분산형 전원에 대한 기술적인 향상과 더불어, 현재 관심을 모으고 있는 전력산업 구조개편으로 인한 규제완화로 인해 다방면으로 연구가 이루어지고 있다[1,2]. 분산형 전원이란 연료전지, 풍력발전, 태양광발전, 소형열병합발전 및 전지전력저장시스템(BESS)이 해당되며, 이들은 전력계통과 별도로 독립적으로 운용할 수도 있지만 전력계통과 연계된 상태에서 운전함으로써 유효전력손실의 최소화, 전력설비의 효율적 활용, 주파수조정등의 잇점을 얻을 수 있다. 이러한 분산형 전원의 도입량이 작을 때는 음(-)의 부하로 간주하여 독립적으로 다룰 수 있으나, 도입량이 증가함에 따라 이러한 방법은 경제적으로 비효율적이며 기술적으로 불가능하다. 따라서, 분산형 전원이 전력계통에 본격적으로 도입되어 기존의 계통과 연계가 이루어지면, 그 복잡성과 다양성으로 인해 새로운 경제적인 발전 계획의 수립이 필요하다[3].

본 논문에서는 이러한 분산형 전원을 중 전지전력저장장치가 연계된 배전계통을 상정하여 경제급전과 단기 발전계획과정에 이들을 결합시켜, 24시간 동안의 최적 발전 계획을 수립하였다. 일반적으로 이러한 문제에 우수한 수렴성과 뛰어난 탐색능력을 가지는 유전알고리즘을 격세엘리트즘(Generation apart elitism)과 격세유전(Atavism)으로 개선시킨 알고리즘을 적용하여 계통의 비용 최소 운영점을 찾아내었으며 그 결과를 분산형 전원이 연계되지 않았을 경우와 비교하여 비용의 절감을 보였다.

2. 본 론

2.1 경제급전과 단기발전계획

일반적인 경제급전 문제는 식 (1), (2)와 같은 제약 조건을 갖는 목적함수로 볼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_L + D \tag{1}$$

여기서,

- $P_i$ : 발전기  $i$ 의 출력
- $n$ : 계통안의 발전기 수
- $D$ : 현 계통의 전체부하
- $P_L$ : 계통의 전체 송전손실

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \tag{2}$$

여기서  $P_i^{\min}, P_i^{\max}$ 는 발전기  $i$ 의 최소출력 및 최대출력을 나타낸다. 본 논문에서는 계통의 일일간의 발전비용을 최소화하는 것이 목적이므로, 목적함수는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min f = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} F_i(P_i(t))(t) \tag{3}$$

이 때,  $F_i(t)$ 는 시구간  $t$ 에서 발전기  $i$ 에 대한 발전비용함수이며 2차함수 근사에 의해 식(4)와 같이 정의된다.

$$F_i(P_i(t))(t) = a_i P_i(t)^2 + b_i P_i(t) + c_i \tag{4}$$

여기서  $a_i, b_i, c_i$ 는 발전기특성에 따른 계수이다.

2.2 전지전력저장시스템 모델

본 논문에서 제시한 배전계통에 연계된 전지전력저장시스템은 다음과 같이 모델링될 수 있다[4].

$$x_n(t+1) = x_n(t) - u_n(t) \Delta t \tag{5}$$

$$q_n(t) = \begin{cases} \eta^d u_n(t) & \text{if } u_n(t) \geq 0 \\ \eta^c u_n(t) & \text{if } u_n(t) < 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$\max\{u_n^{\min}, \frac{x_n(t) - x_n^{\max}}{\Delta t}\} \leq u_n(t) \leq \max\{u_n^{\max}, \frac{x_n(t) - x_n^{\min}}{\Delta t}\} \tag{7}$$

여기서,

- $x_n(t)$ : 시구간  $t$ 의 초기에 저장된 에너지량
- $u_n(t)$ : 저장장치에서의 에너지 방출율
- $q_n(t)$ : 저장장치에서 계통으로의 전기적 출력
- $\eta^d$ : 저장장치의 방전효율
- $\eta^c$ : 저장장치의 충전효율
- $u_n^{\min}$ : 저장장치의 최소 방전율

$u_n^{\max}$  : 저장장치의 최대 방전율  
 $x_n^{\min}$  : 저장장치의 최소 저장용량  
 $x_n^{\max}$  : 저장장치의 최대 저장용량  
 $\Delta t$  : 시간  $t$  의 간격

만일 발전기에 의해 공급된 전력이 그 시간대의 부하보다 크다면 에너지는 전지전력저장장치에 저장될 것이며, 전지전력저장장치는 계통에 추가된 부하로 작용한다. 이렇게 저장된 에너지는 발전량이 부하보다 작을 때에 적절히 계통으로 방전하여 부하를 충족시킬 수 있으며, 이 때에 전지전력저장장치는 발전기로 작용한다(5). 따라서 전지시스템이 결합된 경제급전에서의 부하는 다음 식(8)과 같이 정해진다.

$$D_{new}(t) = D(t) + \sum_n a_n(t) \quad (8)$$

### 2.2 유전알고리즘을 위한 염색체 구성

본 논문에서는 난수발생을 통해 상하한 제약 조건식(2)를 만족하는 15개 발전기의 발전량과, 제약 조건식(7)을 만족하는 2개의 전지전력저장장치의 에너지 방출율을 24시간에 대한 2차원적인 형태로 염색체를 구성하였다.

Hour	Generator output					Storage outflow rate	
1	P1(1)	P2(1)	P3(1)	----	P14(1)	P15(1)	U1(1) U2(1)
2	P1(2)	P2(1)	P3(1)	----	P14(2)	P15(2)	U1(2) U2(2)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
24	P1(24)	P2(24)	P3(24)	----	P14(24)	P15(24)	U1(24) U2(24)

그림 1. 유전알고리즘을 위한 염색체 구성

### 2.3 개선된 유전알고리즘

본 논문에서 사용된 유전알고리즘은 국부적인 해의 탐색 기능을 강화하기 위해 엘리트즘(Elitism)을 개선한 격세엘리트즘과, 개체다양성을 증가시켜서 전역적인 해의 탐색을 강화시키는 격세유전을 도입하였다(6). 그림 2는 격세엘리트즘과 격세유전의 순서도를 나타내고 있다.

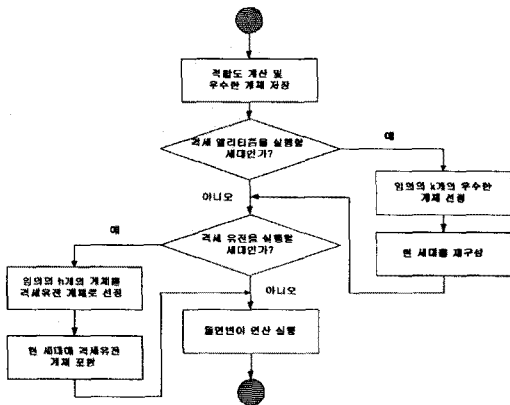


그림 2. 격세엘리트즘과 격세유전의 순서도

교배연산은 유전알고리즘의 탐색과정에서 중요한 요소로 작용한다. 본 논문에서는 기존의 1점교배나 2점교배보다 수렴속도가 빠른 일정교배(Uniform crossover)(7)를 사용하였다. 일정교배는 임의로 발생시킨 마스크에 따라 교배를 수행하는 방법으로 그림 3에 나타내었다. 그리고, 돌연변이는 상하한 제약조건을 만족시키는 것을 용이하게 하기 위해 반사값(mirror image)을 사용하였다.

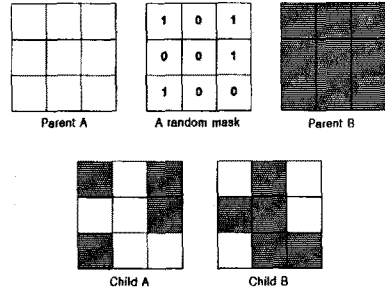


그림 3. 일정교배(Uniform Crossover)

### 3. 사례연구 및 결과

본 논문에서는 참고문헌(4)에 제시된 일일 부하 데이터와 전지전력저장시스템을 가지는 배전계통을 상정하여 최적발전계획을 수립하였다. 각 발전기의 열 비용(heat-rate)함수의 계수와 최대 및 최소 출력이 표 1에 나타나 있는데, 상수  $a, b, c$ 는 식(4)에 보여진 열 비용함수의 계수이며, 15대의 발전기들은 부하를 가장 경제적으로 만족시켜야 한다.

표 1. 실험 대상 발전기의 데이터

Gen.	a	b	c	Minimum Loading (MW)	Maximum Loading (MW)
1	0.00028	8.1	550	0	680
2	0.00028	8.1	550	0	680
3	0.00028	8.1	550	0	680
4	0.00056	8.1	309	0	360
5	0.00056	8.1	307	0	360
6	0.00324	7.74	240	60	180
7	0.00324	7.74	240	60	180
8	0.00324	7.74	240	60	180
9	0.00324	7.74	240	60	180
10	0.00324	7.74	240	60	180
11	0.00324	7.74	240	60	180
12	0.00284	8.6	126	40	120
13	0.00284	8.6	126	40	120
14	0.00284	8.6	126	55	120
15	0.00284	8.6	126	55	120

실험은 먼저 표 2와 같은 일일 부하를 갖는 배전계통에 대해 제안된 알고리즘을 적용하여 24시간에 대한 경제급전을 수행하였으며, 이를 기존의 수학적 접근법(Equal Lambda Iteration)과 비교하여 해의 우수성을 보였다. 다음으로 표 3과 같은 전지전력저장시스템을 연계하여 계통의 비용을 최소화하는 최적발전계획을 수립하고, 그 결과를 표 4에 나타내었다.

표 2. 실험계통의 24시간 동안의 부하데이터

시간(t)	부하(MW)	시간	부하	시간	부하	시간	부하
1	1800	6	2350	12	2250	18	3850
2	1500	7	2800	13	2200	19	3800
3	1200	8	3150	14	2100	20	3600
4	1050	9	3150	15	2250	21	3200
5	1300	10	3100	16	2950	22	2800
6	1700	11	2800	17	3750	23	2200

표 3. 전지전력저장시스템의 동작 특성

특성	용량 $x_n^{\max}$ (MWh)	최소/최대 방전율 $u_n^{\min} / u_n^{\max}$ (MW)	방전/충전효율 $\eta^d / \eta^c$
전지 시스템 1	2400	-400/400	0.84/0.84
전지 시스템 2	1400	-450/450	0.95/0.95

표 4. 전지전력저장장치가 연계된 경우와 연계되지 않은 경우의 발전 비용

	적용된 알고리즘	비용(\$)
전지전력장치가 연계되어 있지 않을때	Equal Lambda Iteration	602464.0742
	개선된 유전 알고리즘	602610.308736
전지전력장치가 연계되어 있을때	개선된 유전 알고리즘	601802.542633

표 4에서 전지전력장치가 연계되어 있지 않을 때, 본 논문에서 제안한 개선된 유전 알고리즘과 Equal Lambda Iteration으로 최적화한 비용을 비교해 보면, 146.234516(\$로 다소 차이를 보이고 있다. 하지만 각 시간대별로 살펴보면 1~19(\$의 작은 차이를 가지고 있으므로, 이 경우에 도출된 해는 기존의 수학적 접근법에 의해 구해진 해석적인 해에 근접함을 볼 수 있다.

또한 이러한 계통에 전지전력저장시스템을 연계하여 최적발전계획을 수립한 경우, 표 4를 통해 그 비용이 807.766103(\$만큼 절감됨을 알 수 있다. 이에 대해, 그림 4에서는 최적화되지 않았을 때와 최적화되었을 때의 발전량을 비교하여 나타내었으며, 그림 5에서는 그때의 전지시스템의 저장전력의 최적 변화를 나타내었다.

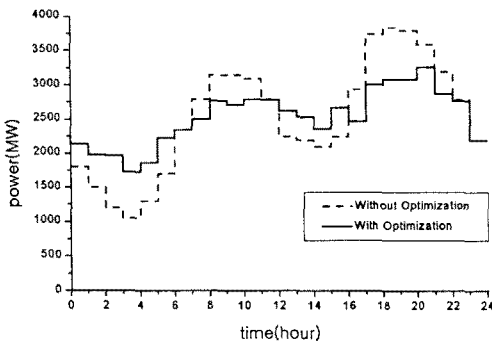


그림 4. 최적화되지 않은 발전계획과 최적화된 발전계획의 비교

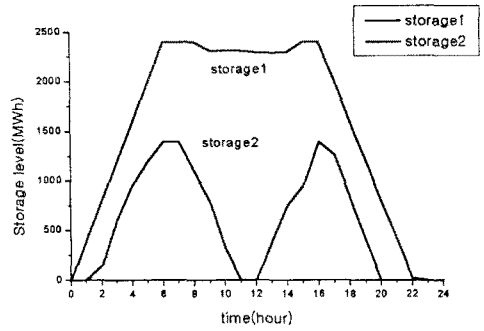


그림 5. 전지전력저장시스템의 저장전력의 최적 변화

#### 4. 결 론

본 논문에서는 분산형전원의 한 종류인 전지전력저장시스템이 연계된 배전계통을 상정하고, 경제급전과 단기 발전계획과정에 전지시스템을 결합하였다. 격세엘리티즘과 격세유전을 도입하여 개선된 유전알고리즘을 적용하여 최적화된 시간대별 발전량과 전지시스템의 저장전력량을 결정하였으며, 그 결과 상당한 비용의 절감을 나타내었다. 따라서 본 논문에서는 분산형전원이 연계된 간단한 전력계통에 대한 최적화를 통해 최적의 경제적 발전계획을 제시하고 있다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] H. Kirkham and J. Klein, "Dispersed Storage and Generation Impacts on energy management systems", IEEE Trans. Power Apparatus and System, vol. PAS-102, no. 2, pp. 339-345, Feb. 1983
- [2] L. Lamarre, "The Vision of Distributed Generation", EPRI Journal, pp. 6-17, April/March 1993
- [3] A. Bose and P. M. Anderson, "Impact of new energy technologies on generation scheduling", IEEE Trans. Power Apparatus and System, vol. PAS-103, no. 1, pp. 66-71, Jan. 1984
- [4] Iain F. MacGill and R. John Kaye, "Decentralised coordination of power system operation using dual evolutionary programming", IEEE Trans. Power Systems, vol. 14, no. 1, pp. 112-119, Feb. 1999
- [5] N. Hadjsaid, J. F. Canard and F. Dumas, "Dispersed Generation Impact on distribution Networks", IEEE Computer Applications in Power, pp. 22-28, April 1999
- [6] 박종남, 박경원, 김지홍, 김진오, "Valve Point 효과가 고려된 경제급전에서의 유전알고리즘 응용", 대한전기학회논문지, 제 48A권, 제 3호, pp. 203-211, 1999. 3
- [7] Po-Hung Chen and Hong-Chan Chang, "Genetic aided scheduling of hydraulically coupled plants in hydro-thermal coordination", IEEE Trans. Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 975-981, May 1996