

## 가변효율을 가진 열병합발전시스템에서 유전알고리즘을 적용한 최적운전계획 수립

박성훈 · 정창호 · 이종범  
(원광대)

### Optimal Operation Scheduling using Genetic Algorithms on Cogeneration Systems with Variable Efficiency

Seong-Hun Park · Chang-Ho Jung · Jong-Beom Lee  
Wonkwang University

**Abstract** - This paper describes the optimal operation scheduling technique using genetic algorithms on cogeneration systems with variable efficiency in case of bottoming cycle. Variable efficiency included nonlinear behavior is obtained by least square method based on the real data of industrial cogeneration systems. Genetic algorithms is coded as a vector of floating point numbers. The results of simulation are evaluated that the genetic algorithms can be applied to perform the operation scheduling.

#### 1. 서론

열병합발전시스템은 열에너지와 전기에너지를 동시에 사용할 수 있는 시스템이며 소규모 분산배치방식으로서 에너지 이용효율이 높은 발전시스템이다. 그러나 열병합발전시스템은 열과 전기를 모두 효과적으로 제어하여야 하는 어려움이 있다. 또한, 높은 이용효율을 가진 시스템이지만 열과 전기에 따라 그 효율이 비선형적인 성질을 가지고 있어 운전계획을 수립하는데 많은 제약을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 산업체의 열병합발전시스템이 효율적으로 운전될 수 있도록 하기 위해 비선형 요소를 가진 효율을 열병합발전시스템에서 유전알고리즘(Genetic Algorithms)을 이용하여 최적운전계획을 수립하였다.

#### 2. 가변효율을 가진 열병합발전시스템의 모델링

##### 2.1 열병합발전시스템의 모델링

그림 1은 열병합발전시스템의 에너지 흐름도를 나타낸 것으로 그림에서 표시된 번호는 에너지가 흐르는 선로의 번호를 나타낸 것이다.

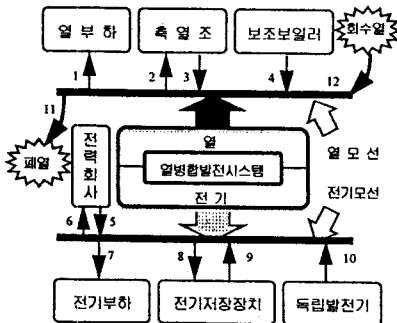


그림 1. 열병합발전시스템의 에너지 흐름도  
각종 보조설비들을 가진 열병합발전시스템의 모델링을 위해 사용된 기호를 표 1과 같이 정의하였다.

표 1. 모델링을 위해 사용된 기호

$\gamma$	: 전력회사와 산업체 사이의 송전효율 [P.U.]
$N$	: 계산구간의 총수
$Y_{kj}$	: k선로에서의 j계산구간 동안의 에너지흐름 [MW]
$\mu_E$	: 전기저장장치 단위시간당 전기저장 손실률 [P.U.]
$\mu_T$	: 축열조의 단위 시간당 열저장 손실률 [P.U.]
$\eta_{ci}$	: 열병합발전시스템의 가변효율 [P.U.]
$F_c$	: 열병합발전시스템의 연료단가 [원/MWh]
$SE_L$	: 열병합발전시스템의 최소 열전비 [P.U.]
$SE_H$	: 열병합발전시스템의 최대 열전비 [P.U.]
$ES_L$	: 전기저장장치 최소 에너지 저장량 [MWh]
$ES_H$	: 전기저장장치 최대 에너지 저장량 [MWh]
$ES_j$	: 전기저장장치 j 구간말기 에너지 저장량 [MWh]
$TS_j$	: 축열조의 j 구간 말기 에너지 저장량 [MWh]
$IG_H$	: 독립발전기 최대출력 [MW]
$AG_H$	: 보조보일러 최대출력 [MW]
$F_{gr}, F_a$	: 독립발전기, 보조보일러 연료단가 [원/MWh]
$TIME$	: 계산구간의 시간대수
$BUY_j$	: 전력회사로부터 구매하는 전기의 단가 [원/MWh]
$SELL_j$	: 전력회사에 판매하는 전기의 단가 [원/MWh]
$COE_L$	: 열병합발전시스템의 최소 전기출력 [MW]
$COE_H$	: 열병합발전시스템의 최대 전기출력 [MW]
$COT_L$	: 열병합발전시스템의 최소 열출력 [MW]
$COT_H$	: 열병합발전시스템의 최대 열출력 [MW]
$ES_{CHG}$	: 전기저장장치 내부전지 최대 충전율 [MW]
$ES_{DSC}$	: 전기저장장치 내부전지 최대 방전율 [MW]
$ES_{g-CHG}$	: 전기저장장치 충전효율 [P.U.]
$ES_{g-DSC}$	: 전기저장장치 방전효율 [P.U.]
$\delta_j - \delta_k$	: 송전선(1, 2, 3, 4선로) 열전송 효율 [P.U.]
$TS_L, TS_H$	: 축열조의 최소, 최대 에너지저장량 [MWh]
$\eta_g, \eta_a$	: 독립발전기, 보조보일러 효율 [P.U.]
$\eta_{wr}, \eta_{rt}$	: 폐열상수, 회수열상수

목적함수로는 열병합발전시스템과 보조설비에서 사용되는 연료비용, 전기의 판매 및 구매비용 등의 합을 최소화시키는 것으로 하였으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

#### 목적함수

$$\begin{aligned} \text{MIN} \sum_{j=1}^N [ & ((BUY_j \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot Y_{kj} - SELL_j \cdot \gamma \cdot Y_{kj}) \\ & + (F_c \cdot \frac{1}{\eta_{ci}} \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{10j} - Y_{12j})) \\ & + (F_g \cdot \frac{1}{\eta_g} \cdot Y_{10j} + F_a \cdot \frac{1}{\eta_a} \cdot Y_{kj})) \cdot \text{TIME} ] \end{aligned} \quad (1)$$

#### 가변효율

$$\begin{aligned} \eta_{ci} = & ( 50 + 0.0083 Y_{1j} - 0.00000029 Y_{1j}^2 + 0.9 Y_{1j} \\ & - 0.0038 Y_{1j}^2 ) / 100 \end{aligned} \quad (2)$$

#### 제약조건

(에너지 방향계약)

$$Y_{kj} \geq 0 \quad (3)$$

(열병합발전시스템의 열출력 상한한 제약)

$$COT_L \leq (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq COT_H \quad (4)$$

( 열병합발전시스템의 전기출력의 상한 제약 )

$$(-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \leq SE_H \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \quad (5)$$

$$SE_L \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \quad (6)$$

( 독립발전기의 전기출력 과 모조보일러의 열출력 상한 제약 )

$$Y_{10j} \leq IG_H, (Y_{4j} / \delta_4) \leq AB_H \quad (7), (8)$$

( 전기저장장치 내부전지의 최대 충.방전 제약 )

$$Y_{8j} \leq (ES_{CHG} / ES_{E-CHG}), Y_{9j} \leq (ES_{ISC} \cdot ES_{E-ISC}) \quad (9), (10)$$

( 전기저장장치 에너지저장량 상한 제약 )

$$ES_L \leq (Y_{8j} \cdot ES_{E-CHG} - Y_{9j} / ES_{E-ISC}) \cdot TIME + ES_{j-1} \cdot (1 - \mu_T)^{TIME} \leq ES_H \quad (11)$$

( 축열조 에너지의 저장량 상한 제약 )

$$TS_L \leq (Y_{2j} \cdot \delta_2 - Y_{3j} / \delta_3) \cdot TIME + TS_{j-1} \cdot (1 - \mu_T)^{TIME} \leq TS_H \quad (12)$$

( 전기부하 제약과 열부하 제약 )

$$Y_{1j} = \text{전기부하}_j, Y_{11j} \cdot \delta_1 = \text{열부하}_j \quad (13), (14)$$

( 패열 제약과 회수열 제약 )

$$(Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} - Y_{12j}) \cdot \eta_m - Y_{11j} \leq 0 \quad (15)$$

$$(Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j}) \cdot \eta_n - Y_{12j} \leq 0 \quad (16)$$

## 2.1 가변효율

열병합발전시스템의 효율은 전기출력과 열부하에 따라 유동적이므로 본 논문에서는 실제 운전중인 열병합발전소의 운전 데이터를 분석하여 열부하와 전기출력의 변화에 따라 보다 정확한 효율식을 얻어내기 위해 다중회귀곡선식을 유도하였다.

변수의 개수가 n개일때 회귀평면에서의 값을 z라 하면 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{z}_i = a + bx_i + cy_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

또한,

$$S = \sum_{i=0}^n (z_i - \hat{z}_i)^2 = \sum_{i=0}^n [z_i - (a + bx_i + cy_i)]^2 \quad (18)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

식 (18)이 최소가 되도록 최소자승법을 이용하여 각각의 상수 값을 구할 수 있다. 따라서 S를 최소로 하는 a, b, c는  $\partial S / \partial a = 0, \partial S / \partial b = 0, \partial S / \partial c = 0$ 의 근이므로 이러한 최소화 과정을 통하여 식 (19)와 같은 정규방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} na + b \sum_{i=1}^n x_i + c \sum_{i=1}^n y_i &= \sum_{i=1}^n z_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i y_i &= \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ a \sum_{i=1}^n y_i + b \sum_{i=1}^n x_i y_i + c \sum_{i=1}^n y_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i z_i \end{aligned} \quad (19)$$

따라서, 본 논문에서는 x, y의 값들에 따른 z의 방정식이 꼭 회귀평면에서만 생각할 수 없기 때문에 가능할 수 있는 6개의 방정식을 선정하고 최소자승오차가 가장 작은 z의 방정식을 유도하였다. 이 때 선정된 6개의 방정식의 형태는 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} (a) z &= a + bx + cy \\ (b) z &= a + bx^{-1} + cy^{-1} \\ (c) z &= a + bx + cx^2 + dy + ey^2 \\ (d) z &= a + bx^{-1} + cx^{-2} + dy^{-1} + ey^{-2} \\ (e) z &= a + bx + cx^2 + dx^3 + ey + fy^2 + gy^3 \\ (f) z &= a + bx^{-1} + cx^{-2} + dx^{-3} + ey^{-1} + fy^{-2} + gy^{-3} \end{aligned} \quad (19)$$

최소자승오차가 가장 작은 경우는 사례연구에서 언급하겠지만, 식 (c)에 해당되는 방정식이었다. 따라서 이 식을 본 논문에서 효율을 표현하는 방정식으로 사용하였으며 변수 z는 효율, x는 전기출력, y는 열부하를 나타내고 있다.

## 3. 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms)은 주어진 탐색공간을 확률적인 방법을 사용하여 그 정보를 근거로 최적해를 탐색하는 알고리즘으로 단순히 확률적 탐색방법과는 구별된다. 그 특징으로는 주어진 영역에서 랜덤하게 파라미터 집합을 부호화 하여 단일점이 아닌 해집단에서 전역적으로 탐색을 하며 확률적 규칙을 사용하고, 단지 목적함수(Objective function)의 정보만을 사용한다.<sup>[3]</sup> 또한, GAs는 2진수의 경우 다변수와 높은 정밀도를 요구할 경우 많은 스트링 길이와 적합도 계산시 많은 시간이 필요하므로 본 논문에서는 코딩시간의 감소와 정확성을 갖는 실변수 벡터 스트링(Real valuable vector string)을 사용하였다.

### 3.1 실변수 연산자(Real valuable vector operators)

실변수 영역 R<sup>n</sup>의 n차원 탐색영역에서 실변수 벡터 스트링(Real valuable vector string)을 개체로 코딩한다.

[1]복제(Reproduction) : 전 세대에 구해진 적합도를 바탕으로 룰렛휠에 의해 복제할 개체를 선택하며 적합도가 클수록 다음 세대에 복제될 확률이 크다.

[2]교차(Crossover) : 두 벡터의 선형조합으로 정의될 수 있는데 복제된 개체들 가운데 교차 확률에 따라 교차를 한다. 식 (21)은 whole arithmetical crossover이며 a는 0과 1사이의 난수이다.

$$\begin{aligned} S'_a &= (v_1, \dots, v_n) \Rightarrow S'^{a+1} = a \cdot S'_a + (1-a) \cdot S''_a \\ S''_a &= (w_1, \dots, w_n) \Rightarrow S''^{a+1} = a \cdot S''_a + (1-a) \cdot S'_a \end{aligned} \quad (21)$$

[3]돌연변이(Mutation) : 국부적 최적점으로 수렴을 방지하기 위해서 적합도에 관계없이 돌연변이 확률만큼 개체 안에서 임의로 변형한다. 식 (22)는 non-uniform 돌연변이이다.

$$S'_a = (v_1, \dots, v_k, \dots, v_n) \Rightarrow S'^{a+1} = (v_1, \dots, v_k', \dots, v_n) \quad (22)$$

범위는  $v_k < v_k' < v_k$  이다.

## 4. 유전알고리즘의 적용

먼저 GAs의 적용을 위하여 목적함수 식 (1)이 열병합발전시스템의 제약조건식 (식 3 ~ 식 15)이 포함된 식 (23)과 같은 형태로 변형한다.

$$\text{Min } P = \sum_{j=1}^N F_j(X) + \mu \sum_{j=1}^N \max \{ 0.0, \alpha(X) \}^2 \quad (23)$$

$F_j$ 는 목적함수,  $X$ 는 실변수 행 벡터,  $\alpha(X)$ 는 제약조건이며,  $\mu$ 는 penalty 계수로서 세대가 증가함에 따라  $\infty$ 로 증가한다. 또한, 목적함수의 최소화 문제는 적합도 최대화 문제로 식 (24)와 같이 변형하며, 만약 제약조건을 만족한다면 적합도는 최대화가 되어 다음세대에 선택될 확률이 높아진다. GAs를 적용한 순서도는 그림 2에 나타내었다.

$$\text{Fitness} = \frac{1}{P} \quad (24)$$

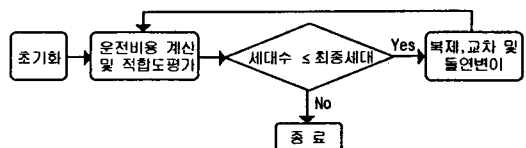


그림 2. 유전알고리즘의 적용 순서도

### 5. 사례연구

최적운전계획의 수립을 위한 사례연구는 c언어로 작성하여 SUN SPARC station 5에서 실행하였으며, 입력자료는 표 2와 같다.

표 2. 기본 입력자료(1시간대는 3시간)

시간대	1	2	3	4	5	6	7	8	
전력요금 [원/MWh]	BUY, SELL	100	100	100	200	200	200	150	100
COE <sub>H</sub>	25	ES <sub>H</sub>	5	TS <sub>L</sub>	1	F <sub>a</sub>	80	F <sub>c</sub>	80
COE <sub>L</sub>	5	AB <sub>H</sub>	5	ES <sub>L</sub>	1	F <sub>g</sub>	80	r	0.99
TS <sub>H</sub>	6	SE <sub>H</sub>	1.3	ES <sub>0</sub>	1	μ <sub>R</sub>	0.05	δ <sub>1</sub>	0.98
γ <sub>a</sub>	0.7	SE <sub>L</sub>	0.8	TS <sub>0</sub>	1	μ <sub>T</sub>	0.05	δ <sub>2</sub>	1
γ <sub>g</sub>	0.4	IG <sub>H</sub>	5	γ <sub>it</sub>	0.1	γ <sub>nc</sub>	0.3	δ <sub>3</sub>	1

#### 5.1 가변효율

먼저 가변효율을 고려하기 위해 실제의 열병합발전시스템의 운전 데이터를 이용하여 식 (20)식에 대해 최소화오차를 구해 본 결과는 표 3과 같았다.

표 3. 최소화오차 비교

방정식	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
최소자승오차	33,545	5,092	3,424	5,006	36,261	3,524

따라서 최소화오차가 가장 작은 식 (c)를 효율방정식으로 선택하였으며 방정식 계수 a~e는 식 (1)에서 이미 나타냈다.

그림 3은 식 (2)에 의해 가변되는 실제 열병합발전시스템의 효율을 나타낸 것으로 1주일 동안의 데이터를 그린 것이다. 그림에서 열부하가 적은 심야에는 효율이 낮으며 1주일 간격으로 주말에도 효율이 낮아짐을 알 수 있다. 그림 4는 시뮬레이션 후 최종세대에서 각 시간대별 효율의 변화를 간단하게 나타내었다.

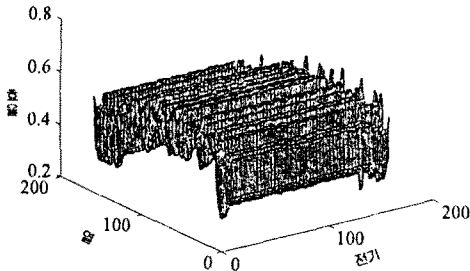


그림 3. 실제 열병합발전소의 효율변화

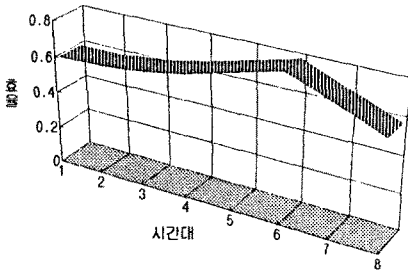


그림 4. 각 시간대별 효율의 변화

#### 5.2 유전알고리즘

유전알고리즘 적용을 위해 개체수는 500을 설정하였고, 교차 확률 Pc는 0.6, 그리고 돌연변이 확률 Pm은 0.03으로 설정하여 1000세대를 반복하였으며 시뮬레이션 시간은 9분 45초가 소요되었다. 그림 5는 세대가 증가함에 따른 목적함수의 운전비가 점차적으로 감소하고 있음을 알 수 있고, 그림 6은 각 세대의 최대 적합도와 평균 및 표준편차를 나타낸 것으로 세대가 증가함에 따라 최대적합도가 증가함을 알 수 있다.

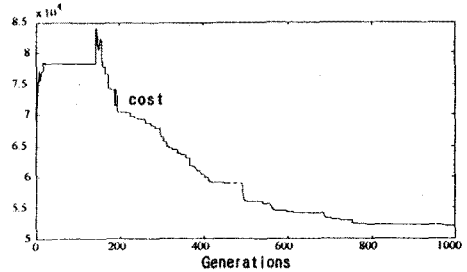


그림 5. 세대수의 증가에 따른 운전 비용의 감소

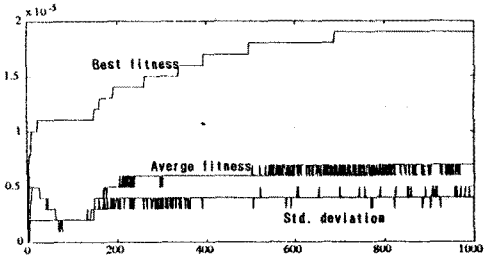


그림 6. 적합도, 평균치, 그리고 표준편차

1,000세대를 반복한 후 수립된 열병합발전시스템의 운전계획을 각 시간대 별로 각종 보조설비들이 충분히 활용되도록 수립되었고, 지면상 열생산 계획만을 그림 7에 나타내었다.

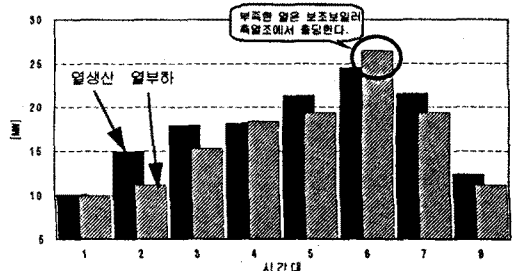


그림 7. 열생산 계획

### 6. 결론

본 연구에서는 가변효율을 가진 열병합발전시스템의 최적운전계획 수립에 전역적 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가변효율을 가진 열병합발전시스템에서 유전알고리즘을 적용하여 최적운전계획 수립이 가능함을 확인하였다.
- (2) 전기출력과 열부하에 따라 유동적인 효율을 현장성 있게 운전계획수립에 적용하였으며 복잡하고 많은 제약을 가진 최적화에 유전알고리즘을 적용하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. B. Puttgen and et al., "Optimum Scheduling Procedure for Cogenerating Small Power Producing Facilities", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 3, pp. 957-964, Aug. 1989.
- [2] 이종범, 정창호, "각종 보조설비와 연계된 열병합발전시스템에서 퍼지이론을 적용한 단기운전계획 수립", 대한전기학회 논문지, 제 44권 제9호, pp. 1119-1125, 1995. 9.
- [3] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley, 1989
- [4] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithm + Data Structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992