

복합화력발전설비와 지역난방설비가 연계된 종합열병합발전시스템의 일간 최적운전계획 수립

정지훈* 이종범
삼천리 에너지사업팀*, 원광대학교

A Daily Optimal Operation Scheduling of Total Cogeneration System Operating by Combined Heat Power Plant and District Heat Devices

Ji-Hoon Jung* Jong-Beom Lee
Samchully Energy* Wonkwang University

Abstract - This paper describes the optimal operation scheduling of total cogeneration system which is interconnected with combined heat power plant of utility and district heat devices. The numerical modeling about the cogeneration system and the auxiliary thermal energy devices are established and simulation is carried out by LINDO program in order to minimize the operation cost under the national viewpoint. The results reveal that the established numerical modeling and the operation strategy can be effectively applied to the total cogeneration systems to reduce the energy cost.

1. 서론

복합화력발전이란 열효율 향상을 위해 두 종류의 열 사이클을 조합하여 발전하는 방식으로 가스터빈에서 전기를 생산하고 나온 고온 고압의 배기가스를 대기로 방출시키지 않고 이를 배열회수보일러에서 회수하여 고온 고압의 증기를 발생시켜 증기터빈을 운전시키는 방식이다.

현재까지 열병합발전시스템에 관한 연구를 보면 증기터빈 방식의 산업체 열병합발전시스템의 모델링이나 운전 최적화 방법에 관한 연구가 주를 이루며, 가스터빈 방식의 열병합발전시스템의 경우 지역난방 도입을 고려한 경제적 타당성연구 및 용량 선정 등에 관한 연구에 국한되어 있다[1]-[5].

본 논문에서는 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클이 결합하여 하나의 발전설비로 운전하는 전력회사 소유의 복합화력발전설비와 보조보일러, 소각로, 축열조로 이루어진 난방공사 소유의 지역난방설비가 함께 연계되어 운전되고 있는 종합열병합발전시스템에서 국가적인 관점에서 에너지 비용이 가장 적게드는 최적운전계획을 수립하였다. 최적운전계획의 수립을 위해서 복합화력발전설비와 지역난방설비의 수리모델을 수립하였으며, 이를 바탕으로 선형계획법용 소프트웨어인 LINDO를 이용하여 동계 일간 최적운전계획을 수립하였다[6]. 수립된 수리모델은 복합화력발전 설비의 기본적인 수리모델로 활용할 수 있으며, 제시된 운전계획 결과는 국가적인 측면에서 에너지 이용효율을 높이는 데 유용할 것으로 사료된다.

2. 수리모델 수립

2.1 모델 개요

본 논문에서는 그림 1과 같이 전력회사 소유의 A 복합화력발전설비와 난방공사 소유의 보조보일러, 소각로, 폐열보일러가 함께 연계되어 운전하여 열에너지와 전기에너지를 생산하는 실제 운전중인 종합열병합발전시스템을 대상으로 하였다. 여기에서 선은 에너지의 흐름을 나타낸 것이며 화살표는 에너지가 흐르는 방향을 나타내고 있다.

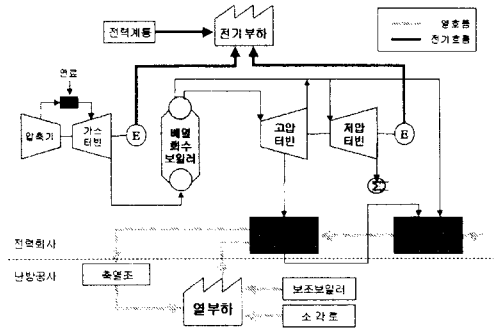


그림 1. 종합열병합발전시스템의 에너지흐름도

복합화력발전설비의 가스터빈 사이클에서 전기를 생산하고 배출되는 배기가스를 배열회수보일러에서 회수되어 고압증기와 저압증기를 생산한다. 생산된 저압증기는 저압터빈에서 전기를 생산하거나 1차 가열기에서 열교환을 통해 열에너지를 생산한다. 한편 고압증기는 고압터빈과 저압터빈을 거치면서 전기를 생산하고 그중 일부를 추가하여 2차 가열기와 1차 가열기에서 열교환을 통해 열에너지를 생산한다. 생산된 열에너지는 난방공사에 전량 판매한다.

한편 난방공사에서는 복합화력발전소에서 열에너지를 구매한 후 열배관망을 이용하여 열부하에 공급하고 있다. 여기에서 대부분의 열에너지는 복합화력발전소에서 난방공사의 열배관망을 통해 곧바로 열부하로 공급되지만, 일부의 열에너지는 먼저 축열조에 저장해 두었다가 필요시에 열부하에 공급된다. 또한 보조열원설비인 보조보일러와 소각로에서 열에너지를 생산하여 열부하에 공급한다.

한편, 전력계통으로부터의 전력과 열병합발전시스템의 가스터빈과 증기터빈에서 생산된 전기는 송전선로를 통하여 전기부하에 공급된다.

2.2 목적함수 수립

종합열병합발전시스템의 최적운전계획을 세우기 위하여 식 (1)과 같이 전력계통으로부터 한계발전비용을 고려한 전기에너지 비용과 열병합발전시스템, 보조보일러, 소각로의 운전비용의 합이 최소가 되는 것을 목적함수로 하였다.

$$\min C_{cost} = \sum_{k=1}^N [C_{ut}(k) + C_{co}(k) + C_{ab}(k) + C_{st}(k)] \quad (1)$$

2.2.1 전력계통으로부터의 전기에너지 비용

전력계통으로부터의 한계발전비용을 고려한 전기에너지 비용은 식 (2)와 같이 전력계통에서 전기부하로 공급되는 공급전

력과 한계발전비용의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$C_{ur}(k) = E_{ur}(k) \cdot F_{ur}(k) \quad (2)$$

2.2.2 열병합발전시스템의 운전비용

열병합발전시스템의 운전비용은 가스터빈을 운전하는데 필요한 연료비용으로 나타낼 수 있으며 이는 배기가스를 생산하는데 드는 연료비용으로 나타낼 수 있다. 따라서 열병합발전시스템의 배기가스와 연료량의 실제 운전데이터를 이용하여 최소자승법을 이용하여 식 (3)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$C_{co}(k) = a_1 + b_1 \cdot H_{gas}(k) \quad (3)$$

2.2.3 보조보일러 운전비용

보조보일러의 운전비용은 일정한 온도와 압력의 증기를 생산하는데 필요한 연료비용으로 나타낼 수 있다. 보조보일러 출구의 증기가 보유하고 있는 열량은 보조보일러 입출구 엔탈피의 차와 발생 증기량의 곱으로 나타낼 수 있으며 이를 연료의 저위 발열량으로 나누면 증기를 생산하는데 필요한 연료량을 얻을 수 있다. 따라서 보조보일러의 운전비용은 보조보일러 효율과 연료단가를 고려하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ab}(k) = \frac{H_{ab}(k) \cdot (h_{abo} - h_{abm})}{LHV \cdot \eta_{ab}} \cdot F_{ab} \quad (4)$$

여기서 보조보일러에 사용되는 연료는 LSWR(저유황등유)이다.

2.2.4 소각로 운전비용

소각로 운전비용은 열병합발전시스템의 운전비용과 같은 방법으로 실제 운전데이터를 바탕으로 최소자승법을 이용하여 식 (5)와 같이 구하였다.

$$C_{ur}(k) = a_2 + b_2 \cdot H_{ur}(k) \quad (5)$$

2.3 제약조건 수립

목적함수와 함께 최적운전계획을 수립하기 위하여 등호제약과 부등호제약을 수립하였다.

2.3.1 전기에너지 제약

전기부하는 식 (6)과 같이 전력계통으로부터의 전력과 열병합발전시스템의 가스터빈과 증기터빈에서 생산된 전기에너지의 합으로 나타낼 수 있다. 가스터빈이 연속적으로 작동하기 위해서는 터빈에서 생산된 에너지의 상당량이 압축기에서 소비된다. 즉 가스터빈의 전기출력은 터빈에서 생산한 전기에너지 가운데 압축기에서 쓰이는 전기에너지의 비율을 나타내는 자가 소모일의 비율(Backwork Ratio)과 가스터빈 효율을 고려하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 한편 증기터빈에서의 전기출력은 식 (8)과 같이 고압터빈에서 생산된 전기에너지와 저압터빈에서 생산된 전기에너지의 합으로 나타낼 수 있다.

$$E_{load}(k) = E_{ur}(k) + E_{gas}(k) + E_{st}(k) \quad (6)$$

$$E_{gas}(k) = c_p \cdot H_{gas}(k) \cdot (T_{out} - T_{in}) \cdot \eta_{BWR} \cdot \frac{1}{860} \quad (7)$$

$$E_{st}(k) = [(H_{DH2}(k)(h_{HPin} - h_{em}) + H_{BP}(k)(h_{HPin} - h_{HPo}))\eta_{HP} + H_{LP}(k) \cdot (h_{LPin} - h_{LPo})\eta_{LP}] \cdot \frac{1}{860} \quad (8)$$

여기서, 전기출력은 식 (9)와 식 (10)과 같은 상·하한 제약을 갖는다.

$$E_{gas}^{\min} \leq E_{gas}(k) \leq E_{gas}^{\max} \quad (9)$$

$$E_{st}^{\min} \leq E_{st}(k) \leq E_{st}^{\max} \quad (10)$$

2.3.2 열에너지 제약

난방공사에서 수용가에 보내는 열에너지는 수용가에서 요구되는 열부하를 만족시켜야 된다. 따라서 열부하는 식 (11)과 같이 열병합발전시스템에서 직접 열부하로 공급되는 열에너지와 축열조의 열출력, 보조보일러 및 소각로의 열출력의 합으로 나타낼 수 있다.

$$H_{load} = H_L(k) + H_{stab}(k) + (h_{abw2} - h_{abw1})H_{abDS}(k) + (h_{w2} - h_{w1})H_{wIDS}(k) \quad (11)$$

배기가스를 배열회수보일러에서 회수하여 생산되는 고압증기와 저압증기는 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$H_{HD}(k) = \alpha \cdot H_{gas}(k) \quad (12)$$

$$H_{LD}(k) = \beta \cdot H_{gas}(k) \quad (13)$$

$$H_{HD}(k) = H_{DH2}(k) + H_{BP}(k) \quad (14)$$

$$H_{LD}(k) = H_{LP}(k) - H_{BP}(k) + H_{DH1}(k) \quad (15)$$

여기서, 배기가스는 식 (16)과 같은 상하한 제약을 갖는다.

$$H_{gas}^{\min}(k) \leq H_{gas}(k) \leq H_{gas}^{\max}(k) \quad (16)$$

배열회수보일러에서 생산된 증기는 열교환기를 가열하여 에 의해 지역난방에서 회수한 온수를 일정 온도의 열에너지를 생산한다. 생산된 열에너지는 직접 열부하에 공급하거나 축열조에 축열한다.

$$(h_{w2} - h_{w1})H_{DS}(k) \cdot \eta_{DH1} = (h_{st} - h_{2})H_{DH2}(k) + (h_{st} - h_{2})H_{DH1}(k) \quad (17)$$

$$(h_{w3} - h_{w2})H_{DS}(k) \cdot \eta_{DH1} = (h_{3} - h_{st})H_{DH2}(k) \quad (18)$$

$$(h_{w3} - h_{w1})H_{DS}(k) = H_{stin}(k) + H_L(k) \quad (19)$$

2.3.3 축열조 열출력 제약

시간구간 k 말기에 축열조에 저장된 열에너지는 다음 식으로 표현된다.

$$H_{st}(k) = H_{st}(k-1) + \left[\eta_{stg}H_{stin}(k) - \frac{H_{stout}(k)}{\eta_{rd}} \right] \quad (20)$$

여기서, 축열조의 단위시간당 열에너지 저장량, 축열 가능량, 방열가능량의 상하한 제약조건은 다음과 같다.

$$H_{st}^{\min} \leq H_{st}(k) \leq H_{st}^{\max} \quad (21)$$

$$H_{stin} \leq \eta_{stin} \cdot H_{stin}(k) \leq H_{stin}^{\max} \quad (22)$$

$$H_{stout}^{\min} \leq \frac{H_{stout}(k)}{\eta_{stout}} \leq H_{stout}^{\max} \quad (23)$$

2.3.4 보조보일러 열출력 제약

보조보일러에서 생산된 증기는 열교환기에 의해 지역난방에서 회수한 온수를 일정온도의 온수로 가열하게 된다.

$$(h_{ab1} - h_{ab2})H_{ab}(k) = (h_{abw2} - h_{abw1})H_{abDS}(k) \cdot \eta_{hab} \quad (24)$$

보조보일러의 열출력 상하한 제약조건은 식 (25)와 같다.

$$H_{ab}^{\min} \leq (h_{abu2} - h_{abu1})H_{abDS}(k) \leq H_{ab}^{\max} \quad (25)$$

2.3.5 소각로 열출력 제약

소각로에서 생산된 증기는 열교환기에 의해 지역난방에서 회수한 온수를 일정한 온도의 온수로 가열하게 된다.

$$(h_{wsi} - h_{wi2})H_{wi}(k) = (h_{wiu2} - h_{wiu1})H_{wiDS}(k) \cdot \eta_{wi} \quad (26)$$

소각로의 열출력 상하한 제약조건은 식 (27)과 같다.

$$H_{wi}^{\min} \leq (h_{wiu2} - h_{wiu1})H_{wiDS}(k) \leq H_{wi}^{\max} \quad (27)$$

3. 최적운전계획 수립

3.1 기본 입력자료

표 1. 열병합발전시스템 운전데이터 (I)

시간[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
한계 발전비용	45.2	47.0	47.0	46.9	44.5	44.5	46.9	46.9	45.2	46.9	46.9	46.9
전기부하	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
열부하	360	354	357	325	301	551	638	624	502	392	367	338
시간[h]	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
한계 발전비용	50.3	50.3	50.3	50.3	52.7	50.3	50.3	50.3	50.3	50.3	50.3	46.9
전기부하	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
열부하	392	356	338	322	427	538	612	641	625	546	407	359

표 2. 열병합발전시스템의 운전데이터 (II)

h_{HPn}	h_{HPo}	h_{ex}	h_{LPn}	h_{LPo}	h_{abin}	h_{abo}	h_{wl}	h_{u2}
815.5	654.5	669.9	654.5	547.6	134	665.3	65	102.3
h_{u3}	h_{s1}	h_{s2}	h_{s3}	h_{s4}	h_{abs1}	h_{abs2}	h_{abu3}	h_{abu2}
120.5	654.5	137.8	669.9	150	665.3	134	65	120.5
h_{wsi}	h_{wi2}	h_{wiu1}	h_{wiu2}	H_{gas}^{\min}	H_{gas}^{\max}	H_{st}^{\min}	H_{st}^{\max}	H_{sto}^{\min}
665.3	134	65	120.5	0	525.8	0	1600	0
H_{sto}^{\max}	H_{stin}^{\min}	H_{stin}^{\max}	H_{ab}^{\min}	H_{ab}^{\max}	H_{wi}^{\min}	H_{wi}^{\max}	E_{st}^{\min}	E_{st}^{\max}
160	0	160	0	100	0	16	0	200
E_{gas}^{\min}	E_{gas}^{\max}	c_p	LHV	η_{ab}	η_{stg}	η_{rad}	η_{HP}	η_{LP}
0	462	0.24	8670	0.75	0.95	0.95	0.8	0.8
η_{hab}	η_{hwi}	η_{BWR}	a_1	a_2	b_1	b_2	α	β
0.8	0.8	0.45	-38.9	-5.4	8.66	1.82	0.119	0.036
T_{in}	T_{out}	N						
1391	368	24						

본 논문에서는 실제 운전중인 복합화력발전설비와 지역난방 설비를 대상으로 표 1과 표 2와 같은 운전 데이터 및 기본 입력자료를 구성하였으며, 이를 바탕으로 선형계획법용 프로그램인 LINDO를 이용하여 매 시간마다의 운전계획을 수립하였다.

3.2 최적운전계획 결과

그림 2에서 보는바와 같이 열부하가 적은 1~5번 시간대는 열병합발전시스템에서 열출력을 적게 내며 열부하가 큰 6~9 시간대와 18~22시간대에는 열병합발전시스템에서 최대 열출력을 생산하고 모자라는 에너지는 보조열원으로부터 보충하는 것이 바람직한 것으로 나타났다

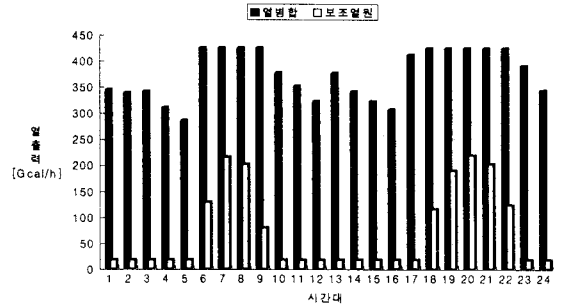


그림 2. 열병합발전설비 및 보조열원설비의 열출력계획

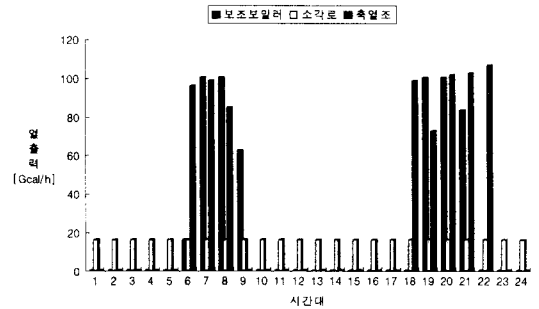


그림 3. 보조열원설비들의 열출력 계획

그림 3은 보조열원설비들의 열출력 계획을 나타낸 것이다. 소각로는 운전비용이 가장 적게 들기 때문에 항상 최대 열출력을 생산하며 열부하가 큰 시간대에는 보조보일러와 축열조를 운전하여 열에너지를 생산한다.

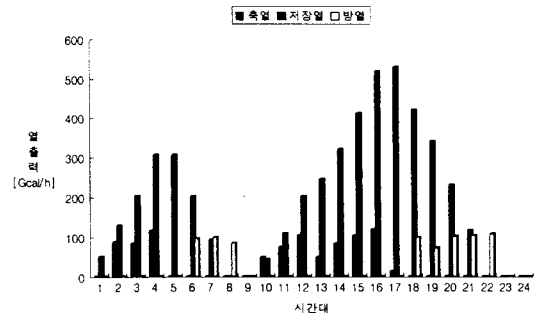


그림 4. 축열조의 축열 및 방열계획 및 열에너지 저장계획

그림 4는 축열조의 축열 및 방열계획을 나타낸 것이다. 열부하가 적은 시간대인 2~4번 시간대와 10~16번 시간대에 축열조에 열에너지를 저장하고 열부하가 큰 시간대인 6~8번 시간대와 18~22시간대에 방열하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 열병합발전시스템의 전기출력 계획을 나타낸 것이다. 열부하가 적은 1번, 5번, 23번, 24번 시간대에는 복합화력발전소의 가스터빈과 증기터빈은 전기출력을 적게 생산하는 대신 전력계통에서 더 많은 전기에너지를 공급하는 것을 알 수 있다.

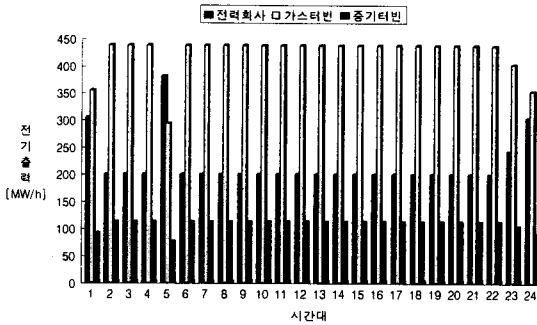


그림 5. 열병합발전시스템의 전기출력계획

4. 결 론

본 논문에서는 복수소유권 열병합발전시스템을 대상으로 최적운전계획을 수립하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- [1] 소유권이 다른 열병합발전시스템과 지역난방설비들이 연계되어 열에너지와 전기에너지를 생산하는 종합 열병합발전시스템을 대상으로 국가적인 관점에서 총 연료비용이 가장 적게드는 일간 최적운전 계획을 수립하였다.
- [2] 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클이 조합하여 발전하는 복합화력발전소의 수리모델을 수립하였다.
- [3] 보조열원설비인 소각로, 보조보일러, 축열조의 수리모델을 수립하였다.
- [3] 열부하의 변화에 따른 축열조의 축열과 방열 계획을 수립하였으며 보조보일러와 소각로의 운전계획을 수립하였다.
- [4] 축열조의 축열 및 방열계획을 수립한 결과 축열조는 침투부하용으로 사용되어야 하며 보조보일러는 비상용으로 사용되어야 타당할 것으로 사료된다.

한편, 본 논문에서 수립된 종합열병합발전시스템의 수리모델은 가스터빈과 증기터빈의 기본적인 수리모델로 사용될 수 있으며 수립된 최적운전계획 결과는 국가적인 차원에서 열에너지를 절약하기 위한 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

[수식기호]

- $E_{ut}(k)$: 전력계통으로부터의 전기에너지 [MW/h]
- $E_{gas}(k)$: 가스터빈의 전기출력 [MW/h]
- $E_{st}(k)$: 증기터빈의 전기출력 [MW/h]
- $H_{gas}(k)$: 가스터빈 사이클에서 생산되는 배기가스 [ton/h]
- $H_{HD}(k)$: 배열회수보일러에서 생산되는 고압증기 [ton/h]
- $H_{LD}(k)$: 배열회수보일러에서 생산되는 저압증기 [ton/h]
- $H_{HP}(k)$: 고압터빈의 출구 증기 [ton/h]
- $H_{LP}(k)$: 저압터빈으로 흐르는 증기 [ton/h]
- $H_{ab}(k)$: 보조보일러에서 생산되는 증기 [ton/h]
- $H_{wi}(k)$: 소각로에서 생산되는 증기 [ton/h]
- $H_{DH1}(k)$: 1차 가열기로 흐르는 증기 [ton/h]
- $H_{DH2}(k)$: 2차 가열기로 흐르는 증기 [ton/h]
- $H_{DS}(k)$: 수용가에서 회수되는 회수열 [ton/h]
- $H_L(k)$: 열병합발전시스템에서 열부하로 공급되는 에너지[Gcal/h]
- $H_{st}(k)$: 축열조에 저장된 열에너지 [Gcal/h]
- $H_{stn}(k)$: 축열조에 축열되는 열에너지 [Gcal/h]
- $H_{stout}(k)$: 축열조에서 방열되는 열에너지 [Gcal/h]
- $H_{gas}^{max}, H_{gas}^{min}$: 배기가스 출력 상·하한 제약 [ton/h]

- $H_{st}^{max}, H_{st}^{min}$: 축열조의 열에너지 저장량 상·하한 제약 [Gcal/h]
- $H_{stn}^{max}, H_{stn}^{min}$: 축열조의 방열 에너지 상·하한제약 [Gcal/h]
- $H_{stn}^{max}, H_{stn}^{min}$: 축열조의 축열 에너지 상·하한제약 [Gcal/h]
- $H_{ab}^{max}, H_{ab}^{min}$: 보조보일러 열출력 상·하한 제약 [Gcal/h]
- $H_{HP}^{max}, H_{HP}^{min}$: 소각로 열출력 상·하한 제약 [Gcal/h]
- $E_{gas}^{max}, E_{gas}^{min}$: 가스터빈의 전기출력 상·하한 제약 [MW/h]
- $E_{st}^{max}, E_{st}^{min}$: 증기터빈의 전기출력 상·하한 제약 [MW/h]
- h_{HPin}, h_{HPo} : 고압터빈 입출구증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{LPin}, h_{LPo} : 저압터빈 입출구증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{abin}, h_{abo} : 보조보일러 입출구증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{w1}, h_{w2} : 1차 가열기 입출구 온수 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{w3} : 2차 가열기 출구 온수 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{s1}, h_{s2} : 1차 가열기 입출구증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{s3}, h_{s4} : 2차 가열기 입출구증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{ex} : 추기증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{absl}, h_{absl2} : 보조보일러 열교환기 입출구 증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{abul}, h_{abul2} : 보조보일러 열교환기 입출구 온수 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{wis1}, h_{wis2} : 소각로 열교환기 입출구 증기 엔탈피 [kcal/kg]
- h_{wiw1}, h_{wiw2} : 소각로 열교환기 입출구 온수 엔탈피 [kcal/kg]
- η_{BWR} : 가스터빈의 자가소모일의 비율
- η_{ab} : 보조보일러 효율
- η_{slg}, η_{rad} : 축열조 축열 및 방열효율
- η_{HP}, η_{LP} : 고압터빈 및 저압터빈 효율
- η_{DH1}, η_{DH2} : 1차 가열기 및 2차 가열기 효율
- η_{hab}, η_{hwi} : 보조보일러 및 소각로의 열교환기 효율
- a_1, a_2, b_1, b_2 : 연료비 계수
- α, β : 고압증기 및 저압증기 출력 계수
- T_{in}, T_{out} : 가스터빈 입출구 온도 [K]
- c_p : 정압비열 [kcal/kg K]
- F_{ut} : 한계발전비용[원/MW]
- F_{ab} : LSWR 연료비 단위[원/kg]
- LHV : LSWR 저위발열량[kcal/kg]
- k : 시간대
- N : 시간구간의 총 수

[참 고 문 헌]

- [1] (주)경원세기, "지역냉난방 시스템 개발에 관한 최종보고서", 통상산업부, 1994
- [2] 에너지관리공단, "집단에너지사업 관계 자료집", 에너지관리공단, pp35-52.
- [3] 신기술, "열병합발전 핸드북"
- [4] 최광범, 정지훈, 이종범, "산업용 열병합발전시스템에서 진화 알고리즘을 이용한 합리적 운전계획 수립에 관한 연구", 대한전기학회 논문집, 제 49권 10호, pp494~501, 2000. 10
- [5] 정지훈, 이종범, 오성근 "서로다른 발전방식으로 운전되는 산업용 열병합발전시스템의 최적운전계획 수립", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권, pp. 354~356, 2000. 7
- [6] Linus Schrage, "LINDO an optimization modeling system", The Scientific Press, 1991