

다양한 종류의 열부하를 가진 다열병합발전시스템의 최적운영계획 수립

정 지훈* 이 종범
원광대학교

Operation Scheduling of Multi-Cogeneration System with Various Thermal Load

Ji-Hoon Jung Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - This paper describes the optimal operation scheduling on cogeneration systems which have thermal loads of different pressure each other. The cogeneration systems has two units and operate connecting with various auxiliary devices as heat storage tanks, independent generators and auxiliary boilers. The optimal modeling and scheduling technique proposed in this paper will be applied to industrial cogeneration systems.

1. 서 론

열병합발전시스템은 하나의 에너지원에서 열에너지와 전기 에너지를 동시에 발생시킬 수 있는 종합에너지시스템이라고 할 수 있다. 따라서 건물과 공단은 물론이고 대단위 주거단지인 아파트단지등에 집단에너지 사업으로도 이용되고 있는 유용한 시스템이다.

이렇게 열병합발전시스템은 종류도 많고 방식도 다양하다. 보통 열병합발전시스템은 투자규모를 한정하고 설비를 투입하여 건설하게 되는데 이와함께 중요한 부분으로서 각 방식과 종류에 따라 다양한 최적운영계획이 수립되는 것이다[1][2].

본 논문에서는 이 가운데 공단에서 실제로 운전중인 산업용 열병합발전시스템을 기초로 하여 모델링하였고 이로부터 최적 운영계획을 수립하였다. 제안한 열병합발전시스템은 2기 시스템으로서 세 종류의 열부하를 갖고 있으며 각각의 열부하는 서로 다른 압력을 필요로 한다. 또한 서로 다른 용량과 특성을 가진 두 개의 보조보일러, 두 개의 축열조 그리고 두 개의 독립발전기와 함께 운전되며 전기부하에 공급하는 전기에너지의 출력이 부족할 경우 독립발전기를 운전하거나 전력회사에서 구매하도록 계통이 연계되어 있다. 본 논문에서 모델링하여 얻어진 최적운영계획수립결과 및 방법은 이와 유사한 산업체의 최적운영계획수립에 유용하게 적용될 것으로 사료된다[3]

2. 본 론

2.1 열병합발전시스템의 개념도

본 논문에서 대상으로 한 열병합발전방식은 열생산을 주목적으로 하는 버터빙사이클방식이다. A 열병합발전시스템과 B 열병합발전시스템의 최대 열출력은 각각 25[MW], 30[MW]로 서로 다른 용량을 갖으며 열부하는 각각 15[kg/cm²], 6.5[kg/cm²], 0.3[kg/cm²]의 서로 다른 압력을 필요로 하는 실제 산업체 열병합발전시스템을 모델로 하였다.

그림 1에서 나타난 바와 같이 열병합발전시스템에서 생산된 열에너지는 세 개의 열모선을 통하여 각각의 열부하에 에너지를 공급하고 생산된 열에너지보다 열부하가 큰 경우 보조 보일러와 축열조를 운전하여 열부하에 열에너지를 공급한다.

열병합발전시스템에서 생산된 전기에너지는 전기부하에 전기에너지를 공급하며 생산된 전기에너지보다 전기 부하가 큰 경우 계통과 연계된 전력회사로부터 전기에너지를 구입한다.

2.2 목적함수

최적운영계획의 수립을 위해 목적함수로 각각의 시간대에서 전기 구매비용과 열병합발전시스템의 연료비용의 합을 최소화하여 식 (1)과 같이 나타내었다. 목적함수에서 첫 번째 항은

전 력회사로부터 전기구매비용이고 두 번째 항은 각각 열병합 발전시스템, 독립발전기, 보조보일러의 총 연료비용을 나타내었다.

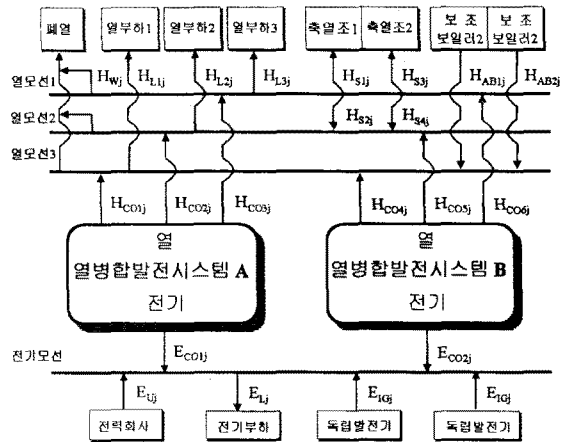


그림 1. 열병합발전시스템 개념도

$$\text{Min} \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{1}{r} \text{BUY}_j E_{ij} + \sum_{i=1}^3 (FC_{ij} + FG_{ij} + FA_{ij}) \right) \cdot \text{TIME} \right] \quad (1)$$

· 열병합발전시스템의 연료비

$$FC_{1j} = a_1 (H_{CO1j} + H_{CO2j} + H_{CO3j}) \quad (2)$$

$$FC_{2j} = a_2 (H_{CO4j} + H_{CO5j} + H_{CO6j}) \quad (3)$$

· 독립발전기 연료비

$$FG_{1j} = b_1 E_{IG1j} \quad (4)$$

$$FG_{2j} = b_2 E_{IG2j} \quad (5)$$

· 보조보일러 연료비

$$FA_{1j} = c_1 H_{AB1j} \quad (6)$$

$$FA_{2j} = c_2 H_{AB2j} \quad (7)$$

2.3 제약조건

목적함수에 대한 제약조건은 다음과 같다.

· 에너지 방향제약

$$H_{kj} \geq 0, \quad E_{kj} \geq 0 \quad (8)$$

· 열병합발전시스템의 열출력 상한한 제약

$$COTL_1 \leq H_{CO1j} + H_{CO2j} + H_{CO3j} \leq COTH_1 \quad (9)$$

$$COTL_2 \leq H_{CO4j} + H_{CO5j} + H_{CO6j} \leq COTH_2 \quad (10)$$

$$H_{L1j} = H_{CO1j} + H_{CO4j} + H_{AB1j} + H_{AB2j} - (H_{CO1j} + H_{CO4j}) \eta_{we} \quad (11)$$

$$H_{L2j} = H_{CO2j} + H_{CO5j} - H_{S1j} + H_{S2j} - H_{S3j} + H_{S4j} - (H_{CO2j} + H_{CO5j}) \eta_{we} \quad (12)$$

$$H_{Lij} = H_{COij} + H_{COij} - (H_{COij} + H_{COij}) \eta_{we} \quad (13)$$

$$H_{COij} = H_{COij} + H_{COij} + H_{COij} + H_{COij} + H_{COij} + H_{COij} \\ = H_{Lij} + H_{Lij} + H_{Lij} + H_{Sij} - H_{Sij} \\ + H_{Sij} - H_{Sij} - H_{ABij} - H_{ABij} + H_W \quad (14)$$

$$E_{COij} = k_1 (H_{COij} + H_{COij} + H_{COij}) \quad (15)$$

$$E_{COij} = k_2 (H_{COij} + H_{COij} + H_{COij}) \quad (16)$$

$$SE_L \leq k \leq SE_H \\ E_{COij} = E_{COij} + E_{COij} \\ = E_{Lij} - E_{IGij} - E_{IGij} - E_{Uij} \quad (17)$$

$$IGL_1 \leq E_{IGij} \leq IGH_1 \quad (18)$$

$$IGL_2 \leq E_{IGij} \leq IGH_2 \quad (19)$$

$$ABL_1 \leq \frac{E_{ABij}}{\delta_{abi}} \leq ABH_1 \quad (20)$$

$$ABL_2 \leq \frac{E_{ABij}}{\delta_{abi}} \leq ABH_2 \quad (21)$$

$$TSL_1 \leq (H_{Sij} \delta_{HSij} - \frac{H_{Sij}}{\delta_{HSij}}) TIME \\ - TS_{ij-1} (1 - \mu T_1)^{TIME} \leq TSH_1 \quad (22)$$

$$TSL_2 \leq (H_{Sij} \delta_{HSij} - \frac{H_{Sij}}{\delta_{HSij}}) TIME \\ - TS_{2j-1} (1 - \mu T_2)^{TIME} \leq TSH_2 \quad (23)$$

$$TS_{10} = \text{초기값} \quad (24)$$

$$TS_{ij} = (H_{Sij} \delta_{HSij} - \frac{H_{Sij}}{\delta_{HSij}}) TIME \\ + TS_{ij-1} (1 - \mu T_1)^{TIME} \quad (25)$$

$$TS_{20} = \text{초기값} \quad (26)$$

$$TS_2 = (H_{Sij} \delta_{HSij} - \frac{H_{Sij}}{\delta_{HSij}}) TIME \\ + TS_{2j-1} (1 - \mu T_2)^{TIME} \quad (27)$$

$$H_W = \eta_{we} \sum_{i=1}^N H_{COij} \quad (28)$$

$$H_{Lk} \times \delta_1 = \text{열부하 } k \quad (k = 1, 2, 3) \quad (29)$$

$$EL_j = \text{전기부하} \quad (30)$$

♣ 기 호 ♣

- N : 계산구간 총 수
- BUY_j : 전력회사로부터의 전기 구매단가 [원/MW]
- γ : 전력회사와 열병합발전시스템사이 송전효율 [p.u]
- FC_{1j}, FC_{2j} : 열병합발전시스템의 운전비 [원/MW]
- FA_{1j}, FA_{2j} : 보조 보일러의 운전비 [원/MW]
- FG_{1j}, FG_{2j} : 독립발전기의 운전비 [원/MW]
- a_k, b_k, c_k : 연료비 단가
- H_{COi} : 열병합발전시스템의 열출력 [MW]
- H_{ABi} : 보조보일러의 열출력 [MW]
- E_{COi} : 열병합발전시스템의 전기출력 [MW]
- E_{IGi} : 독립발전기의 전기출력 [MW]
- COEL₁, COEL₂ : 열병합발전시스템 최소 전기출력 [MW]
- COEH₁, COEH₂ : 열병합발전시스템 최대 전기출력 [MW]

- COTL₁, COTL₂ : 열병합발전시스템 최소 열출력 [MW]
- COTH₁, COTH₂ : 열병합발전시스템 최대 열출력 [MW]
- IGL₁, IGL₂ : 독립발전기의 최소 전기출력 [MW]
- IGH₁, IGH₂ : 독립발전기의 최대 전기출력 [MW]
- ABL₁, ABL₂ : 보조보일러의 최소 열출력 [MW]
- ABH₁, ABH₂ : 보조보일러의 최대 열출력 [MW]
- TSL₁, TSL₂ : 축열조 최소 열에너지 저장량 [MW]
- TSH₁, TSH₂ : 축열조 최대 열에너지 저장량 [MW]
- H_{Lj} : j구간에 흐르는 열부하 [MW]
- E_{Lj} : j구간에 흐르는 전기부하 [MW]
- TS_{1j}, TS_{2j} : 축열조의 에너지저장량 [MW]
- μT₁, μT₂ : 축열조의 열손실 [p.u]
- η_{we} : 폐열상수
- δ_{HS} : 축열조의 열 전송효율
- δ_{IG} : 독립발전기의 열 전송효율
- SE_H : 열병합발전시스템의 최대 열전비 [p.u]
- SE_L : 열병합발전시스템의 최소 열전비 [p.u]
- TIME : 계산구간 길이

2.4 사례연구

사례연구를 위해 사용된 입력자료는 표 1과 같다. 전기구매 단가 및 연료비 단가의 단위는 [천원/MW]이며 열부하와 전기부하의 단위는 [MW]이다. 각 계산구간의 길이는 3으로 하였고 계산구간의 총 수는 8로 하였으며 각 계산 구간동안은 운전조건이 변하지 않는다고 가정하였다.

표 1. 입력 데이터

시간대	1	2	3	4	5	6	7	8
열부하 1	20	23	24	27	28	28	22	20
열부하 2	16	18	18	20	24	24	19	19
열부하 3	6	7	8	8	9	7	7	6
전기부하	44	45	52	56	60	60	58	53
전기단가	31.72	31.72	38.48	68.43	72.15	72.14	52	52

COTL ₁	5.0	IGL ₁	1.0	TIME	3.0	δ _{HS1}	0.98	a ₁	64.04
COTH ₁	25.0	IGL ₂	1.0	μT ₁	0.05	δ _{HS2}	0.98	a ₂	63.56
COTL ₂	7.0	IGH ₁	5.0	μT ₂	0.05	δ _{HS3}	0.98	b ₁	45.21
COTH ₂	30.0	IGH ₂	6.0	TS ₁₀	3.0	δ _{HS4}	0.98	b ₂	59.31
ABL ₁	1.0	TSL ₁	1.0	TS ₂₀	3.0	R _{L1}	0.56	c ₁	65.49
ABH ₁	5.0	TSH ₁	6.0	δ _{abi}	0.98	R _{H1}	0.8	c ₂	66.21
ABL ₂	1.0	TSL ₂	1.0	δ _{abi}	0.98	R _{L2}	0.6	η _{we}	0.1
ABH ₂	7.0	TSH ₂	7.0	TS ₁₀	1.0	R _{H2}	0.82	TS ₂₀	1.0

최적 운용계획은 선형계획법으로 수립하였으며 수립결과를 표 2와 같다.

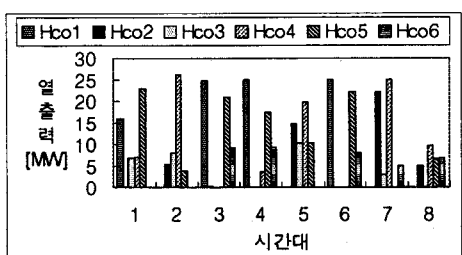


그림 2. 열병합발전시스템의 열출력계획

표 2. 최적 운전계획 수립 결과

시간	1	2	3	4	5	6	7	8
H_{CA}	15.74	0	24.71	25.00	0	25.00	0	13.03
H_{CB}	0	5.24	0.29	0	14.80	0	22.12	0
H_{CC}	6.08	7.93	0	0	10.20	0	2.88	0
H_{CD}	6.94	26.08	0	3.65	19.81	0.10	24.95	9.65
H_{CE}	23.06	3.92	20.93	17.29	10.19	21.98	0	13.55
H_{CF}	0	0	9.10	9.07	0	7.93	5.06	6.08
E_{CA}	18.03	10.54	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	10.42
E_{CB}	24.60	24.60	24.60	24.60	24.60	24.60	24.60	24.60
H_{AB1}	0	0	2.25	1.77	4.00	4.00	0	0
H_{AB2}	0	0	0	0	6.74	1.99	0	0
E_{K1}	0	0	0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
E_{K2}	0	0	0	5.88	5.88	5.88	0	0
E_w	1.37	9.86	7.40	0.62	4.62	4.62	8.5	13.08
H_w	5.25	4.31	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55	4.30
H_{S1}	2.04	0	0.41	0	0	0	0	0.52
H_{S2}	0	4.81	0	2.27	0.91	2.29	0	3.43
H_{S3}	2.38	0	0.32	0	0	0	0	0
H_{S4}	0	5.32	0	2.58	1.10	2.43	0	3.77

이중 그림 2는 열병합발전시스템의 열출력계획을 나타낸 것이다. 운전비용이 적게드는 B 열병합발전시스템에서 최대 열출력인 30[MW]까지 발전하여 기저부하용으로 운전하고 나머지 열부하는 A 열병합발전시스템을 운전하여 열에너지를 공급하여 기저부하용으로 B 열병합발전시스템을 운전한다.

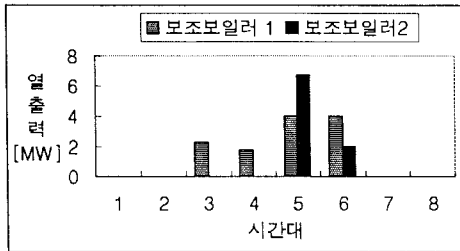


그림 3. 보조보일러 운전계획

그림 3에 나타난 것처럼 보조보일러는 1~2구간과 7~8구간처럼 경부하일때는 부하가 적고 운전비용이 열병합발전시스템보다 크기 때문에 운전하지 않고 열부하가 공급되는 열에너지보다 큰 3~6시간대에만 보조보일러를 운전하여 부하 1에 열에너지를 공급한다.

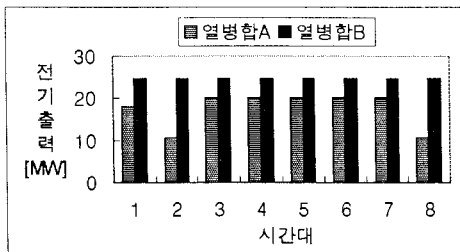


그림 4. 열병합발전시스템의 전기출력계획

2대의 보조보일러의 특성이 다르기 때문에 아래 그림과 같이 운전 단가가 작은 보조보일러 1에서 3~6시간대에 열에너지를 생산하며 운전단가가 큰 보조보일러 2는 열부하가 5~6시간대에 운전한다. 즉 보조보일러는 첨두부하용으로 쓰임을 알 수 있다

그림 4에는 열병합발전시스템의 전기출력계획을 나타내었

다. 운전 단가가 작은 B 열병합발전시스템에서 전기생산을 최대한 하고 나머지 전기는 A 열병합발전시스템에서 생산하며, 부족한 전기는 독립발전기를 운전하거나 전력회사로부터 구매하여 충당한다.

그림 5와 그림 6은 전력회사로부터 전기구매계획과 독립발전기 운전계획을 나타낸 것이다. 아래 그림을 살펴보면 열병합발전시스템에서 생산된 전기출력은 항상 전기부하량보다 적음을 알 수 있다. 따라서 전력회사로부터 전기를 구매하되 전기구매단가가 비싼 4~8시간대에는 독립발전기를 운전하여 운전비용을 최소화한다. 독립발전기 운전시 운전비용이 싼 독립발전기 1이 4~8시간대에서 운전되며, 운전비용이 비싼 독립발전기 2는 최대 전기부하를 필요로 하는 4~6시간대에 운전되고 있음을 알 수 있다.

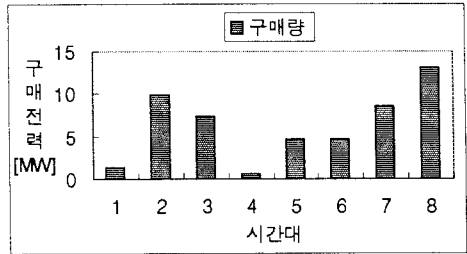


그림 5. 전력회사로부터 전기구매계획

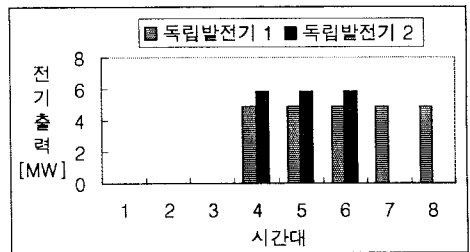


그림 6. 독립발전기 운용계획

3. 결론

서로 다른 입력의 열부하를 가진 다기 열병합발전시스템에서의 운전계획을 수립하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 제한한 수리모델을 근거로 얻어진 운전계획결과는 최소 운전비하에서 각 설비들이 운전되도록 계획되어 있음을 확인하였다.
- (2) 압력에 따라 열에너지 공급이 다양한 경우에서도 간편하게 운전계획이 수립되었다.
- (3) 열 생산에 의해 제약을 받는 전기출력 때문에 피크부하 기간에 구매하여야 할 전력이 정확하게 계획되었다.
- (4) 첨두부하용으로 사용해야될 보조설비들의 운전계획이 수립되었다.

그러나 좀더 정확한 모델링을 위해서는 비선형 모델링을 수립하여 비선형 조건시 해를 구할 수 있는 기법을 도입하여 운전계획을 수립하는 것이 요구된다.

(참고 문헌)

- (1) 이종범, 김성일, 정창호, "열병합발전시스템에서 유전알고리즘을 적용한 단기운전계획 수립", 한국에너지공학회, 제 6권 1호, pp11, 1997
- (2) 이종범, "열병합발전시스템의 운전계획", 대한전기학회, Vol 4, No 3, pp. 4, 1999
- (3) Linus Scharge, "An Optimization Modeling System", The Scientific Press, 1991