

제지공장용 열병합발전시스템의 운용비용절감을 위한 합리적 운전기법 수립

최 광범, 이 중범

A Rational Operation Scheduling for Operational Cost Saving in Cogeneration System for Paper Mill

Kwang-Beom Choi and Jong-Beom Lee

Department of Electrical Engineering, Wonkwang University

Abstract - This paper proposed the optimal operational scheduling of cogeneration system for paper mill connected with several auxiliary devices. Auxiliary devices that include auxiliary boiler, waste boiler and sludge incinerator operate with multi-cogeneration system. Especially environment element was considered in objective function to solve environment problem. Electricity can be purchased through power system from utility. The proposed operational strategy on cogeneration system for paper mill to increase energy efficiency can be applied to the similar cogeneration system in industrial field.

상으로 최적운전계획을 수립하였다. 기업과 국가의 에너지 절약을 위하여 열병합발전설비와 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로등 다양한 보조설비들이 조화롭게 이루어 부하의 요구를 만족시키면서 최적운전을 할수 있도록 알고리즘을 수립하였고 최적화 방법으로는 선형계획법을 이용하였다. 또한 최근 문제가 심각하게 대두되고 있는 환경보호를 위하여 각종 배기가스와 폐기물 처리에 따른 합수를 도입하여 환경을 고려한 최적운전기법을 수립하였다. 최적운전기법은 열병합발전 시스템과 보조설비들이 종합적으로 연계운용되어 총 연료비를 최소화 하는 관점에서 수립하여 제시하였다.⁽²⁻⁴⁾

1. 서 론

2. 제지공장용 열병합발전시스템의 수리모델

열병합발전시스템은 하나의 에너지원에서 열에너지와 전기에너지를 동시에 생산하는 종합에너지시스템으로서 에너지 이용율이나 환경친화적인 측면에서 매우 우수한 발전시스템이라는 것은 이미 잘 알려져 있다. 이러한 열병합발전시스템의 운전계획은 이미 자국의 특성에 맞게 연구되어 발표된 바 있다. 그리고 국내의 산업체내에서도 이미 열병합발전시스템이 광범위하게 도입되어 운용되고 있고 전국의 30-40개 대규모 공단에 열병합발전시스템이 추가설치될 계획중에 있음에도 불구하고 아직 산업체용 열병합발전시스템의 운전기법개발을 위한 수리모델만 일부 연구되었을 뿐 구체적인 연구가 미비한 실정이다.⁽¹⁾ 특히 각종 보조설비들을 가진 경우의 운전계획, 소유권이 다른 열병합발전시스템의 운용방안등 운전기법에 관한 다각적인 노력이 있어왔으나 산업체 열병합발전시스템에의 적용사례가 미비하고 실 모델에의 적용사례가 적다.

본 논문에서 제시된 대상 제지공장의 열병합발전시스템은 다기의 열병합발전과 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로등 다양한 보조설비들을 갖추고 있다. 또한 열병합발전시스템의 방식은 열생산이 우선인 버터밍사이클방식이며 열부하는 별도의 압력을 필요로 하지 않고 열에너지만을 필요로 하는 부하이다. 그림 1은 대상 제지공장의 열병합발전시스템과 각종 보조설비들이 연계관계를 나타내는 에너지 흐름도이다. 전기와 열의 유출입은 모두 연결되어 있으므로 모선처리하였다.

운전계획수립을 위하여 열병합발전시스템과 보조설비들의 모델링에 사용된 기호들은 다음과 같다.

기 호

H_{cwi} = 열병합발전시스템의 열출력(MW)

H_{load} = 열부하로의 공급량(MW)

H_L = 열부하(MW)

H_{abi} = 보조보일러 열출력(MW)

따라서 본 논문은 제지공장용 열병합발전시스템을 대

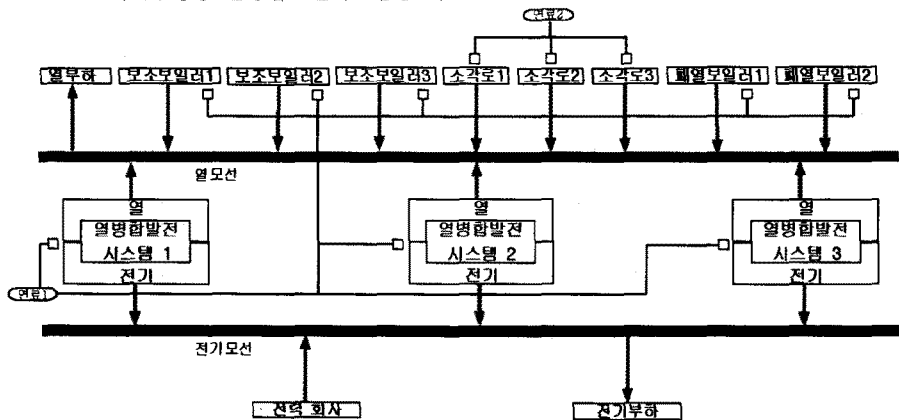


그림 1. 대상 제지공장 열병합발전시스템의 에너지 흐름도

H_{whbi} = 폐열보일러 열출력 [MW]
 H_{Sli} = 슬러지 소각로의 열출력 [MW]
 F_{ai} = 보조보일러의 연료비 [\$ / MW]
 F_{Sli} = 출력당 슬러지의 가공비용 [\$ / MW]
 E_{coi} = 열병합발전시스템의 전기출력 [\$ / MW]
 F_{ci} = 열병합발전시스템의 연료비 [\$ / MW]
 F_{wi} = 폐열보일러의 연료비 [\$ / MW]
 E_{bu} = 전력회사로부터의 구매전력 [MW]
 BUY = 전기구매단가 [\$ / MW]
 R_{seli} = 최소열전비
 R_{sehi} = 최대열전비
 E_L = 전기부하
 WH = 열병합발전시스템의 폐열
 t = 한시간대의 시간수
 ϵ = 송전효율
 δ_{Hloadi} = 열전송효율

δ_{abi} = 보조보일러 열전송효율
 δ_{whbi} = 폐열보일러 열전송효율
 δ_{Eload} = 전기부하로 송전효율
 δ_{Sli} = 슬러지 소각로의 열전송 효율
 α_i = 열병합발전시스템의 폐열당 열출력생산효율
 η_{wh} = 폐열상수
 β_{co} = 열병합발전시스템의 출력당 소비연료량 [l / MW]
 β_{ab} = 보조보일러의 출력당 소비연료량 [l / MW]
 β_{Sl} = 슬러지 소각로의 출력당 소비연료량 [t / MW]
 β_{whb} = 폐열보일러의 출력당 소비연료량 [l / MW]
 γ_i = i형태 연료에 대한 환경처리비용상수

목적함수는 열병합발전시스템에서 사용되는 연료비용과 전기의 구매비용의 합을 최소화시키는 것으로 하였으며 식(1) 과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \sum_{k=1}^n t \cdot & \left(BUY(k) \cdot \frac{1}{\epsilon} \cdot E_{bu}(k) + \sum_{i=1}^3 F_{ai} \cdot H_{coi}(k) \right. \\
 & + \sum_{i=1}^3 F_{ai} \cdot H_{abi}(k) + \sum_{i=1}^2 F_{wi} \cdot H_{whbi}(k) \\
 & + \sum_{i=1}^3 F_{Sli} \cdot H_{Sli}(k) + \sum_{i=1}^3 \beta_{co} \gamma_1 H_{coi}(k) \\
 & + \sum_{i=1}^3 \beta_{ab} \gamma_1 H_{abi}(k) + \sum_{i=1}^2 \beta_{whbi} \gamma_1 H_{whbi}(k) \\
 & \left. + \sum_{i=1}^3 \beta_{Sl} \gamma_2 H_{Sli}(k) \right) \quad \text{-----}(1)
 \end{aligned}$$

식1에서 첫째항목은 전기구매비용이고, 둘째항목은 열병합발전시스템의 운전비용이며, 셋째,네째,다섯째항목은 각종 보조설비들에 투입되는 연료비용, 그리고 나머지 항목들은 환경처리비용의 합이다. 또한 이런 목적함수에는 제약조건이 따르게 되는데 각 섹터에서 에너지 흐름에 관한 제약조건은 다음과 같다.

(1) 열부하 제약

$$\begin{aligned}
 H_{load}(k) = & \sum_{i=1}^3 H_{coi}(k) + \sum_{i=1}^2 H_{abi}(k) \\
 & + \sum_{i=1}^3 H_{Sli}(k) + \sum_{i=1}^2 H_{whbi}(k) \quad \text{-----}(2)
 \end{aligned}$$

$$H_L(k) = H_{load}(k) \delta_{Hload}(k) \quad \text{-----}(3)$$

(2) 전기부하 제약

$$E_{load}(k) = E_{bu}(k) + \sum_{i=1}^3 E_{coi}(k) \quad \text{-----}(4)$$

$$E_L(k) = E_{load}(k) \cdot \delta_{Eload} \quad \text{-----}(5)$$

(3) 열병합발전시스템의 열과 전기출력 상하한 제약

$$H_{coi}^{min} \leq H_{coi}(k) \leq H_{coi}^{max} \quad \text{-----}(6)$$

$$\delta_{abi} \cdot H_{abi}^{min} \leq H_{abi}(k) \leq \delta_{abi} \cdot H_{abi}^{max} \quad \text{-----}(7)$$

(4) 각종 보조설비들의 출력 상하한 제약

$$\delta_{abi} \cdot H_{abi}^{min} \leq H_{abi}(k) \leq \delta_{abi} \cdot H_{abi}^{max} \quad \text{-----}(8)$$

$$\delta_{whbi} \cdot H_{whbi}^{min} \leq H_{whbi}(k) \leq \delta_{whbi} \cdot H_{whbi}^{max} \quad \text{-----}(9)$$

$$\delta_{Sli} \cdot H_{Sli}^{min} \leq H_{Sli}(k) \leq \delta_{Sli} \cdot H_{Sli}^{max} \quad \text{-----}(10)$$

(5) 폐열제약

$$H_{whbi}(k) \leq \alpha_i \cdot WH(k) \quad \text{-----}(11)$$

$$WH(k) = \eta_{wh} \cdot H_{load}(k) \quad \text{-----}(12)$$

이와같은 제약들과 함께 목적함수를 풀기 위해서는 두가지의 가정이 필요한데, 첫째 대상기간의 열부하와 전기부하는 미리 주어지며, 열병합발전시스템은 계속 운전중이어야 하며 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지소각로등 보조설비들의 효율은 출력에 관계없이 일정해야 한다는 것이다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 실제 운전중인 A제지공장용 열병합발전시스템의 운전실적을 기초로 하여, 춘계시의 자료를 기준으로 전력요금의 시간대 구분, 효율 등의 입력자료를 구성하였으며 사례연구를 위해 사용된 입력자료는 표 1 과 같다. 여기서 각 시간대는 계산구간으로서 2시간을 하나의 시간대로 나타낸 것이다. 따라서 1일간의 운전계획은 12개의 시간대로 나뉜다.

표 1. 부하입력자료

시간대(k)	열부하량 [MWh]	전기부하량 [MWh]	전기구매단가 [\$ / MWh]
1	294	36	29,280
2	300.86	36	29,280
3	298.8	40	29,280
4	297.92	41	29,280
5	372.4	60	48,000
6	411.6	70	66,600
7	408.66	71	66,600
8	441	75	66,600
9	436.1	73	66,600
10	392	57	48,000
11	354.76	50	48,000
12	326.34	40	48,000

표 2는 최적운전계획수립을 위해 필요한 효율과 연료단가등 열병합발전시스템의 각종 제반운전자료이다.

표 2. 제반운전자료

δ_{abi}	0.98	γ_1	0.03
δ_{Sli}	0.98	γ_2	0.5
δ_{Whbi}	0.98	β_{co}	216.7
δ_{Hloadi}	0.98	β_{ab}	232.1
δ_{Eloadi}	0.98	β_{Sl}	18.67
R_{sehi}	0.9	β_{Whb}	79.14
R_{seli}	0.7	F_{ai}	46,424
ϵ	0.98	F_{ci}	43,330
α_i	0.7	F_{Sli}	37,338
η_{wh}	0.05	F_{wi}	15,988

4. 결과 및 분석

본 논문에 도입된 제지공장용 열병합발전시스템은 여

러 가지 보조설비들을 다 함께 운전하고 있다. 이러한 보조설비들과 열병합발전시스템을 전송한 기본입력데이터를 바탕으로 선형계획법을 이용하여 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 설비별 운전계획이 산출되었고 일간운전비용은 383,797,080원이 산출되었다.

세부적으로 살펴보면 폐열보일러와 슬러지 소각로는 항상 최대출력으로 운전을 하고 있다. 그 이유는 폐열보일러에 사용되는 단위 출력당 연료비가 여타 설비에 비하여 월등히 작기 때문이다. 또한 슬러지 소각로에 사용되는 슬러지는 제지공정에서 발생하는 찌꺼기를 원료로 사용하기 때문에 원료비가 거의 들지 않는다. 단지 슬러지를 고형화 시키고, 또한 연료화 시키기 위한 약간의 제반비용만이 들기 때문에 출력당 연료비가 다른 설비에 사용되는 연료비에 비해 매우 싸다. 따라서 슬러지 소각로는 연료로서 사용되는 슬러지 생산량에 구애를 받지 않는 한 최대출력으로 상시운전하는 것이 운용비용 절감에 유리하기 때문이다. 본 논문의 대상 제지공장은 슬러지 생산량이 슬러지 수요에 차질이 없을 정도의 가공능력을 갖추고 있고 상시 운전시에 슬러지 부족으로 인한 슬러지소각로의 감축운전같은 현상은 없었다. 따라서 슬러지소각로는 항상 최대출력을 내고 있는 운전결과가 나왔음을 알 수 있다.

그림 2는 열병합발전설비들의 운전계획을 나타낸 것이며, 그림 3은 보조보일러의 운전계획을 나타낸 것이다.

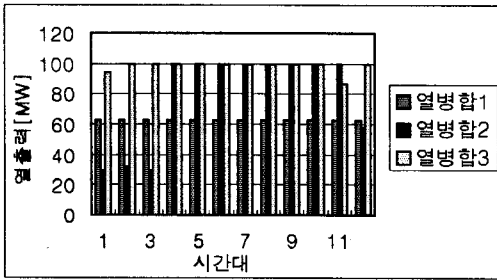


그림 2. 열병합발전시스템의 열출력계획

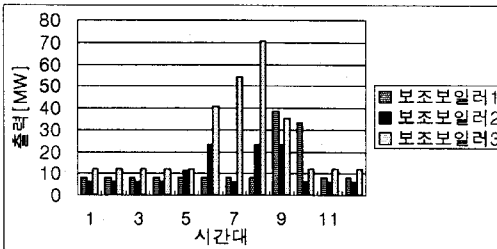


그림 3. 보조보일러의 열출력계획

그림 2와 그림 3에서 알 수 있듯이 열병합발전설비는 전 시간대에 걸쳐 폐열보일러와 슬러지 소각로가 담당하는 부하량의 나머지 부하량을 충족하기 위해서 가장 높은 출력을 내려고 하고 있다. 그리고 보조보일러가 최소 출력량 이상의 출력을 내는 6번에서 10번 시간대는 부하량이 슬러지소각로, 폐열보일러, 열병합발전설비 등이 모두 최대출력을 내고 있는 시간대임을 알 수 있다. 이로써 제지공장용 열병합발전시스템의 보조보일러는 첨두 부하를 위한 설비로 사용되어야 합리적인 운용이 되어 전체적인 운전효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.

그림 6와 그림 7는 열병합발전설비의 전기출력과 전력회사로부터의 전기구매계획을 나타내고 있다. 전기출력은 열병합발전설비가 모두 부담하는 방향으로 운전계획이 수립되었으며 출력이 부하량을 모두 감당하지 못하는 시간대인 6번부터 9번 시간대까지는 전력회사로부터

전기를 구매할 계획이 세워져 있음을 알 수 있다.

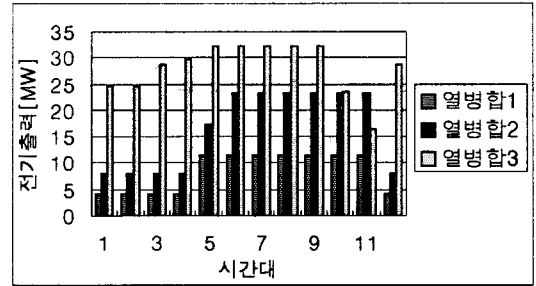


그림 4. 열병합발전시스템의 전기출력계획

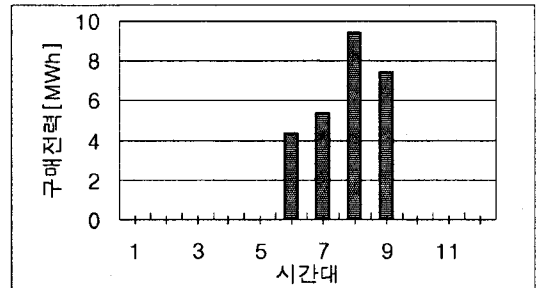


그림 5. 전기구매계획

5. 결 론

제지공장용 열병합발전시스템을 대상으로 하여 운용비용절감을 위한 최적운전계획을 수립하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제지공장용 열병합발전시스템의 실 모델을 대상으로 에너지 흐름도를 구성하였으며, 에너지 흐름에 관한 수리적인 모델을 수립하였다.
- 2) 시간대별로 각기 다른 전기구매비용과 열부하, 전기부하 등의 입력데이터를 적용하였고, 선형계획법을 이용해 최적운전계획을 수립하였다.
- 3) 열병합발전시스템과 설비들이 조화를 이루며 부하에 효율적인 에너지 공급을 할 수 있는 운전계획이 얻어졌다.
- 4) 폐열보일러, 슬러지소각로는 항상 최대출력을 발생하여야 하며, 보조보일러는 첨두부하를 위해 사용하여야만 효율적인 운전이 될 수 있음을 확인하였다.
- 5) 환경처리에 관련한 비용까지 목적함수에 고려하였다.

본 논문에 제시된 운전계획 알고리즘은 이와 유사한 제지공장용 열병합발전시스템에 잘 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 이종범, 류승헌: "열병합발전시스템의 국내의 현황과 과제 및 전망", 대한전기학회지, (1994).
- [2] J.X.Xu, C.S.Chang, X.W.Wang: "Constrained Multiobjective Global Optimization of Longitudinal Interconnected Power System by Genetic Algorithm", IEE trans. on Dispatch, vol.143, No.5, (1996).
- [3] K. Ito, et al.: "Optimal Planning of a Super Waste Incineration Cogeneration Plant", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 119, (1997).
- [4] "98열병합발전 기술교육", 한국 열병합발전협회, (1998)