

제지공장용 열병합발전시스템에서 유전알고리즘을 이용한
합리적 운전계획 수립에 관한 연구

최 광 범*, 이 종 범, 정 지 훈
원광대학교 전기공학과

A Rational Operation Scheduling Using Genetic Algorithms
on Cogeneration System for Paper Mill

Kwang-Beom Choi, Ji-Hoon Jeong 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 boilers, waste heat boilers and sludge incinerators operate with multi-cogeneration systems. Especially environment element was considered in objective function to solve the environment problem. And GAs(Genetic Algorithms) was applied to optimize and to analyse nonlinear operational property of cogeneration system of paper mill connected with several auxiliary devices. C-language was used to GAs computation. 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 of industrial field.

1. 서 론

열병합발전시스템은 하나의 에너지원에서 전기와 열에너지를 동시에 생산하는 발전방식으로서 전력회사에 의한 대규모집중 발전방식에 비해 에너지 이용효율이 월등하다. 특히 산업체에서는 종종 전기뿐만이 아닌 열에너지도 필요로 하기 때문에 전기와 열에너지를 동시에 얻을 수 있고, 에너지 이용효율이 좋은 열병합발전 시스템은 이미 국내에서도 널리 채용되어 운전되고 있다. 그러나 산업용 열병합발전시스템은 에너지절감의 필요성을 위해 도입·설치하는것도 중요하지만, 건물용 소형 열병합발전시스템과는 달리 주로 대규모이며 다양한 보조설비들을 갖추고 있는 경우가 많으므로 운전비용의 절감을 위해 운전계획을 합리적으로 수립하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현재의 상황은 산업용 열병합발전시스템의 경제적인 운용을 위한 지침이나 전략등이 뚜렷이 정해진 것이 없고 단순히 운영자의 경험이나, 습관에 의지하고 있어서 에너지 이용효율의 극대화를 실현하지 못하고 있다. 지금까지의 열병합발전시스템 연구는 주로 열병합발전시스템의 건설을 고려한 경제적인 타당성 연구나 특정설비의 초기 설치시 용량선정등이 주를 이룬다.[1~3] 그러나 산업체에서 열병합발전시스템 도입시에 공정의 구성, 전기수요와 열수요의 수준, 필요한 열의 온도와 압력, 공정의 규모 등 엄청나게 많은 조건을 고려하여 도입하고 설계되기 때문에 산업체는 용도에 따라 독특한 시스템을 가지게 된다. 또한 산업체의 규모가 크고, 공정이 복잡해질수록 다양한 보조설비를 가지게 되며, 공정의 규모가 확장되어 새로운 설비가 추가되어 시스템이 변경되기도 한다. 그러므로 산업체용 열병합발전시스템의 합리적인 운영알고리즘을 확립하여 이에 준하여 운전한다면 상당한 에너지 절약을 이룩할 것으로 판단되며 추가설비가 있더라도, 수립된 운영알고리즘에 약간의 수

정만을 가한다면 지속적으로 적용이 가능하리라 사료된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 산업체 열병합발전시스템 가운데 국내의 제지공장에 건설되어 현재 운전되고 있는 제지공장용 열병합발전시스템을 대상으로 이에 대한 최적운전계획을 수립하였다. 이 열병합발전시스템은 다기시스템을 보유하고 있고, 보조설비인 보조보일러, 폐열보일러 및 슬러지소각로 등과 함께 전기부하와 열부하에 각각의 에너지를 공급해 주고 있으며 자체 전기출력이 부족할 경우에는 전력회사와 연계되어 전력을 구매하기도 한다. 특별히 본 논문에서의 최적운전계획에서는 1997년 12월 기후변화협약 제 3차 당사국총회(일명 교토회의)에서 90년을 기준으로 미국 7%, 일본 6%, 유럽연합 8%를 포함하여 선진국은 평균 5.2%의 온실가스 배출 감축목표를 골자로 하는 "교토의정서"를 채택하여 환경친화적인 문명의 건설을 위한 구체적인 합의에 이르고 있음에 따라 환경선언이 곧 우리 나라에도 영향을 미칠 것으로 예상되어 환경항목을 목적함수에 추가하여 운전계획을 수립하였다. 또한 제시된 알고리즘이 설비의 출력특성상 비선형 특성을 가지고 있으므로 이를 해결하는데 최적화 알고리즘으로서 사용되고 있는 유전 알고리즘을 이용하였다.[4] 알고리즘을 실행하고 시뮬레이션하기 위한 도구로서는 C언어를 사용하였으며, 결과적으로 수립된 운전계획수립결과와 타당성을 항목별로 검토하였다.

2. 제지공장용 열병합발전시스템의 수리모델

본 논문에서 제시된 대상 제지공장의 열병합발전시스템은 다기의 열병합발전과 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로등 다양한 보조설비들을 갖추고 있다. 또한 전기를 생산하고 남은 열을 공정에 이용하는 토핑사이클 방식이며 열부하는 모두 일정한 압력을 가지고 있다. 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

- BUY : 전기구매단가(₩/MW)
- E_L : 전기부하
- E_{coi} : 열병합발전시스템의 전기출력(₩/MW)
- E_{bu} : 전력회사로부터의 구매전력(MW)
- $f_{aai}, f_{abi}, f_{aci}$: 보조보일러의 연료비계수(₩/Ton)
- f_{Stai}, f_{Sibi} : 출력당 슬러지의 가공비용계수(₩/Ton)
- $f_{cai}, f_{cbi}, f_{cci}, f_{cdi}, f_{cei}$: 열병합발전시스템의 연료비계수(₩/Ton)
- $f_{wai}, f_{ubi}, f_{wci}$: 폐열보일러의 연료비계수(₩/Ton)

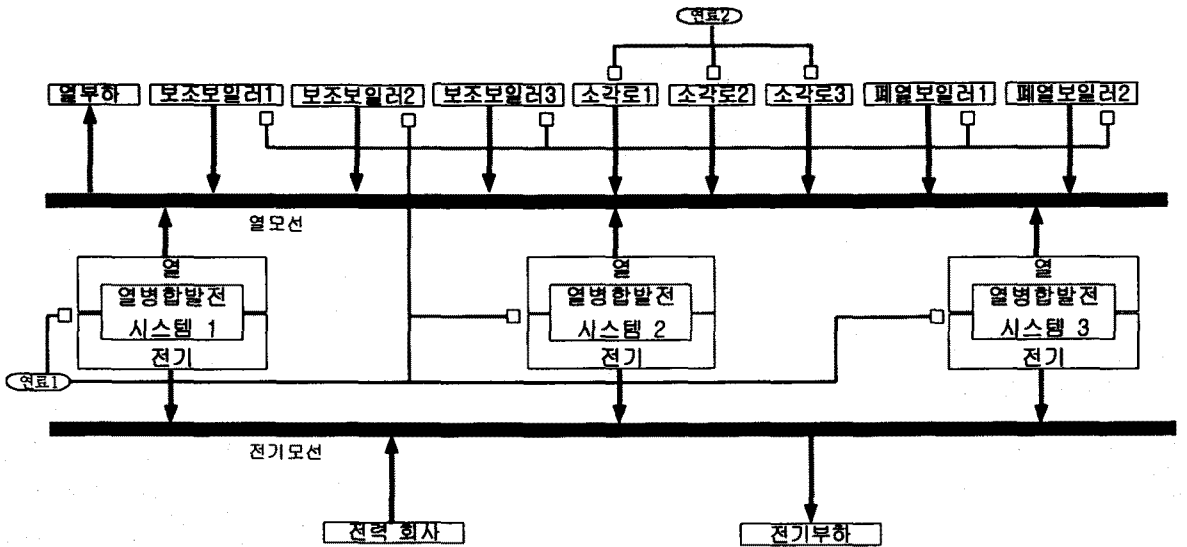


그림 1. 제지공장용 열병합발전시스템의 전기와 열에너지 흐름도

- H_{coi} : 열병합발전시스템의 열출력(Ton)
- H_{load} : 열부하로의 공급량(Ton)
- H_L : 열부하(Ton)
- H_{abi} : 보조보일러 열출력(Ton)
- H_{whbi} : 폐열보일러 열출력(Ton)
- H_{Sli} : 슬러지소각로의 열출력(Ton)
- k : 시간대
- t : 한시간대의 시간수
- WH : 열병합발전시스템의 폐열
- α_i : 열병합발전시스템의 폐열당 열출력생산 효율
- η_{wh} : 폐열상수
- $\beta_{cai}, \beta_{cbi}, \beta_{cci}, \beta_{cdi}, \beta_{cei}$: 열병합발전시스템의 환경처리비용계수(₩/Ton)
- $\beta_{aai}, \beta_{abi}, \beta_{aci}$: 보조보일러의 환경처리비용계수(₩/Ton)
- $\beta_{Stai}, \beta_{Slti}$: 슬러지 소각로의 환경처리비용계수(₩/Ton)
- $\beta_{wai}, \beta_{wbi}, \beta_{wci}$: 폐열보일러의 환경처리비용계수(₩/Ton)
- δ_{Hloadi} : 열전송효율
- δ_{abi} : 보조보일러 열전송 효율
- δ_{whbi} : 폐열보일러 열전송 효율
- δ_{Eload} : 전기부하로 송전 효율
- δ_{Sli} : 슬러지 소각로의 열전송 효율
- ϵ : 송전효율

목적함수는 열병합발전시스템에서 사용되는 연료비용, 전기의 구매비용 그리고 출력에 관계한 환경처리비용의 합을 최소화시키는 것으로 하였으며 식(1) 과 같다.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^t t \cdot \left[\text{BUY}(k) \cdot \frac{1}{\epsilon} \cdot E_{bu}(k) + \sum_{i=1}^3 F_{coi} + \sum_{i=1}^3 F_{ai} + \sum_{i=1}^3 F_{wi} + \sum_{i=1}^3 F_{Sli} \right] \dots (1)$$

식1에서 첫째항목은 전기구매비용이고, 둘째항목은 열병합발전시스템의 운전비용이며, 셋째, 네째, 다섯째항목

은 각종 보조설비들에 투입되는 연료비용이며 환경처리비용이 포함된 식이다.

$$F_{coi} = (F_{cai} + \beta_{cai}) \cdot H_{coi}^2(k) + (F_{cbi} + \beta_{cbi}) \cdot H_{coi}(k) + (F_{cci} + \beta_{cci}) \cdot E_{coi}^2 + (F_{cdi} + \beta_{cdi}) \cdot E_{coi}(k) + (F_{cei} + \beta_{cei}) \dots (2)$$

$$F_{ai} = (F_{aai} + \beta_{aai}) \cdot H_{abi}^2(k) + (F_{abi} + \beta_{abi}) \cdot H_{abi}(k) + (F_{aci} + \beta_{aci}) \dots (3)$$

$$F_{wi} = (F_{wai} + \beta_{wai}) \cdot H_{whbi}^2(k) + (F_{wbi} + \beta_{wbi}) \cdot H_{whbi}(k) + (F_{wci} + \beta_{wci}) \dots (4)$$

$$F_{Sli} = (F_{Stai} + \beta_{Stai}) \cdot H_{Sli}(k) + (F_{Slti} + \beta_{Slti}) \dots (5)$$

이러한 목적함수를 풀기 위해서는 제약조건이 따르게 된다. 여기에서 제약조건은 열병합발전시스템을 비롯한 각종 보조설비들의 정격용량에 따른 최대제약과 상시운전을 위한 최소제약등이 있다. 또한 열과 전기의 부하량에 의한 열제약, 전기제약 또한 제약조건에 포함된다.

이와같은 제약들과 함께 목적함수를 풀기 위해서는 두가지의 가정이 필요한데, 첫째 대상기간의 열부하와 전기부하는 미리 주어지며, 둘째 열병합발전시스템은 계속 운전중이어야 한다는 것 등이다.

3. 사례 연구

본 논문에서는 실제 운전중인 A제지공장용 열병합발전시스템의 운전실적을 기초로 하여, 순계시의 자료를 기준으로 전력요금의 시간대 구분, 효율 등의 입력자료를 구성하였다. 여기서 각 시간대는 계산구간으로서 2시간을 하나의 시간대로 나타낸 것이다. 따라서 1일간의 운전계획은 12개의 시간대로 나뉜다. 또한 시간대별로 경부하, 중부하, 최대부하의 3가지 기준의 전기요금을 적용하였으며 목적함수를 최적화하기 위하여 최적화 알고리즘으로서 유전알고리즘을 이용하였으며 유전알고리즘을 적용하기 위한 도구로는 C언어를 이용하였다.

4. 결과 및 분석

본 논문에 도입된 제지공장용 열병합발전시스템은 여러 가지 보조설비들을 다기 함께 운전하고 있다. 이러한 보조설비들과 열병합발전시스템을 전송한 기본입력데이터를 바탕으로 선형계획법을 이용하여 시뮬레이션한 결

과 다음과 같은 설비별 운전계획이 산출되었고 일간운전 비용은 114,037,331원이 산출되었다. 유전알고리즘 적용시 세대가 증가하면서 운전비가 최적화되는 과정을 그림 2에 나타내었다.

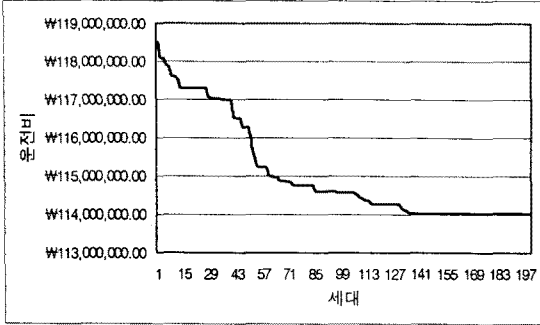


그림 2. 세대증가에 따른 수렴과정

세부적으로 살펴보면 폐열보일러와 슬러지 소각로는 항상 최대출력점 근처에서 운전을 하고 있다. 그 이유는 폐열보일러에 사용되는 단위 출력당 연료비가 여타 설비에 비하여 월등히 작아서 운전할수록 이익이기 때문이다. 따라서 슬러지 소각로는 연료로서 사용되는 슬러지 생산량에 구애를 받지 않는 한 최대출력으로 상시운전하는 것이 운용비용 절감에 유리하다. 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.

또한 열병합발전시스템의 열출력계획을 살펴보면 마찬가지로 폐열보일러나 슬러지 소각로와 마찬가지로 최대 출력을 내는 결과가 도출되었는데 이는 열병합발전시스템을 이용하여 공정열을 생산하므로써 동시에 전기를 얻을수 있는 유기관계로 인해 결과적으로 저압보일러를 가동하는 것보다 더욱 경제적이기 때문이라고 사료된다. 따라서 경제적 열생산의 우선순위는 대체적으로 폐열보일러와 슬러지 소각로, 열병합발전시스템, 보조보일러의 순서가 된다. 그림 3에 보조보일러의 열출력계획을 나타내었다. 철두부하시에 주로 발전량이 증가하는 모양을 볼 수 있다.

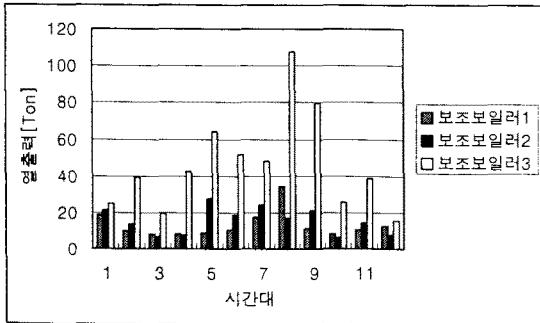


그림 3. 보조보일러의 열출력계획

그림 4와 5는 열병합발전시스템의 전기출력계획과 전력회사로부터의 전기구매계획을 나타내고 있다. 전기요금이 싼 심야시간에는 주로 전력을 생산하기보다는 구매하는 것이 경제적인을 알 수 있다.

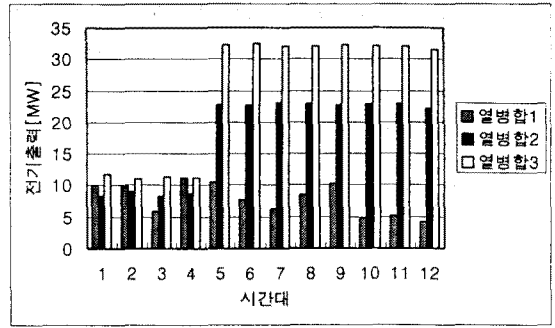


그림 4. 열병합발전시스템의 전기출력계획

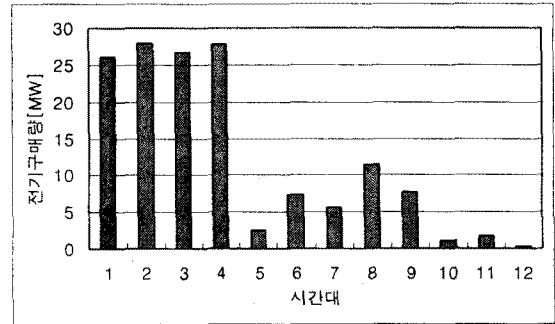


그림 5. 전기구매계획

5. 결 론

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

- (1) 제지공장용이라는 특수한 환경을 가진 열병합발전시스템에서의 최적운전계획수립을 위한 수리적 모델을 수립하였다.
- (2) 시간대별로 주 시스템과 각종 보조설비 및 전기에너지의 구매에 이르기까지 운전비를 최소화시키는 입장에서의 운전계획을 수립하였다.
- (3) 환경보호라는 국제적 추세에 발 맞추고 국내 환경법에도 위반되지 않도록 하기 위한 아황산가스의 처리비용을 목적함수에 고려하였다.
- (4) 최적운전계획을 위해 최적화 알고리즘으로서 유전알고리즘을 적용하는데 있어 효율적인 최적화를 위한 다양한 진화연산자를 이용하였다.
- (5) 각종 설비의 특징 및 기능에 비추어 수립된 운전계획을 분석해 볼 때 합리적인 운전계획이 수립되었음을 알 수 있었다.

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

(참 고 문 헌)

- [1]P. S. Pak and Suzuki : "Derivation of an Index for Evaluating Economics of Cogeneration Systems and Its Applications", International Journal of Energy Research, Vol. 13, pp. 149-156, 1989.
- [2]K. Ito, et al. : "Optimal Planning of a Super Waste Incineration Cogeneration Plant", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 119, pp. 903-909, 1997.
- [3]B. Seyedan, et al. : "Optimization of Waste Heat Recovery Boiler of a Combined Cycle Power Plant", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 118, pp. 561-564, 1996.
- [4]Mitsuo Gen, Runwei Cheng : "Genetic Algorithm and Engineering Design", A Wiley-Interscience Publication, 1997.