

소유권이 서로 다른 각종 보조설비가 연계된 종합 열병합발전 시스템의 일간운전계획 수립

이종범 · 류승현*

원광대학교 전기공학과, *영동대학교 전자공학과

A Daily Operation Scheduling of Total Cogeneration System Connected with Auxiliary Devices of Different Possession Right

Jong Beom Lee and Seung Heon Lyu*

Department of Electrical Engineering, Wonkwang University,

*Faculty of Electronic Engineering, Youngdong University

요 약

본 논문은 전력회사 소유의 열병합발전소와 난방공사 소유의 보조열원설비들이 서로 연계되어 열에너지를 공급해 주고 있는 종합 열병합발전시스템에서, 보조설비들의 최적규모산정 및 일간 최적운전계획 수립 기법을 제안하였다. 최적규모산정과 운전계획수립은 국가적인 측면에서 총 연료비가 최소가 되는 관점에서 수립하였고, 이를 증명하기 위하여 계절별(춘계, 하계, 동계) 및 종류별(평일, 휴일, 연휴)로 나누고 각각의 시뮬레이션 결과로부터 최적의 규모 및 운전계획을 수립하였다. 본 연구결과는 자사의 이익이 증대되도록 계획을 수립할 공산이 큰 종합 열병합발전시스템에서 국가적 측면에서의 기법과 가이드라인을 제시하였으므로 현장에서의 많은 활용이 기대된다.

Abstract— This paper describes the method decide to optimal sizing and operation scheduling of total cogeneration system which is interconnected with cogeneration unit of utility and auxiliary thermal devices of heating company. Optimal sizing and operation scheduling is established in order to minimize the fuel cost under national viewpoint. Simulations are carried out to show the reliability of method suggested by seasons and kinds. The simulated results can be effectively used as the guideline of operation scheduling between the utility and the heating company.

1. 서 론

열병합발전시스템은 전기에너지와 열에너지를 동시에 사용자에게 공급할 수 있는 시스템으로 일반 화력발전 시스템과 비교하여 단위용량은 적지만 훨씬 높은 효율을 갖고 있으며, 경우에 따라서는 80% 이상의 효율을 갖고 있어 일반적으로 종합에너지시스템(Total Energy System)으로 불리우고 있다. 이러한 열병합발전시스템은 우리나라에도 운전되고 있는데, 최근에는 그 효율성이 입증되어 전국의 대단위 공단에 건설할 예정에 있다.

열병합발전시스템은 전력회사가 소유하고 있는 전력회사용과 산업체가 개별회사 또는 공단에서 공동으로 사용하고 있는 산업체, 그리고 민간의 열공급을 우선하

는 민간용으로 대별할 수 있다. 이 가운데 전력회사용의 열병합발전시스템은 전기를 발생하여 전력수요처에 전기에너지를 공급하며, 동시에 발생한 열에너지는 난방공사가 소유하고 있는 보조열원설비의 운전과 함께 열부하에 열에너지를 공급하는 독특한 시스템을 갖고 있다. 지금까지의 열병합발전시스템에 관련된 연구는 주로 시스템의 규모선정과 경제급전 등에 관한 연구발표가 있었으며, 최적운전기법에 관한 발표는 일부에 국한되고 있다[1]-[8].

본 연구에서는 전력회사와 난방공사가 공동으로 열에너지를 공급하는 종합 열병합발전시스템에 대해, 국가적인 입장에서 에너지를 절약할 수 있는 보조열원설비의 최적규모 및 운전계획을 수립하려고 한다. 따라서 열병

합발전시스템의 일간 최적운전계획을 수립하고, 보조설비(보조 보일러)의 최적규모 및 최적구성방안을 제시하고자 한다. 여기서 일간 최적운전계획은 계절별(춘추계, 하계, 동계) 및 종류별(평일, 휴일, 연휴)로 나누어 열병합발전시스템의 총연료비를 최소화하도록 수립하였다.

마찬가지로 보조설비의 최적규모 및 최적구성방안도 열병합발전시스템의 총연료비를 최소화 하는 관점에서 수립하여 제시하였다. 대상 열병합발전시스템으로서는 현재 운전중인 B 복합화력발전소를 선택하였고, 보조설비는 B 복합화력발전소와 연계된 H 난방공사의 축열조 및 보조보일러를 선정하였다.

2. 열병합발전시스템의 최적운전계획

2-1. 최적운전 수리모델

B 복합화력발전소는 전기에너지를 생산할 뿐만 아니라 열에너지도 동시에 생산하여 H 난방공사의 축열조 및 보조보일러와 연계하여 열배관망을 통해 인근지역으로 열에너지를 공급하고 있다. 그리고 전력계통으로부터 전력과 열병합발전시스템으로부터 생산된 전기는 송전선로를 통하여 전기부하에 공급되며, 열에너지는 H 난방공사에 전량 판매하고 있다.

한편 H 난방공사에서는 B 복합화력발전소에서 열에너지를 구매한 후 열배관망을 이용하여 열부하에 공급 및 판매를 하고 있다. 여기에서 대부분의 열에너지는 B 복합화력발전소에서 H 난방공사의 열배관망을 통해 곧바로 열부하로 공급되지만, 일부의 열에너지는 먼저 축열조에 저장해 두었다가 필요시에 열에너지로 공급된다. 또한 별도의 보조보일러를 설치하여 여기서 생산한 열에너지를 열부하에 공급 한다. 따라서 B 복합화력발전소의 발전시스템을 열병합발전시스템으로 하고 H 난방공사의 축열조 및 보조보일러를 보조설비로 하였을 경우에, 보조설비가 연계된 열병합발전시스템에서의 전기 및 열 흐름도는 Fig. 1과 같이 표현될 수 있다.

Fig. 1에서 선은 열에너지의 흐름을 나타낸 것이며 화살표는 에너지가 흐르는 방향을 나타내고 있다. 여기서 전기부하는 1995년도의 발전실적을 나타내었다. 마찬가지로 열부하는 H 난방공사에서의 1995년도 열공급실적이 된다. 따라서 Fig. 1을 이용한 열병합발전시스템의 최적운전계획문제는 전기부하와 열부하가 미리 결정된 상태에서 전력계통으로부터의 공급 전력 열병합발전시스템의 전기출력, 열출력과 축열조 및 보조보일러의 출력을 최적으로 배분하는 문제로 귀착된다.

열병합발전시스템의 최적운전 수리모델을 위해 사용될 기호는 다음과 같다.

한편 $1[\text{MWh}] = 0.86[\text{Gcal}]$ 이므로 열병합발전시스템의

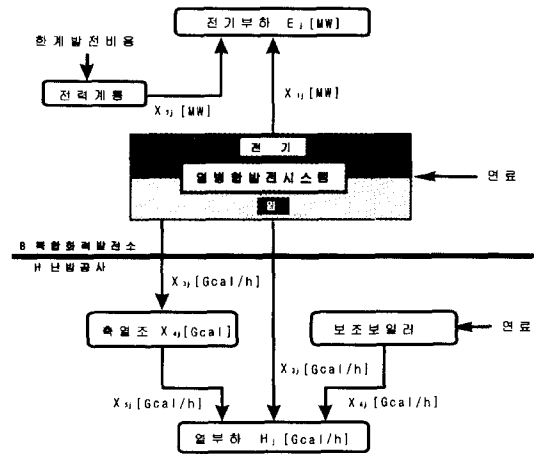


Fig. 1. Electricity and thermal energy flow in cogeneration system connected with auxiliary devices.

총연료비를 최소화하는 일간 최적운전계획의 목적함수는 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \text{Min}\{\text{Cost}\} \\ & = \text{Min}\{\text{열병합발전시스템의 연료비} - \text{열병합발전시스템의 열판매 수익}\} \\ & = \text{Min} \sum_{j=1}^N \left[\left[\frac{0.86X_{1j} + X_{2j} + X_{3j}}{\text{EFF}_{\text{cog}}} \right] F_{\text{cog}} + \right. \\ & \quad \left. X_{6j} \cdot F_{\text{aux}} + X_{7j} \cdot F_{\text{util}} \right] \cdot \text{DELT} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의 우변에서 첫째항은 시간구간 j에서 열병합발전시스템의 연료비를 나타내고, 둘째항은 H 난방공사에서의 보조보일러 연료비를 나타낸 것이다. 한편, 셋째항은 시간구간 j에서 전력계통으로부터의 한계발전비용을 고려한 전기에너지 비용이다. 따라서 목적함수는 이 세 가지 항목을 고려한 상태에서 어떤 배분방식이 국가적인 측면에서 총연료비를 최소화 시키는가를 구하는 것이 된다. 다시말해 복합화력발전소와 난방공사의 이해관계에 따라 어느쪽 열원의 출력을 정지시키거나 축소시켜 생산함으로써 자사의 이익을 우선적으로 계획하여 운용하는 나머지 사회사의 이익은 될지 몰라도 타사에는 막대한 손해를 끼치게 될 수 있다. 따라서 국가적으로는 하나의 에너지이므로 자사의 이익보다는 국가적인 입장에서 본 총 연료비를 최소화 시키는 것이 국가적인 에너지 절약 차원에서 매우 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

식 (1)의 목적함수에 대한 제약조건식은 다음과 같다.

열병합발전시스템의 전기출력 상하한에 의한 제약조건식

$$\text{COE}_{e1} \leq X_{1j} \leq \text{COE}_{e2} \quad (2)$$

Table 3. Marginal generation cost (for 1995).

1995년도 시간대별 한계발전비용

< 동 계 >

[원/kWh]

| 시간대 \ 일 구분 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 평 일 | 27.91 | 27.07 | 29.17 | 37.49 | 36.24 | 37.37 | 37.97 | 32.48 |
| 휴 일 | 23.63 | 23.82 | 23.87 | 24.17 | 24.28 | 24.03 | 24.92 | 24.34 |
| 연 휴 | 15.77 | 14.18 | 15.63 | 16.29 | 15.84 | 15.68 | 17.23 | 16.17 |

< 하 계 >

[원/kWh]

| 시간대 \ 일 구분 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 평 일 | 27.46 | 26.02 | 27.58 | 38.65 | 38.47 | 38.49 | 37.63 | 31.99 |
| 휴 일 | 23.94 | 22.91 | 23.21 | 24.76 | 25.07 | 25.20 | 24.89 | 24.84 |

< 준 · 추계 >

[원/kWh]

| 시간대 \ 일 구분 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 평 일 | 28.79 | 28.02 | 29.42 | 39.14 | 37.67 | 38.82 | 38.70 | 33.47 |
| 휴 일 | 25.52 | 26.79 | 26.05 | 25.28 | 25.55 | 25.87 | 24.65 | 25.05 |
| 연 휴 | 13.57 | 13.07 | 12.91 | 14.47 | 13.53 | 13.31 | 14.79 | 12.83 |

$$X_3 + X_5 + X_6 = H \tag{11}$$

전력계통으로 부터의 전기부하에 공급되는 전력제약식

$$X_7 \geq 0 \tag{12}$$

지금까지 주어진 제약조건 식 (2)~(12)를 만족시키는 목적함수인 식(1)로 최적운전계획을 수립하였다.

2-2. 기본입력자료

국가적인 차원에서 열병합발전시스템에서의 총연료비를 계산하였고, 앞에서 유도한 최적운전 수리모형을 이용하여 계절별 및 종류별로 일간 최적운전계획을 수립하는데 필요한 각종 운전자료로서 1995년도 B 복합화력발전소의 운전실적 및 H 난방공사의 운전실적을 사용하였다. 일간 최적운전계획수립을 위한 기본 입력 자료는 Table 1~Table 3과 같다.

3. 사례연구

본 연구에서는 일간운전계획을 수립하기 위하여 선형 계획법을 이용하였으며, 해의 정확성을 기하기 위하여 최근에 세계적으로 널리 쓰이고 있는 선형계획법용 소프트웨어인 LINDO를 이용하였다. 지금까지 설명한 모

델과 자료를 근거로 동계의 평일과 휴일 및 연휴별로 각각의 일간 최적운전계획을 수립하였으며, 계산결과를 나타내면 Table 4, Table 5, Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 표 및 그림에서 나타내는 X1~X7은 Fig. 1에서의 에너지 흐름을 각각 나타내고 있는 것이며, E 및 H는 식 (10)과 식 (11)의 값을 나타내고 있는 것이다.

Fig. 2의 동계 평일의 일간 최적운전계획을 보면, 열병합발전시스템의 연료단가가 보조보일러의 연료단가보다 훨씬 높고 전력계통으로부터의 한계발전비용도 전 시간대에 걸쳐 상대적으로 높아 전력계통으로부터는 전력을 공급받지 않으며, 열병합발전시스템으로부터 전량 전기부하로 전력을 공급한다. 또한 보조보일러

Table 4. Operation scheduling result in working days of winter season.

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|-----------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 38,507 만원 | 1 | 210 | 178 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 210 | 280 |
| | 2 | 220 | 188 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 220 | 290 |
| | 3 | 370 | 218 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 370 | 320 |
| | 4 | 530 | 298 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 530 | 400 |
| | 5 | 540 | 308 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 540 | 410 |
| | 6 | 540 | 298 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 540 | 400 |
| | 7 | 520 | 248 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 520 | 350 |
| | 8 | 340 | 178 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 340 | 280 |

Table 5. Operation scheduling result in holidays of winter season.

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 29,395 만원 | 1 | 210 | 178 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 210 | 280 |
| | 2 | 220 | 168 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 220 | 270 |
| | 3 | 320 | 188 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 320 | 290 |
| | 4 | 330 | 208 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 330 | 310 |
| | 5 | 330 | 208 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 330 | 310 |
| | 6 | 320 | 178 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 320 | 280 |
| | 7 | 315 | 208 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 315 | 310 |
| | 8 | 300 | 188 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 300 | 290 |

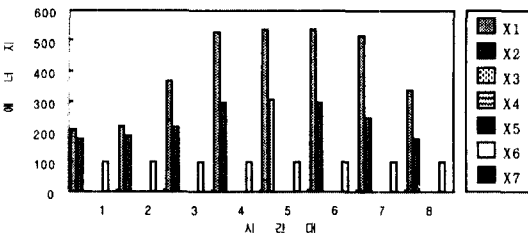


Fig. 2. Operation scheduling results in working days of winter season.

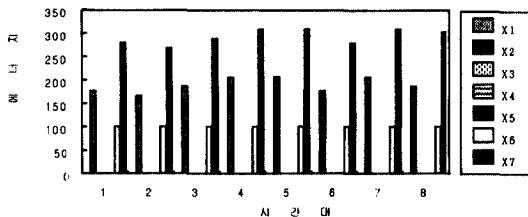


Fig. 3. Operation scheduling results in holidays of winter season.

는 전 시간대에 걸쳐 최대로 출력을 내며 나머지 공급해야 할 열 에너지는 열병합발전시스템으로부터 공급됨을 알 수 있다. 한편 축열조는 전혀 가동되지 않고 있다. 따라서 보조보일러를 전 시간대에 걸쳐 가동하는 방안이 국가적 차원에서 에너지 절약방안이 될 것으로 사료된다.

또한 동계의 휴일도 마찬가지로의 현상을 보이고 있으나 Fig. 3과 같이 연휴의 경우는 한계발전비용이 평일이나 휴일보다 훨씬 낮아 전기부하에는 전력계통으로부터 전력이 전량 공급되며, 보조보일러는 최대로 출력된다. 또한 축열조의 열에너지 저장량은 없는 것으로 보아 효율성이 없으며 다만 비상설비로 운전되는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

한편, 하계의 평일에 수립된 일간 최적운전계획의 계산결과를 Table 6 및 Fig. 4에 나타내었다. 하계 평일의 일간 최적운전계획을 보면 전기부하는 모두 열병합발전

Table 6. Operation scheduling result in working days of summer season.

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|-----|----|
| 19,197 만원 | 1 | 200 | 40 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 200 | 70 |
| | 2 | 195 | 40 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 195 | 70 |
| | 3 | 230 | 40 | 0 | 0 | 0 | 59 | 0 | 230 | 99 |
| | 4 | 400 | 40 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 400 | 90 |
| | 5 | 405 | 40 | 0 | 0 | 0 | 40 | 0 | 405 | 80 |
| | 6 | 415 | 40 | 0 | 0 | 0 | 25 | 0 | 415 | 65 |
| | 7 | 320 | 40 | 0 | 0 | 0 | 55 | 0 | 320 | 95 |
| | 8 | 230 | 40 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 230 | 90 |

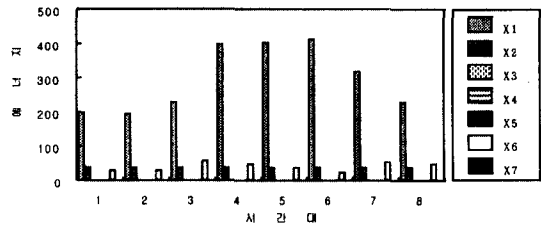


Fig. 4. Operation scheduling results in working days of summer season.

Table 7. Operation scheduling result in working days of spring and autumn season.

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 29,791 만원 | 1 | 220 | 148 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 220 | 250 |
| | 2 | 210 | 138 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 210 | 240 |
| | 3 | 360 | 168 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 360 | 270 |
| | 4 | 440 | 158 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 440 | 260 |
| | 5 | 440 | 128 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 440 | 230 |
| | 6 | 430 | 118 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 430 | 220 |
| | 7 | 400 | 128 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 400 | 230 |
| | 8 | 370 | 138 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 370 | 240 |

Table 8. Operation scheduling result in holidays of spring and autumn season.

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 38,507 만원 | 1 | 210 | 113 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 210 | 215 |
| | 2 | 200 | 103 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 200 | 205 |
| | 3 | 200 | 138 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 200 | 240 |
| | 4 | 220 | 138 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 220 | 240 |
| | 5 | 310 | 108 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 310 | 210 |
| | 6 | 270 | 103 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 270 | 205 |
| | 7 | 320 | 138 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 320 | 240 |
| | 8 | 260 | 128 | 0 | 0 | 0 | 102 | 0 | 260 | 230 |

시스템으로부터 공급되며, 열부하가 적으므로 열병합발전시스템에서는 최저로만 열 에너지를 발생하여 열부하에 공급한다. 그리고 이와 협조하면서 보조보일러가 동작하여 나머지 열 에너지를 공급한다. 하계 휴일인 경우

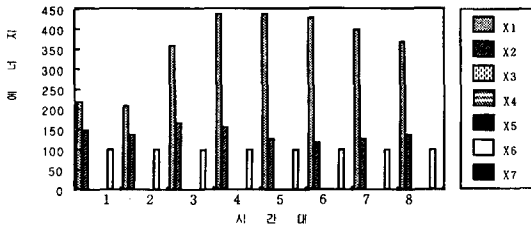


Fig. 5. Operation scheduling results in working days of spring and autumn season.

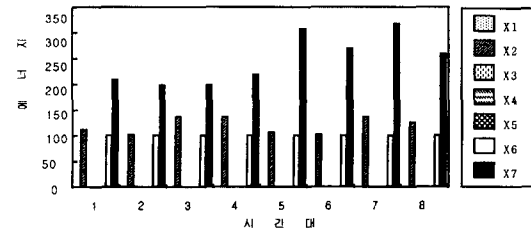


Fig. 6. Operation scheduling results in holidays of spring and autumn season.

도 비슷한 양상을 보이고 있다.

또한 춘추계의 평일과 연휴별로 각각의 일간 최적운전계획과 최소 총연료비 계산결과를 Table 7과 Table 8 및 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

춘·추계 평일의 일간 최적운전계획을 보면 전기부하는 모두 열병합발전시스템에서 공급되며 열부하는 보조보일러를 최대로 운전하여 공급한다. 그리고 모자라는 열 에너지는 열병합발전시스템으로부터 공급한다. 한편 춘추계의 휴일도 비슷한 현상을 보이고 있으나 연휴에는 한계발전비용이 낮으므로 전기부하는 모두 전력계통으로부터 공급되며 대신 열부하는 보조보일러를 최대로 운전하여 공급하는 동시에 모자라는 열에너지는 열병합발전시스템으로부터 공급된다.

4. 최적 열원설비 구성

4-1. 최적 보조설비 구성

앞절에서의 일간 최적운전계획 결과를 볼 때 보조보일러는 출력할 수 있는 한 최대한의 출력을 내고 있으며 축열조는 운전되지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 국가적인 에너지 절감 차원에서 총 연료비를 절감시키기 위해 축열조는 비상수단용으로 운전되는 것이 바람직한 것으로 사료된다. 그리고 보조보일러는 최대한의 출력을 내도록 운전되는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

결국 보조보일러는 열병합발전시스템의 총 연료비를 절감을 위한 보조설비임을 알 수 있으며, 열병합발전시스템에서 열 에너지 공급하는 것 보다 우선적으로 운전

Table 9. Operation scheduling result in working days of winter season. (Output of auxiliary boiler is 200[Gcal/h].)

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 34,577 만원 | 1 | 210 | 80 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 210 | 280 |
| | 2 | 220 | 90 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 220 | 290 |
| | 3 | 370 | 120 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 370 | 320 |
| | 4 | 530 | 200 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 530 | 400 |
| | 5 | 540 | 210 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 540 | 410 |
| | 6 | 540 | 200 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 540 | 400 |
| | 7 | 520 | 150 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 520 | 350 |
| | 8 | 340 | 80 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 340 | 280 |

Table 10. Operation scheduling result in working days of winter season. (Output of auxiliary boiler is 300[Gcal/h].)

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|
| 31,047 만원 | 1 | 210 | 0 | 40 | 118 | 0 | 280 | 0 | 210 | 280 |
| | 2 | 220 | 0 | 40 | 235 | 0 | 290 | 0 | 220 | 290 |
| | 3 | 370 | 20 | 20 | 294 | 0 | 300 | 0 | 370 | 320 |
| | 4 | 530 | 40 | 0 | 110 | 60 | 300 | 0 | 530 | 400 |
| | 5 | 540 | 74 | 0 | 0 | 36 | 300 | 0 | 540 | 409 |
| | 6 | 540 | 100 | 0 | 0 | 0 | 300 | 0 | 540 | 400 |
| | 7 | 520 | 50 | 0 | 0 | 0 | 300 | 0 | 520 | 350 |
| | 8 | 340 | 40 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 340 | 280 |

Table 11. Operation scheduling result in working days of winter season. (Output of auxiliary boiler is 350[Gcal/h].)

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|-------------|-----|-----|----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|
| 4,059 만원 | 1 | 210 | 40 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 210 | 280 |
| | 2 | 220 | 38 | 2 | 5 | 0 | 252 | 0 | 220 | 290 |
| | 3 | 370 | 0 | 40 | 122 | 0 | 320 | 0 | 370 | 320 |
| | 4 | 530 | 40 | 0 | 92 | 10 | 350 | 0 | 530 | 400 |
| | 5 | 540 | 40 | 0 | 31 | 20 | 350 | 0 | 540 | 410 |
| | 6 | 540 | 40 | 0 | 0 | 10 | 350 | 0 | 540 | 400 |
| | 7 | 520 | 40 | 0 | 0 | 0 | 310 | 0 | 520 | 350 |
| | 8 | 340 | 40 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 340 | 280 |

되어야 할 설비라고 할 수 있다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 보조보일러는 항상 최대로 운전되고, 비상용 열공급원으로 축열조를 운전하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

4-2. 최적 보조설비 규모

한편 보조보일러의 최대출력은 어느 정도가 최적인가를 알아보기 위해, 최대출력의 상한값을 변화시켜 가면서 총 연료비가 최소로 되는 경우의 최대출력을 동계 평일의 부하를 기준으로 비교 검토 하였다. 먼저 보조보일러의 출력이 200[Gcal/h]인 경우부터 시작하여

Table 12. Operation scheduling result in working days of winter season. (Output of auxiliary boiler is 400[Gcal/h].)

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 30,516 만원 | 1 | 210 | 40 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 210 | 280 |
| | 2 | 220 | 40 | 0 | 0 | 0 | 250 | 0 | 220 | 290 |
| | 3 | 370 | 40 | 0 | 0 | 0 | 280 | 0 | 370 | 320 |
| | 4 | 530 | 40 | 0 | 0 | 0 | 360 | 0 | 530 | 400 |
| | 5 | 540 | 40 | 0 | 0 | 0 | 370 | 0 | 540 | 410 |
| | 6 | 540 | 40 | 0 | 0 | 0 | 360 | 0 | 540 | 400 |
| | 7 | 520 | 40 | 0 | 0 | 0 | 310 | 0 | 520 | 350 |
| | 8 | 340 | 40 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 340 | 280 |

Table 13. Operation scheduling result in working days of winter season. (Output of auxiliary boiler is 500[Gcal/h].)

| 총 연료비 | 시간대 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | E | H |
|--------------|-----|-----|----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| 30,516 만원 | 1 | 210 | 40 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 210 | 280 |
| | 2 | 220 | 40 | 0 | 0 | 0 | 250 | 0 | 220 | 290 |
| | 3 | 370 | 40 | 0 | 0 | 0 | 280 | 0 | 370 | 320 |
| | 4 | 530 | 40 | 0 | 0 | 0 | 360 | 0 | 530 | 400 |
| | 5 | 540 | 40 | 0 | 0 | 0 | 370 | 0 | 540 | 410 |
| | 6 | 540 | 40 | 0 | 0 | 0 | 360 | 0 | 540 | 400 |
| | 7 | 520 | 40 | 0 | 0 | 0 | 310 | 0 | 520 | 350 |
| | 8 | 340 | 40 | 0 | 0 | 0 | 240 | 0 | 340 | 280 |

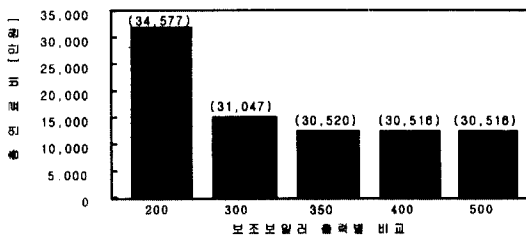


Fig. 7. Comparison of output of auxiliary boilers.

300[Gcal/h], 350[Gcal/h], 400[Gcal/h], 500[Gcal/h]일 때를 비교 분석하였다. Table 9~Table 13은 이 결과를 나타낸 것이다. 한편 보조보일러의 최대 출력별 총 연료비를 상호 비교한 것을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7을 보면 보조보일러의 최대출력이 350[Gcal/h]까지는 계속 총 연료비가 감소되지만 400[Gcal/h] 이상일 경우부터 총 연료비의 계속적인 감소가 정지함을 볼 수 있다. 따라서 보조보일러의 최대출력 한도는 400[Gcal/h]이 가장 최적규모임을 알 수 있다.

5. 결 론

계절별 및 종류별로 일간 최적운전계획의 수립 결과를 볼 때, 국가적인 측면에서 열병합발전시스템의 총연

료비를 절감하기 위해서는 보조보일러를 가능한 한 최대 출력하도록 운전하고, 나머지는 축열조보다 열병합발전시스템에서 바로 열에너지를 열부하에 공급하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

아울러 한계발전비용이 싼 연휴같은 경우에는 전기부하는 전력계통으로부터 공급되는 것이 바람직하며, 한계비용이 비싼 평일이나 휴일의 경우는 열병합발전시스템에서 전기부하에 전력을 공급하는 것이 바람직한 것으로 나왔다. 그리고 보조보일러의 적정 최대출력한도는 총 연료비의 증감을 분석하여 볼 때 400[Gcal/h] 부근이 가장 적절함을 알 수 있었다.

사용기호

- N : 일간 최적운전계획시 시간구간의 총수 (N=8)
- DEL T : 각 시간구간의 길이 (DEL T=3[Hour])
- j : 각 시간구간의 색인번호
- X_{1j} : 시간구간 j에서 열병합발전시스템의 전기출력 [MW]
- X_{2j} : 시간구간 j에서 열병합발전시스템에서 열배관망을 통해 열부하로 공급되는 열에너지 [Gcal/h]
- X_{3j} : 시간구간 j에서 열병합발전시스템에서 축열조로 공급하는 열에너지 [Gcal/h]
- X_{4j} : 시간구간 j 말기에 축열조에 저장된 열에너지 [Gcal/h]
- X_{5j} : 시간구간 j에서 축열조에서 열배관망을 통해 열부하로 공급되는 열에너지 [Gcal/h]
- X_{6j} : 시간구간 j에서 보조보일러에서 열배관망을 통해 열부하로 공급되는 열에너지 [Gcal/h]
- X_{7j} : 시간구간 j에서 전력계통으로부터 전기부하로의 공급전력 [MW]
- E_j : 시간구간 j에서의 전기부하 [MW]
- H_j : 시간구간 j에서의 열부하 [Gcal/h]
- EFF_{avg} : 열병합발전시스템의 평균 종합효율 [P.U.]
- F_{avg} : 열병합발전시스템의 평균 연료단가 [원/Gcal]
- F_{max} : 보조보일러의 평균 연료단가 [원/Gcal]
- F_{th} : 시간구간 j에서의 한계 발전 비용 [원/MWh]
- SELL : 한국전력공사에서 H난방공사의 열판매 단가 [원/Gcal]
- COE_L : 열병합발전시스템의 최소 전기출력 [MW]
- COE_H : 열병합발전시스템의 최대 전기출력 [MW]
- COT_L : 열병합발전시스템의 최소 열출력 [Gcal/h]
- COT_H : 열병합발전시스템의 최대 열출력 [Gcal/h]
- CO_L : 열병합발전시스템의 최소 종합출력 [Gcal/h]
- CO_H : 열병합발전시스템의 최대 종합출력 [Gcal/h]

STG_{MAX} : 축열조의 최대 에너지저장량 [Gcal]
 STG_L : 축열조의 단위시간당 최소 축열 가능량 [Gcal/h]
 STG_H : 축열조의 단위시간당 최대 축열 가능량 [Gcal/h]
 RAD_L : 축열조의 단위시간당 최소 방열 가능량 [Gcal/h]
 RAD_H : 축열조의 단위시간당 최대 방열 가능량 [Gcal/h]
 EFF_{STG} : 축열조의 축열 효율 [P.U.]
 EFF_{rad} : 축열조의 방열 효율 [P.U.]
 AUX_L : 보조보일러의 최소 열출력 [Gcal/h]
 AUX_H : 보조보일러의 최대 열출력 [Gcal/h]

참고문헌

1. H.B. Puttgen and *et al.*, "Optimum Scheduling Procedure for Cogenerating Small Power Producing", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4. No. 3, pp. 957-964, Aug. (1989).
2. H. Ghoudjehbklou and *et al.*, "Optimization Topics Related to Small Power Producing Facilities Operating under Energy Spot Pricing Polices", IEEE Trans. on Power System, Vol. PWRs-2, No. 2, pp. 269-302, May. (1987).
3. M.L. Baughman and *et al.*, "Optimizing Combined Cogeneration and Thermal Storage Systems: An Engineering Economics Approach", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 3, pp. 974-980, Aug. (1989).
4. 이종범, 류승현, 김준현, "A Daily Operation Scheduling on Cogeneration System with Thermal Storage Tank", 일본전기학회 논문지, Vol. 114-B, pp. 1295-1302, Dec. (1994).
5. 류승현, 이종범, 김준현, "열병합발전시스템의 단기 운전계획을 위한 수리적 모델에 관한 연구", 대한전기학회 논문지. 제43권 제5호, pp. 721-729, May. (1994).
6. 이종범, "열병합발전시스템의 최적운전계획수립을 위한 수리적 모형수립에 관한 연구", 기초전력공학 공동연구소 보고서, July. (1994).
7. S. Horii. *et al.*, "Optimal Planning of Gas Turbine Co-Generation Plants Based on Mixed-Integer Linear Programming", Int'l Journal of Energy Research, Vol. 11, pp. 507-518, (1987).
8. Masatoshi Sakawa, "Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization", Hiroshima University Higashi-Hiroshima, Japan. (1993).