'96 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (1996. 7. 22~24)

민생용 열병합발전시스템의 최적운전에 관한 연구

류 승 헌* 이 종 범 김 창 수
(한전전력연구원*) (원광대) (한국전기연구소)

A Study on the Optimal Operation of the Private Cogeneration System

Seung-Heon Lyu* Jong-Bum Lee Chang-Soo Kim
(KEPRI*) (Wonkwang Univ.) (KERI)

Abstract - This paper presents the optimal operation scheduling of the private cogeneration system connected with auxiliary equipments. And the optimal size of auxiliary equipments is determined through evaluations of the minimum operation cost. The optimal operation scheduling is established by using the linear programming method. Simulation results show that the auxiliary boiler is operated as an economical facility but the thermal storage tank is used as a back up facility for emergency.

1. 서 론

열과 전기를 동시에 생산하는 열병합발전시스템 중에서 지역난방 등의 목적으로 민간사업자가 운영하는 민생용 열병합발전시스템의 최적운전계획은 민간사업자의 이익을 극대화하는 동시에 국가전체의 에너지비용을 절감하도록 수립되는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 보조보일러와 축열조를 가진 민생용 열병합발전시스템에서, 민간사업자의 이익을 최대화하는 동시에 국가전체의 에너지비용을 최소화하는 최적운전계획 수리모델을 제안하고, 그에 따라 최적운전계획을 수립하였다. 이를 위해 전력계통의 한계발전비용과 민생용 열병합발전시스템의 전기생산비용을 비교하여 전기출력을 배분하였다. 또한 보조보일러와 축열조의 용량 및 운전비용을 고려하여 열출력을 결정하였다. 한편 보조설비의 최적규모를 결정하기 위해 먼저 보조설비의 용량을 여러가지로 변화시키면서 각각의 경우에 대한 최적운전계획을 수립하였다. 보조설비 용량별 최적운전계획 결과를 분석함으로써 보조설비 최적규모를 산정하였다.

2. 한계발전비용을 고려한 최적운전계획 수리모델

민생용 열병합발전시스템은 축열조 및 보조보일러와 연계하여 인근지역으로 열에너지를 공급하고, 전기는 송전선로를 통하여 전력계통으로 공급한다. 이때 대부분의 열에너지는 민생용 열병합발전시스템에서 곧바로 열부하로 공급되지만 일부의 열에너지는 먼저 축열조에 저장후 공급되며, 별도의 보조보일러를 가동하여 생산한 열에너지를 열부하에 공급하기도 한다.

따라서 축열조 및 보조보일러가 연계된 민생용 열병합발전시스템에서의 전기 및 열 흐름도는 그림 1과 같이 된다.

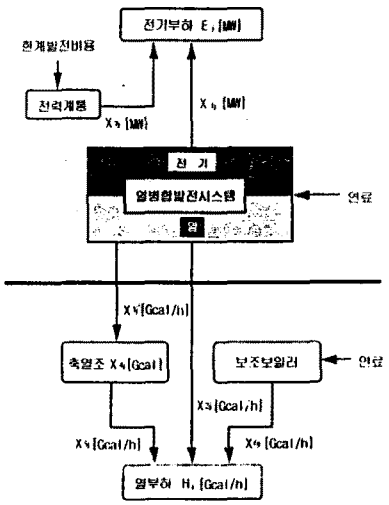

그림 1 보조설비가 연계된 민생용 열병합발전시스템에서의 전기 및 열 흐름도

그림 1에서 화살표는 에너지가 흐르는 방향을 나타내며, 전기부하는 전력계통에서의 경제급전 계산결과에 의한 민생용 열병합발전시스템의 발전요구량을 나타낸 것이다. 왜냐하면 민생용 열병합발전시스템에서는 발전출력을 임의로 결정하지 않고 열병합발전시스템에서의 전기생산비용과 전력계통에서의 한계발전비용을 비교하여 총 에너지비용이 최소화 되도록 발전출력을 다시 결

정하기 때문이다. 민생용 열병합발전시스템의 최적운전계획 수리모델에서 사용될 기호는 표 1과 같다.

표 1 최적운전계획 수리모델에서 사용될 기호

N : 일간 최적운전계획시 시간구간의 총수 (N=8)
$DELT$: 각 시간구간의 길이 (DELT=3[Hour])
j : 각 시간구간의 색인번호
X_{1j} :시간구간 j에서 열병합발전시스템의 전기출력 [MW]
X_{2j} : 열배관망을 통해 열부하로 직접 공급되는 열에너지[Gcal/h]
X_{3j} : 축열조로 공급되는 열에너지 [Gcal/h]
X_{4j} : 시간구간 J 말기에 축열조에 저장된 열에너지 [Gcal]
X_{5j} : 축열조에서 열부하로 공급되는 열에너지 [Gcal/h]
X_{6j} : 보조보일러에서 열부하로 공급되는 열에너지 [Gcal/h]
X_{7j} : 전력계통에서 직접 전기부하로 공급되는 전기에너지 [MW]
E_j : 시간구간 J에서의 전기부하 [MW]
H_j : 시간구간 J에서의 열부하 [Gcal/h]
EFF_{cog} : 열병합발전시스템의 평균종합효율 [P.U.]
F_{cog} : 열병합발전시스템의 평균연료단가 [원/Gcal]
COE_L : 열병합발전시스템의 최소전기출력 [MW]
COE_H : 열병합발전시스템의 최대전기출력 [MW]
COT_L : 열병합발전시스템의 최소열출력 [Gcal/h]
COT_H : 열병합발전시스템의 최대열출력 [Gcal/h]
CO_L : 열병합발전시스템의 최소종합출력 [Gcal/h]
CO_H : 열병합발전시스템의 최대종합출력 [Gcal/h]
F_{aux} : 보조보일러의 평균연료단가 [원/Gcal]
AUX_L : 보조보일러의 최소열출력 [Gcal/h]
AUX_H : 보조보일러의 최대열출력 [Gcal/h]
EFF_{STG} : 축열조의 축열효율 [P.U.]
STG_L : 단위시간당 최소 축열가능량 [Gcal/h]
STG_H : 단위시간당 최대 축열가능량 [Gcal/h]
EFF_{rad} : 축열조의 방열효율 [P.U.]
RAD_L : 단위시간당 최소 방열가능량 [Gcal/h]
RAD_H : 단위시간당 최대 방열가능량 [Gcal/h]
STG_{MAX} : 축열조의 최대 에너지저장량 [Gcal]
F_{ub} : 시간구간 J에서의 한계발전비용 [원/MWh]

한편 1[MWh]=0.86[Gcal]이므로, 한계발전비용을 고려한 민생용 열병합발전시스템의 일간 최적운전계획 목적함수식은 다음과 같이 표현된다.

Min {Cost}

= Min { 열병합발전시스템의 연료비 + 보조보일러의 연료비 + 전력계통에서의 발전비용 }

$$= Min \sum_{j=1}^{N} [\,[\,\frac{0.86X_{1j}+X_{2j}+X_{3j}}{EFF_{cog}}\,]\cdot F_{cog}+X_{6j}\cdot F_{aux} + X_{7j}\cdot F_{ub}]\cdot DELT \quad \cdots\cdots (1)$$

식 (1)의 목적함수에 대한 제약조건식은 다음과 같다.

○ 열병합발전시스템의 전기출력 상하한에 의한 제약

$$COE_L \le X_{1j} \le COE_H \quad \cdots\cdots (2)$$

○ 열병합발전시스템의 열출력 상하한에 의한 제약

$$COT_L \le X_{2j}+X_{3j} \le COT_H \quad \cdots\cdots (3)$$

○ 열병합발전시스템의 전기출력과 열출력을 합한 종합출력의 상하한에 의한 제약

$$CO_L \le X_{1j}+X_{2j}+X_{3j} \le CO_H \quad \cdots\cdots (4)$$

○ 축열조의 열에너지 저장량에 의한 제약

$$0 \le X_{4j} \le STG_{MAX} \quad \cdots\cdots (5)$$

(여기서, $X_{4j}=X_{4j-1}+(EFF_{stg}\cdot X_{3j}-\frac{X_{5j}}{EFF_{rad}})\cdot DELT$)

○ 축열조의 단위시간당 축방열가능량에 의한 제약

$$STG_L \le EFF_{stg}\cdot X_{3j} \le STG_H \quad \cdots\cdots (6)$$

$$RAD_L \le \frac{X_{5j}}{EFF_{rad}} \le RAD_H \quad \cdots\cdots (7)$$

○ 보조보일러의 출력에 의한 제약

$$AUX_L \le X_{6j} \le AUX_H \quad \cdots\cdots (8)$$

○ 전기부하에 의한 제약

$$X_{1j}+X_{7j}=E_j \quad \cdots\cdots (9)$$

○ 열부하에 의한 제약

$$X_{2j}+X_{5j}+X_{6j}=H_j \quad \cdots\cdots (10)$$

이상에서 한계발전비용을 고려한 민생용 열병합발전시스템의 일간 최적운전계획 수리모델을 수립하였다.

3. 사례연구

앞에서 유도한 최적운전계획 수리모델을 이용하여 요일별(평일, 휴일 및 연휴)로 일간 최적운전계획을 수립하고 최소 에너지비용을 산출하였으며, 보조설비의 최적규모를 산정하였다.

3.1 입력자료

요일별로 일간 최적운전계획을 수립하기 위한 입력자료는 표 2, 표 3과 같다.

표 2 기본입력자료

N : 8, $DELT$: 3 [Hour], EFF_{cog} : 0.6131 [P.U], F_{cog} : 15707.6 [원/Gcal], COE_L : 0 [MW], COE_H : 600 [MW], COT_L : 40 [Gcal/h], COT_H : 430 [Gcal/h], CO_L : 40 [Gcal/h], CO_H : 890 [Gcal/h], F_{aux} : 8909.8 [원/Gcal], AUX_L : 0 [Gcal/h], AUX_H : 102 [Gcal/h], EFF_{STG} : 0.98 [P.U.], STG_L : 0 [Gcal/h], STG_H : 160 [Gcal/h], EFF_{rad} : 0.98 [P.U.], RAD_L : 0 [Gcal/h], RAD_H : 160 [Gcal/h], STG_{MAX} : 1600 [Gcal]

표 3 요일별 및 시간대별 한계발전비용 [원/MWh]

요일 \ 시간	1	2	3	4	5	6	7	8
평 일	27910	27070	29170	37490	36240	37370	37970	32480
휴 일	23630	23820	23870	24170	24280	24030	24920	24340
연 휴	15770	14180	15630	16290	15840	15680	17230	16170

3.2 요일별 최적운전계획

요일별로 각각의 일간 최적운전계획을 수립하고 총 에너지비용을 계산한 결과를 표 4, 표 5 및 표 6에 나타내었다. 표 4의 평일 최적운전계획 수립결과를 보면 전력계통으로부터의 한계발전비용이 전 시간구간에 걸쳐 열병합발전시스템의 전기생산단가보다 상대적으로 높으므로 열병합발전시스템에서 생산된 전기로 전기부하를 충당하고 있다. 그러나 보조보일러의 연료단가는 전 시간구간에 걸쳐 열병합발전시스템의 열생산단가보다 상대적으로 낮으므로 가능하면 보조보일러를 최대로 가동하고 있음을 알 수 있다. 이 경우 축열조는 전혀 가동되지 않았다.

한편 표 5의 휴일은 평일과 같은 현상을 보이고 있으나, 표 6의 연휴의 경우에는 한계발전비용이 평일이나 휴일보다 매우 낮고 열병합발전시스템의 전기생산단가보다 낮으므로 전기부하를 전력계통으로부터 전량 공급하였다. 이때에도 보조보일러는 최대로 가동되었으며 축열조는 전혀 가동되지 않았다.

표 4 평일의 최적운전계획 수립결과

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

표 5 휴일의 최적운전계획 수립결과

총비용 (만원)	시간 구간	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	E	H
29,395	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

표 6 연휴의 최적운전계획 수립결과

총비용 (만원)	시간 구간	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	E	H
25,094	1	0	178	0	0	0	102	210	210	280
	2	0	168	0	0	0	102	220	220	270
	3	0	188	0	0	0	102	320	320	290
	4	0	208	0	0	0	102	330	330	310
	5	0	208	0	0	0	102	330	330	310
	6	0	178	0	0	0	102	320	320	280
	7	0	208	0	0	0	102	315	315	310
	8	0	188	0	0	0	102	300	300	290

3.3 보조설비 최적규모

앞에서의 요일별 최적운전계획 결과를 볼 때 축열조는 비상사태에 대비한 후비 열공급설비의 역할만을 하였으므로 최적규모 산정대상에서 제외하였다. 그러나 보조보일러는 에너지비용 절감을 위한 열공급설비로 운전되었으므로, 보조보일러의 용량을 여러가지로 변화시키면서 총 에너지비용의 변화추이를 관찰함으로써 보조보일러의 최적규모를 산정하였다. 이를 위해 평일의 부하조건에 보조보일러의 용량이 200[Gcal/h], 300[Gcal/h], 350[Gcal/h], 400[Gcal/h], 500[Gcal/h] 인 경우를 상정하고 각각의 일간 최적운전계획을 수립하였으며, 보조보일러의 용량별 에너지비용을 그림 2에 나타내었다. 그림 2를 보면 보조보일러의 용량이 350[Gcal/h]까지는 총 에너지비용이 감소하지만 400[Gcal/h] 이상이 되면 에너지비용이 더이상 감소하지 않았다. 따라서 보조보일러의 최적규모는 400[Gcal/h]임을 알수 있다.

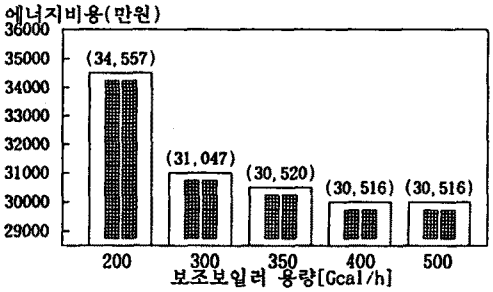

그림 2 보조보일러 용량별 에너지비용

4. 결 론

요일별로 일간 최적운전계획을 수립하고, 보조설비의 최적규모를 산정한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 민간사업자의 이익을 최대화하는 동시에 국가전체의 에너지비용을 최소화하는 민생용 열병합발전시스템의 최적운전계획 수리모델을 제안하고 그에 따라 일간 최적운전계획을 수립함으로써 본 논문에서 제안한 최적운전계획 수리모델의 유용성을 입증하였다.

(2) 연료비용이 상대적으로 저렴한 보조보일러는 경제적인 열에너지 생산을 위해 운전되었으나, 축열조는 후비 열공급원으로 운용됨을 알 수 있다.

(3) 총 에너지비용을 최소화하는 보조보일러 최적 설비규모는 400[Gcal/h]로 산정되었다.

참 고 문 헌

[1] Seung-Heon Lyu and et al., "A Daily Operation Scheduling of Cogeneration System with a Thermal Storage Tank," 日本電氣學會論文誌B(電力/エネルギー部門誌), 114卷 12☒, pp.1295~1302, 1994.12.

[2] 류승헌, 김준현, "열병합발전시스템의 투자비용 회수기간 산정기법 개선," 대한전기학회 논문지, 제 43권 9호, pp.1412~1421, 1994.9.