2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

서로다른 발전방식으로 운전되는 산업용 열병합발전시스템의 최적운전계획 수립

정지훈* 이종범 오성근
원광대학교 원광대학교 전주공업대학

Operation Scheduling of Industrial Cogeneration System with Each other Generation Mode

*Ji-Hoon Jeong *Jong-Beom Lee. **Sung-Keun Oh
*Wonkwang University. **Jeonju Tech College

Abstract - This paper describes the strategy of a daily optimal operational scheduling on cogeneration systems with each other generation mode. The cogeneration systems consists of three generators, auxiliary devices which are three auxiliary boilers, two waste boilers and three sludge incinerators. One unit that using the back pressure turbin generates the electrical and the thermal energy. The other two units that using the extraction condensing turbine generate the energy. Auxiliary devices operate to supplement the thermal energy to the thermal load with three units. The cogeneration system has a large capacity which is able to supply enough the thermal energy to the thermal load, however the electric power generated is insufficient to satisfy the electrical load. Therefore the insufficient electric energy is supplemented by buying electrical energy from the utility. Simulation was carried out using optimization toolbox. The result reveals that the proposed modeling and strategy can be effectively applied to cogeneration systems with each other generation mode.

1. 서 론

열병합발전시스템의 건설 및 운전이 급증하고있는 실정임에도 불구하고 아직까지 열에너지 및 전기에너지를 적절하게 배분시킬 수 있는 운전기법의 개발이 미흡하며, 특정 열병합발전시스템에 적용 가능한 수리 모델은 수립되어 있지만 다른 열병합발전시스템에 적용시 각 설비들의 용량과 운전특성이 서로 다르기 때문에 최적운전계획을 수립하는데 어려운 실정에 있다.[1][2] 본 논문에서는 증기 특성을 이용하여 배압터빈방식과 추기복수터빈방식이 혼합되어 발전하는 열병합발전시스템의 수리모델을 수립하였다.[3][4] 본 논문에서 수립된 수리모형은 optimization toolbox를 이용하여 최적운전계획을 수립하였다.[4] 본 논문에서 수립된 수리모형과 최적운전계획 기법 실제 산업현장에 적용할 수 있으며, 이와 유사한 열병합발전시스템에서도 증기의 엔탈피 값만 수정한다면 적용될 수 있다. 또한 본 논문에서 제안된 최적운전기법을 통해 에너지 비용의 절감을 통한 산업체의 제조원가를 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

2 수리모델 수립

본 논문은 1기의 배압터빈방식과 2기의 추기복수터빈방식이 혼합되어 발전하는 열병합발전시스템으로서 보조설비로서 보조보일러, 폐열 보일러, 슬러지 소각로를 갖는 산업용 열병합발전시스템을 대상으로 하였다. 배압터빈방식은 보일러에서 발생한 고온 고압의 과열증기를 터빈에 공급하여 터빈 내부의 팽창에 의해 전력을 생산하며, 배출되는 저압증기는 열부하에 공급되어 공정에 이용된다. 반면, 추기복수터빈방식은 고압터빈 내에서 팽창하는 증기에 의해 전력을 생산하고, 그 증기의 일부를 추기하여 열부하로 사용하고 나머지 증기는 저압터빈에서 다시 한번 증기 팽창을 하여 전력을 생산한 뒤 복수기에서 응축된다. 열병합발전설비와 각종 보조설비들이 연계된 상태에서의 에너지 흐름도를 나타내면 그림 1과 같다. 여기에서 에너지 흐름은 화살표로 나타내었으며 반대방향으로 에너지 흐름은 없는 것으로 하였다. 열병합발전시스템에서 생산된 증기는 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로에서 생산된 증기와 함께 열부하가 요구하는 적절한 온도와 압력으로 과열도를 조절한 후 열부하에 공급된다. 열병합발전시스템에서 생산된 전력은 전기부하에 공급하며, 부족시 전력회사로부터 구매할 수 있지만 판매는 없는 것으로 가정하였다. 수리모델을 수립하기 위하여 기본 가정을 세운 후 아래와 같이 목적함수와 제약조건을 수립하였다.

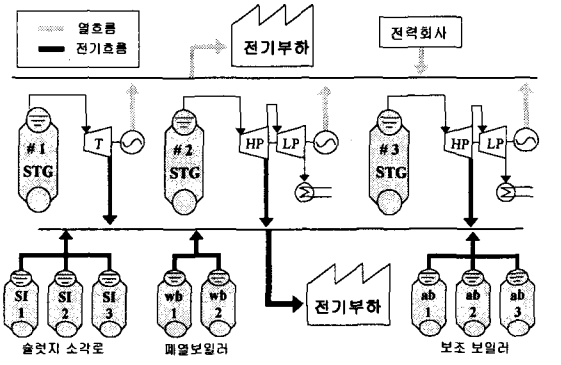

그림 1. 에너지 흐름도

2.1 기본가정

(1) 열병합발전시스템에서 생산된 모든 증기는 각각 모든 시간대에서 같은 증기특성을 갖는다.
(2) 보조설비들에서 생산된 증기와 열병합발전시스템에서 생산된 증기는 모든 시간대에서 같은 증기특성을 갖는다.
(3) 열역학 제 1법칙인 에너지 보존의 법칙을 적용하여 생산 증기의 열 손실, 마찰손실, 기타 손실은 없는 것으로 가정한다.
(4) 열병합발전시스템은 고장 및 정지하지 않으며, 초기 기동은 고려하지 않고 전부터 계속 운전되고 있다고 가정한다.
(5) 전기부하와 열부하는 미리 예측 되는것으로 가정한다.

2.2 목적함수 수립

열병합발전시스템의 최적운전계획을 수립하기 위하여 구매전력 비용과 열병합발전시스템을 비롯한 보조설비들의 연료비용의 합이 최소가 되는것을 목적함수로 하였다.

$$\min C = \sum_{k=1}^{N}\Big[C_{buy}(k) + \sum_{i=1}^{3} C_{coi}(k) + \sum_{i=1}^{3} C_{abi}(k) + \sum_{i=1}^{3} C_{SIi}(k) + \sum_{i=1}^{2} C_{wbi}(k)\Big] \cdot t \qquad (1).$$

2.2.2 구매전력

구매전력비용은 전력회사로부터 구매한 전력량에 수전지점에서부터의 송전효율을 고려하여 식 (2)와 같이 나타내었다. 구매전력 단가는 경부하, 중부하, 최대부하 시간대별로 각각 서로 다른 산업용전력을 적용하였으며 계절은 춘·추계를 기준으로 하였다.

$$C_{buy}(k) = BUY(k) \cdot \frac{1}{\varepsilon_{ut}} \cdot E_{buy}(k) \qquad (2)$$

2.2.3 열병합발전시스템의 연료비용

열병합발전시스템의 연료비용은 일정한 온도와 압력의 증기를 생산하는데 필요한 연료비용으로 나타내었다. 증기가 보유하고 있는 열량은 보일러 입출구 엔탈피의 차와 발생 증기량의 곱으

로 나타낼 수 있으며, 이를 연료의 저위 발열량으로 나누면 증기 생산 단가를 얻을 수 있다. 여기서 저위 발열량이란 총발열량에서 연소생성물중의 수증기의 응축열을 빼고 남은 발열량을 말하며 흔히 열량이라고도 한다. 따라서 보일러의 효율과 연료단가를 고려한 열병합발전시스템의 연료비용은 식 (3)과 같은 일차식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{coi}(k) = a_j + b_j \cdot \frac{H_{coi}(k)\,(h_{out} - h_{in})}{LHV} \quad (j=1,\ 2,\ 3) \quad (3)$$

2.2.3 각종 보조설비들의 연료비용

보조보일러의 연료비용은 열병합발전시스템의 경우와 같이 나타낼 수 있으며, 나머지 보조설비들의 연료비용은 실제 운전데이타를 이용하여 회귀평면법으로 방정식을 세운 뒤 최소자승오차가 가장 적은 아래와 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

• 보조보일러 연료비용

$$C_{coi}(k) = a_j + b_j \cdot \frac{H_{abi}(k)\,(h_{out} - h_{in})}{LHV} \quad (j = 4,\ 5,\ 6) \quad (4)$$

• 슬러지 소각로 연료비용

$$C_{Sli}(k) = a_j + b_j \cdot H_{Sli}(k) \quad (j = 7,\ 8,\ 9) \quad (5)$$

• 폐열보일러

$$C_{wbi}(k) = a_j + b_j \cdot H_{wbi}(k) \quad (j = 10,\ 11) \quad (6)$$

2.3 제약조건

목적함수를 만족시키기 위한 등호제약과 부등호 제약을 다음과 같이 수립하였다.

2.3.1 열부하 제약

열부하는 열병합발전시스템에서 생산된 공정열과 보조보일러, 슬러지소각로, 폐열보일러의 열출력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{load}(k) = \sum_{i=1}^{3} H_{proi}(k) + \sum_{i=1}^{3} H_{abi}(k) + \sum_{i=1}^{3} H_{Sli}(k) + \sum_{i=1}^{2} H_{wbi}(k) \quad (7)$$

$$H_{co1} = H_{pro1} \quad (8)$$

$$H_{co2} = H_{pro2} + H_{con2} \quad (9)$$

$$H_{co3} = H_{pro3} + H_{con3} \quad (10)$$

2.3.2 전기부하 제약

전기부하는 열병합발전시스템에서 생산된 전기출력과 전력회사로부터 구매전력의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{load}(k) = E_{buy}(k) + \sum_{i=1}^{3} E_{coi}(k) \quad (11)$$

2.3.3 전기출력 제약

증기가 터빈내에서 단열 팽창할 때 터빈 입출구의 엔탈피 차만큼 터빈출력으로 변화된다. 따라서 전기출력은 배압터빈의 경우 식 (12)와 같이 터빈에 유입되는 증기량과 엔탈피 차의 곱으로 표현할 수 있으며, 추기복수터빈의 경우 생산되는 전기출력은 식 (13)과 같이 고압터빈에서의 전기출력과 저압터빈에서의 전기출력을 합으로 나타낼 수 있다.

(1) i = 1 ; 배압터빈

$$E_{coi}(k) = a_j + b_j \cdot H_{coi}(k) \cdot (h_{co} - h_{pro}) \cdot \frac{1}{860} \quad (j = 12) \quad (12)$$

(2) i = 2, 3 ; 추기복수 터빈

$$E_{coi}(k) = a_j + [b_j \cdot H_{coi}(k) \cdot (h_{co} - h_{pro}) + c_j \cdot H_{coni}(k) \cdot (h_{pro} - h_{con})] \cdot \frac{1}{860} \quad (j = 13,\ 14) \quad (13)$$

2.3.4 출력 상하한 제약

각 설비들의 열출력 및 전기출력 상하한 제약은 식 (14) ~ 식 (17)과 같이 나타낼 수 있으며, 저압터빈의 부식 및 손상을 방지하기 위한 복수량 상하한 제약두었다. 또한 본 모델에서는 전기출력에 비해 전기부하가 훨씬 크기 때문에 항상 전기를 구매하도록 되어있다. 따라서 구매만 가능하도록 제약조건을 세웠다.

$$H_{coi}^{\min} \le H_{coi} \le H_{coi}^{\max} \quad (14)$$

$$H_{abi}^{\min} \le H_{abi} \le H_{abi}^{\max} \quad (15)$$

$$H_{Sli}^{\min} \le H_{Sli} \le H_{Sli}^{\max} \quad (16)$$

$$H_{wbi}^{\min} \le H_{wbi} \le H_{wbi}^{\max} \quad (17)$$

$$E_{coi}^{\min} \le E_{coi} \le E_{coi}^{\max} \quad (18)$$

$$H_{coni}^{\min} \le H_{coni} \le H_{coni}^{\max} \quad (19)$$

$$E_{buy}(k) \ge 0 \quad (20)$$

3 최적운전계획 수립

3.1 입력데이터

본 연구에서는 실제 운전중인 산업용 열병합발전시스템의 운전실적을 기초로 입력자료를 구성하였으며 2시간을 하나의 시간대로 계산구간을 설정하였다. 여러 유형의 전기 구매단가중 산업용 전력을 구매 단가로 사용하였으며 계절은 봄·가을철로 설정하였다. 표 1과 표 2는 입력 데이터를 나타낸 것이다.

표 1. 입력데이터 (Ⅰ)

a_1	41.17	a_2	-39.81	a_3	-6.21	a_4	-7.51
a_5	-5.44	a_6	0.013	a_7	0.13	a_8	0.13
a_9	0.15	a_{10}	0.03	a_{11}	0.07	a_{12}	0.17
a_{13}	1.96	a_{14}	-2.93	b_1	17.73	b_2	18.85
b_3	20.34	b_4	298.35	b_5	312.18	b_6	333.81
b_7	0.023	b_8	0.024	b_9	0.021	b_{10}	0.016
b_{11}	0.014	b_{12}	0.83	b_{13}	0.79	b_{14}	0.91
c_{13}	5.77	c_{14}	6.11	ε_{ut}	0.98	h_{Cin}	156
h_{Cout}	802.16	h_{con}	614.5	h_{pro}	658.1	h_{Ain}	60
h_{Aout}	614.5	LHV	9830	N	12		

표 2. 입력데이터 (Ⅱ)

시간대 k	시간구간	구매단가 $BUY(k)$	전기부하 $E_{load}(k)$	열부하 $H_{load}(k)$
1	08시~10시	45.8	81	395
2	10시~12시	62.3	87	405
3	12시~14시	45.8	89	497
4	14시~16시	62.3	89	432
5	16시~18시	54.1	85	412
6	18시~20시	45.8	82	394
7	20시~22시	45.8	81	395
8	22시~24시	29.2	78	389
9	24시~02시	29.2	77	383
10	02시~04시	29.2	78	384
11	04시~06시	29.2	76	384
12	06시~08시	29.2	78	380

3.2 최적운전계획 수립

위에서 수립된 수리모델을 바탕으로 MATLAB의 Optimization toolbox을 이용하여 최적운전계획을 수립하였다.

그림 2는 열부하에 따른 열병합발전시스템 및 보조설비들의 열

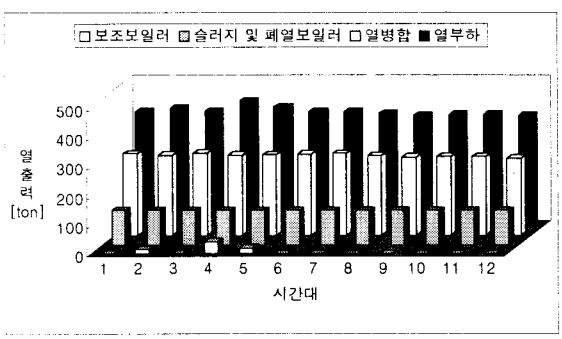

그림 2. 열부하에 따른 열출력 계획

출력 계획을 나타낸 것이다. 운전 비용이 많이드는 보조보일러는 평상시 거의 운전을 하지 않고 2, 4, 5번 시간대와 같이 열병합 발전시스템의 열출력이 열부하보다 부족 할 경우 보조보일러를 운전하여 열부하를 충족시켜줌을 알 수 있다.

폐열보일러는 폐열을 이용하여 운전하고, 슬러지 소각로는 슬러지를 만들어 연료로 사용하기 때문에 운전단가가 매우 적게들기 때문에 항상 최대 출력으로 운전함을 알 수 있다.

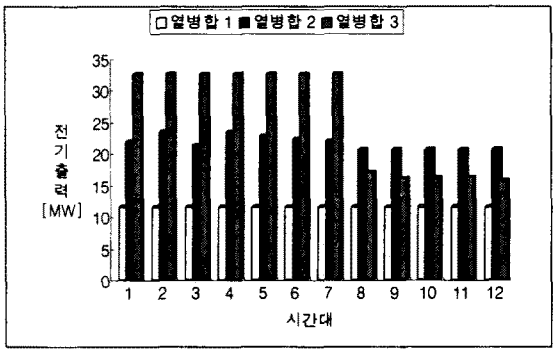

그림 3. 열병합발전시스템의 전기출력계획

그림 3은 열병합발전시스템의 전기출력계획을 나타낸 것이다. 전기 단가가 비싼 최대부하와 중간부하 시간대인 1~7번 시간대에는 전력을 구매하는것보다 전력을 더 많이 생산하는것이 경제적이기 때문에 열병합발전시스템 2와 3은 열부하로 추기를 적게하고 복수량을 늘려 최대 전기출력까지 전력을 생산하는 것을 알 수 있다. 반면 전기 단가가 싼 경부하시간대인 8~12번 시간대에는 전기를 생산하기보다 구매하는것이 더 경제적이기 때문에 복수기의 손상을 방지할 만큼만 증기를 보내 전기 생산량을 최소로 하고 나머지 전력은 구매하는것이 더 경제적이라는 것을 알 수 있다. 그러나 1번 열병합설비의 경우 배압터빈 방식을 사용하기 때문에 항상 최대로 발전하는 것으로 나타났다.

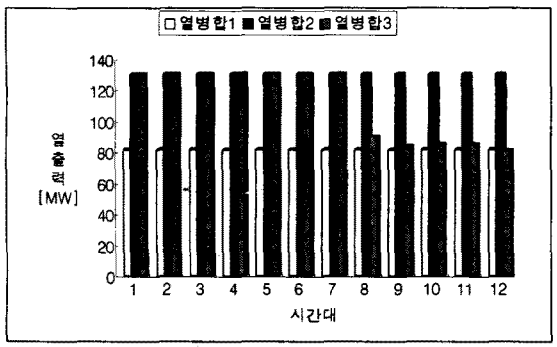

그림 4. 열병합발전시스템의 열출력계획

그림 4는 열병합발전시스템의 열출력 계획을 나타낸 것이다. 3번 열병합발전시스템의 경우 운전단가가 많이들기 때문에 열부하가 적은 8~12번 시간대에는 열출력을 적게 내는것으로 나타났다.

〈수식기호〉

$C(k)$: 열병합발전시스템과 보조설비들의 운전비용[천원]
$C_{bus}(k)$: 전력회사로부터 구매전력 비용 [천원]
$C_{coi}(k)$: 열병합발전시스템의 연료비용 [천원]
$C_{abi}(k)$: 보조보일러의 연료비용 [천원]
$C_{Sli}(k)$: 슬러지 소각로의 연료비용 [천원]
$C_{wbi}(k)$: 폐열 보일러의 연료비용 [천원]
$E_{bus}(k)$: 구매전력량 [MW]
$E_{coi}(k)$: 열병합발전시스템의 전기출력 [MW]
$H_{coi}(k)$: 열병합발전시스템의 열출력 [ton]
$H_{abi}(k)$: 보조보일러의 열출력 [ton]
$H_{Sli}(k)$: 슬러지 소각로의 열출력 [ton]
$H_{wbi}(k)$: 폐열 보일러의 열출력 [ton]
$E_{load}(k)$: 전기부하량 [MW]
$H_{load}(k)$: 열부하량 [ton]
$H_{proi}(k)$: 열병합발전시스템의 공정증기량 [ton]
$H_{coni}(k)$: 열병합발전시스템의 복수증기량 [ton]
H_{coi}^{max}, H_{coi}^{min} : 열병합발전시스템의 최대·최소 열출력 [ton]
H_{abi}^{max}, H_{abi}^{min} : 보조 보일러의 최대·최소 열출력 [ton]
H_{wbi}^{max}, H_{wbi}^{min} : 폐열 보일러의 최대·최소 열출력 [ton]
H_{Sli}^{max}, H_{Sli}^{min} : 슬러지 소각로의 최대·최소 열출력 [ton]
$BUY(k)$: 구매전력 단가 [천원/MW]
LHV : 벙커C유의 저위발열량 [kcal/kg]
h_{Cin} : 주 보일러 입구 엔탈피 [kcal/kg]
h_{Cout} : 주 보일러 출구 엔탈피 [kcal/kg]
h_{Ain} : 보조 보일러 입구 엔탈피 [kcal/kg]
h_{Aout} : 보조 보일러 출구 엔탈피 [kcal/kg]
h_{co} : 고압터빈 입구 엔탈피 [kcal/kg]
h_{pro} : 고압터빈 출구 엔탈피 [kcal/kg]
h_{con} : 저압터빈 출구 엔탈피 [kcal/kg]
a_j, b_j, c_j : 연료비 계수
ε_{ut} : 송전효율 [p.u]
t : 시간 계산구간의 길이 [hour]
k : 시간대
N : 총 시간대 수

4. 결 론

본 논문에서는 배압터빈방식과 추기복수터빈방식으로 운전되는 열병합발전시스템을 대상으로 최적운전계획을 수립하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증기 엔탈피 특성을 이용하여 배압터빈과 추기복수터빈의 전기출력과 열출력에 관한 수리적 모델을 수립하였다.
(2) 수립된 수리모델을 바탕으로 optimization toolbox를 이용하여 각 시간대별 일간 최적운전계획을 수립하였다.
(3) 연료비용이 많이 드는 보조보일러는 첨두부하용이나 열병합발전시스템의 고장시 비상용으로 사용되는 것이 바람직할 것으로 사료된다.
(4) 추기복수터빈방식의 사용은 추기량과 복수량의 조절을 통해 열과 전기출력을 조절할 수 있어 보다 유연성있는 운전을 통해 연료비 절감을 가져올 수 있음을 알았다.
(5) 수립된 배압터빈, 추기복수터빈 및 보조보일러의 수리모델과 최적화 알고리즘은 각 설비의 온도와 압력만 알면 이와 유사한 다른 열병합발전시스템에서도 적용할 수 있을것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 정지훈, 이종범, "다양한 종류의 열부하를 가진 다기열병합발전시스템의 최적운용계획 수립", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, C권, pp.1273-1275, 1999
[2] A Arivalagan, B G Raghavendra, A R K Rao, "Integrated Energy Optimization Model for a Cogeneration Based Energy Supply System in The Process Industry", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol 14, No.4, pp.227-233, 1995
[3] 임장순, "최신 증기동력학", 청문각, 1999
[4] "Matlab Optimization Toolbox", Mathwork, 1998