

열병합발전시스템의 단기운전계획을 위한 수리적모델 수립에 관한 연구

류 승 현⁰ · 이 중 범^{**} · 김 준 현^{***}
 한전기술연구원⁰ · 원광대학교^{**} · 한양대학교^{***}

A Numerical Modelling of Cogeneration Systems for the Short-Term Operation Strategy

Seung-Heon Lyu⁰ · Jong-Bum Lee^{**} · Joon-Hyun Kim^{***}
 KEPCO Research Center⁰ · Wonkwang Univ.^{**} · Hanyang Univ.^{***}

ABSTRACT

In this paper a numerical model of the industrial cogeneration system which have a thermal storage tank is proposed for the short-term operation strategy.

Short-term operation costs of topping cycle and bottoming cycle are calculated by using the proposed model of a thermal storage tank. Simulation results of four cases are compared and analyzed each other.

By these simulations which are similar to real operation circumstances, the validity of the proposed model is verified.

1. 서 론

열병합발전시스템은 하나의 에너지원에서 열과 전기를 동시에 생산하는 중합에너지시스템으로서, 열과 전기중에서 유용도가 높은 에너지의 우선적인 수급을 위해 전기생산을 주목적으로 하는 톱핑사이클(topping cycle) 방식과 열생산을 주목적으로 하는 버터밍사이클(bottoming cycle) 방식으로 구분된다 [1].

일반적으로 전기생산 전용발전소의 발전효율은 30~40% 정도인데 비해서 열병합발전시스템의 총 열이용율은 80~85% 정도이므로, 열병합발전시스템은 지역난방열이나 산업체의 공정열(process heat)을 저렴한 비용으로 생산할수 있는 유용한 시스템이라 할수 있다 [2].

현재까지 문헌에 발표된 열병합발전시스템의 수리적모델로는 열병합발전설비의 규모를 결정하기 위한 모델[3, 4] 및 전기저장설비를 가진 열병합발전시스템의 단기운전계획수립을 위한 모델[1] 등이 있으나, 축열조를 가진 열병합발전시스템의 단기운전계획수립에 적합한 상세 수리모델은 아직까지 수립되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 축열조를 가진 열병합발전시스템의 상세한 수리적모델을 제시함으로써 향후 열병합발전시스템 단기운전계획수립 연구의 기초를 마련하고자 하며, 사례연구에서는 보조보일러가 있는 톱핑사이클방식 및 보조보일러가 없는 버터밍사이클방식 열병합발전시스템에 본 논문에서 제시한 축열조 모델을 적용하여 단기운전비용을 시뮬레이션을 통하여 구하고 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 열병합발전시스템 및 축열조의 개념도

2.1 열병합발전시스템의 개념도

토픽사이클 및 버터밍사이클 방식 열병합발전시스템은 사이클의 외부에서 연료가 들어가고 사이클의 내부에서 전기·공정열 및 폐열이 발생하여 외부로 나오게 되며, 전력회사와는 전기를 서로 주고 받는 관계에 있으므로 이 두가지 방식을 합한 열병합발전시스템의 개념도는 그림 1과 같이 된다.

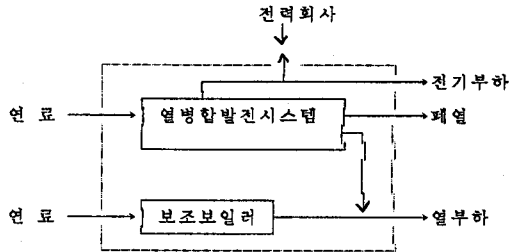


그림 1 열병합발전시스템의 개념도

2.2 축열조의 개념도

축열조는 열수요 특성에 따라 일간 또는 주간의 열부하를 조절하기 위한 단기축열조 및 월간 또는 년간의 열부하를 조절하기 위한 장기축열조로 분류되며, 열에너지의 저장온도에 따라 120℃ 이하의 저온축열조 및 120℃ ~ 1250℃ 범위의 고온축열조로 분류된다 [5].

한편, 축열조 내부에 저장된 열에너지는 시간의 경과에 따라 일정한 손실률로 외부에 일부 방출되며, 열병합발전시스템 및 보조보일러에서 생산된 잉여 열에너지가 축열조에 저장된후 열수요에 따라 축열조로부터 공급되므로 열에너지 흐름에 따른 축열조의 개념도는 그림 2와 같이 된다. 이때 열에너지는 화살표가 표시된 방향으로 흐른다.

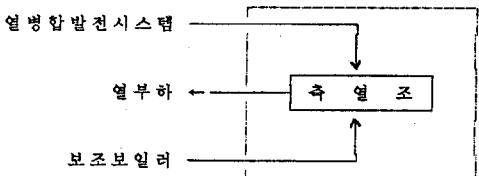


그림 2 축열조의 개념도

· 열부하에서의 제약

$$(Y_{4j} + Y_{6j} + Y_{8j}) * \delta = \text{열부하} \quad (9)$$

· 일반적으로 같은 계산구간내에서 전기의 판매와 구매가 동시에 발생할수 없으므로,

$$Y_{1j} > 0 \text{ 일때, } Y_{2j} = 0 \text{ 또는 } Y_{3j} > 0 \text{ 일때, } Y_{4j} = 0 \quad (10)$$

한편, 열병합발전시스템의 종합효율은 열전비에 의하여 결정되며, 다음의 근사화된 식으로 표현된다.

$$COE_j = \frac{COT_E - COE_E * (Y_{5j} + Y_{6j}) / (COT_H)}{SE_{ratio-j} * (Y_{1j} + Y_{2j}) / (COE_H)} + COE_E [P.U.]$$

$$(0 \leq SE_{ratio-j} < SE_{ratio} \text{ 일 경우})$$

$$= COT_E [P.U.]$$

$$(SE_{ratio-j} \geq SE_{ratio} \text{ 일 경우}) \quad (11)$$

따라서, 열병합발전시스템의 종합효율에 관한식 (11)을 원래의 목적함수식 (1)에 대입하면 다음의 식을 얻을수 있다.

$$\text{Min} \{ \text{Cost} \}$$

$$= \text{Min} \sum_{j=1}^N [\{ [BUY_j * \frac{1}{\gamma} * Y_{3j} - SELL_j * \gamma * Y_{1j}] + [F * (Y_{1j} + Y_{2j} + Y_{5j} + Y_{6j}) * \frac{1}{COE_j}] + [F * (Y_{4j} + Y_{7j}) * \frac{1}{ABE}] + [F * \frac{[TS_{j-1} + TS_{j-1} * (1-\mu)^{*(DEL-T-1)}]}{2}] * \mu \} + [F * (Y_{4j} + Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j}) * (1-\delta)] * \text{DEL}] \quad (12)$$

(단, $0 \leq SE_{ratio-j} < SE_{ratio}$ 일 경우,

$$COE_j = \frac{COT_E - COE_E * (Y_{5j} + Y_{6j}) / (COT_H)}{SE_{ratio-j} * (Y_{1j} + Y_{2j}) / (COE_H)} + COE_E [P.U.]$$

$SE_{ratio-j} \geq SE_{ratio}$ 일 경우,

$$COE_j = COT_E [P.U.])$$

이상에서 열병합발전시스템의 최소운전비용은 주어진 제약조건식 (2)~(10)을 만족하는 목적함수식 (12)의 해를 구함으로써 얻을수 있다.

4. 사례연구

본 연구에서 제시한 축열조 모델을 이용하여, 보조보일러가 있는 토핑사이클방식 및 보조보일러가 없는 버터밍사이클방식 열병합발전 시스템에서, 축열조가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 각각 1일간 최소운전비용을 구하고 그 차이를 비교 분석하였다.

산업체에서의 각 계산구간별 전기부하, 열부하, 전기구매 및 판매 단가는 표 1로 주어지며, 열병합발전시스템의 초기운전조건 및 제반 운전자료는 표 2와 같다.

표 1 각 계산구간별 전기부하, 열부하, 전기구매 및 판매단가

계산구간	전기부하 [MW]	열부하 [MW]	산업체에서의 전기 구매단가 [원/MWh]	산업체에서의 전기 판매단가 [원/MWh]
1	30	40	110	100
2	40	50	110	100
3	60	80	150	130
4	70	85	150	130
5	70	85	150	130
6	70	100	150	130
7	50	80	150	130
8	40	50	110	100
9	30	40	110	100

표 2 열병합발전시스템의 초기운전조건 및 제반운전자료

초기운전조건	Y10 = 0, Y20 = 40, Y30 = 0, Y40 = 0, Y50 = 0 Y60 = 0, Y70 = 0, Y80 = 51, Y90 = 16, TS0 = 20
제반운전자료	$\gamma = 0.99, \delta = 0.98, COEL = 20, COEH = 80$ $COEE = 0.4, COTL = 0, COTH = 100, COTE = 0.85$ $COH = 160, SE_{ratio} = 1.0, ABL = 1, ABH = 20$ $ABE = 0.7, TSL = 10, TSH = 70, \mu = 0.05$ $F = 100$

토픽사이클방식 및 버터밍사이클방식 열병합발전시스템에서 각각 축열조가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 1일간의 최소운전비용을 구하고 그 결과를 표 3~6에 나타내었다.

표 3은 보조보일러 및 축열조가 있는 경우로서, 열병합발전시스템의 종합효율이 보조보일러의 효율보다 매우 높으므로 가능하다면 보조보일러 운전을 억제하고 열저장장치 발생억제를 위해 축열조의 열에너지 저장량을 최소로 유지하려는 경향을 나타내고 있다. 또한 심야 시간대(구간 1, 2, 8, 9)의 전기구매단가가 열병합발전시스템에서의 전기생산단가보다 낮으므로 전력회사로부터 많은 양의 전기를 구매하려는 경향이 있으나, 전기출력만을 높여 잉여전기를 판매할 경우 종합효율의 저하에 따른 열 및 전기생산단가 상승으로 전체적인 이익이 오히려 감소하므로 더 이상의 전기출력증가는 발생하지 않고 있다. 계산구간 3~5에서는 전기구매단가가 높으므로 전기구매를 억제하고 있다. 계산구간 6에서는 전기구매 및 보조보일러의 가동이 발생하며, 보조보일러는 열병합발전시스템의 종합효율이 일정수준 이상이 되는 범위까지만 출력을 내고 있다. 따라서, 열병합발전시스템의 종합효율은 연료비용, 전기구매 및 보조보일러출력 결정에 매우 중요한 요소가 된다는 사실을 알수 있다.

계산구간 7에서는 열병합발전시스템의 종합효율을 높게 유지하는 범위 이내에서 잉여전력을 판매하고 있으며, 계산구간 9, 10에서는 값싼 심야전력을 구매하고 있다.

표 3 축열조가 있는 토픽사이클방식 열병합발전시스템에 대한 시뮬레이션 수행결과

계산구간	Y1j	Y2j	Y3j	Y4j	Y5j	Y6j	Y7j	Y8j	Y9j	COEj [P.U.]	TSj [MWh]	최소운전비용 누계 [원]
1	0	20	10	0	0	0	0	41	11	0.85	17	25,394
2	0	30	10	0	0	0	0	51	14	0.85	15	57,864
3	0	60	0	0	0	0	0	82	25	0.85	13	108,688
4	0	70	0	0	0	0	0	87	28	0.847	11	164,975
5	0	70	0	0	0	0	10	87	28	0.847	39	225,580
6	0	60	10	10	0	0	0	92	27	0.85	33	289,227
7	10	50	0	0	0	0	0	82	25	0.85	28	336,447
8	0	30	10	0	0	0	0	51	14	0.85	24	369,074
9	0	20	10	0	0	0	0	41	11	0.85	21	394,525

표 4는 보조보일러가 있고 축열조가 없는 경우로서 전체적인 운전 경향은 표 3의 경우와 비슷하나, 축열조에서의 열저장장치가 없으므로 총 운전비용은 오히려 표 3의 경우보다 적다.

표 4 축열조가 없는 토픽사이클방식 열병합발전시스템에 대한 시뮬레이션 수행결과

계산구간	Y1j	Y2j	Y3j	Y4j	Y5j	Y6j	Y7j	Y8j	Y9j	COEj [P.U.]	TSj [MWh]	최소운전비용 누계 [원]
1	0	20	10	0	-	-	-	41	11	0.85	-	25,109
2	0	30	10	0	-	-	-	51	14	0.85	-	57,337
3	0	60	0	0	-	-	-	82	25	0.85	-	107,947
4	0	70	0	0	-	-	-	87	28	0.847	-	164,049
5	0	70	0	0	-	-	-	87	28	0.847	-	220,151
6	0	60	10	10	-	-	-	92	27	0.85	-	283,241
7	10	50	0	0	-	-	-	82	25	0.85	-	329,990
8	0	30	10	0	-	-	-	51	14	0.85	-	362,218
9	0	20	10	0	-	-	-	41	11	0.85	-	387,327

표 5는 보조보일러가 없고 축열조가 있는 경우로서 전체적인 운전 경향은 표 3의 경우와 비슷하나, 계산구간 6에서 열수요에 대한 열공

3. 열병합발전시스템의 수리적 상세모델

3.1 열병합발전시스템에서의 전기 및 열 흐름

그림 1에 도시한 열병합발전시스템의 개념도와 그림 2에 도시한 축열조의 개념도를 이용하여, 축열조를 가진 산업체 열병합발전시스템에서의 전기 및 열 흐름도를 작성하면 그림 3과 같이 된다.

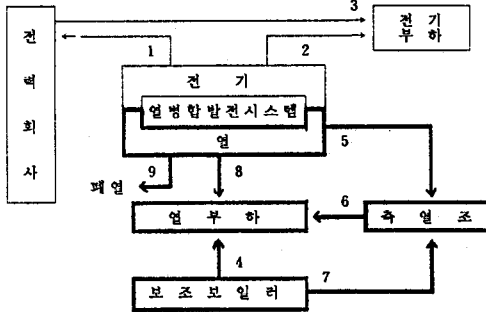


그림 3 축열조를 가진 산업체 열병합발전시스템에서의 전기 및 열 흐름도

그림 3에서 굵은선은 열에너지의 흐름을 나타내고 가는선은 전기에너지의 흐름을 나타내며 화살표는 에너지가 흐르는 방향을 나타낸다. 또한 숫자는 에너지가 흐르는 선로의 번호를 나타내며, 폐열은 열병합발전시스템 내부에서 발생하는 모든 손실의 합으로 구성된다.

3.2 열병합발전시스템의 수리적 상세모델

그림 3을 이용한 열병합발전시스템의 수리적 상세모델에서 사용될 기호는 다음과 같다.

기호

- N : 단기운전비용 계산시 계산구간의 총수
 - DELT : 단기운전비용 계산시 각 계산구간의 길이[Hour]
 - j : 단기운전비용 계산시 각 계산구간 번호
 - k : 열 또는 전기에너지가 흐르는 선로의 번호
 - Y_{kj} : k선로에서 j계산구간 동안의 에너지 흐름[MWh]
 - U_j, H_j : 계산구간 j에서의 전기부하 및 열부하[MWh]
 - γ : 전력회사와 산업체사이의 송전선로(1,3선로) 효율[P.U]
 - δ : 산업체 내부 송열관(4,5,6,7,8선로)의 열전송효율[P.U]
 - COE_L, COE_H : 열병합발전시스템의 최소 및 최대 전기출력[MW]
 - COE_C : 열병합발전시스템이 전기만을 생산할 경우의 효율[P.U]
 - COT_L, COT_H : 열병합발전시스템의 최소 및 최대 열출력[MW]
 - COT_C : 열병합발전시스템이 열만을 생산할 경우의 효율[P.U]
 - CO_H : 열병합발전시스템의 최대 종합출력[MW]
 - CO_{Ej} : 열병합발전시스템의 계산구간 j에서의 종합효율[P.U]
 - $SE_{ratio-j}$: 열병합발전시스템의 계산구간 j에서의 열전비[P.U]
- $$SE_{ratio-j} = \left[\frac{(\text{열병합발전시스템의 열출력}_j / COT_H)}{(\text{열병합발전시스템의 전기출력}_j / COE_H)} \right]$$
- AB_L, AB_H : 보조보일러의 최소 및 최대 열출력[MW]
 - AB_C : 보조보일러의 효율[P.U]

TS_L, TS_H : 축열조의 최소 및 최대 에너지저장량[MWh]

TS_j : 축열조의 j구간 말기의 에너지저장량[MWh]

μ : 축열조의 단위시간당 열저장 손실률[P.U]

F : 연료단가[원/MWh]

$BUY_j, SELL_j$: 계산구간 j에서 전력회사로부터의 전기구매 및 판매 단가[원/MWh]

위의 기호에서 열에너지와 전기에너지의 단위는 $1[J] = 0.24[cal]$ 의 관계에 의해 환산하였다.

한편, 문제의 정식화에 앞서 다음의 세가지 가정이 필요하다.

- * 가정 1. 대장기간에서 열병합발전시스템은 계속 운전된다.
- * 가정 2. 열병합발전시스템의 효율은 열전비에 선형적으로 비례하고, 보조보일러의 효율은 출력에 상관없이 일정하다.
- * 가정 3. 전기의 판매 및 구매시 발생하는 송전손실비용은 산업체에서 부담한다.

이상의 가정하에서 목적함수를 산업체에서의 연료비용, 손실비용 및 전기구매 관련비용 총합의 최소화로 놓으면, 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Min (Cost)} \\ = \text{Min} \sum_{j=1}^N [& \{ [BUY_j * \frac{1}{\gamma} * Y_{3j} - SELL_j * \gamma * Y_{1j}] \\ & + [F * (Y_{1j} + Y_{2j} + Y_{5j} + Y_{6j}) * \frac{1}{CO_{Ej}}] \\ & + [F * (Y_{4j} + Y_{7j}) * \frac{1}{AB_C}] \\ & + [F * \frac{[TS_{j1} + TS_{j1} * (1-\mu)^{\text{DELT}(j-1)}]}{2}] * \mu \\ & + [F * (Y_{4j} + Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j}) * (1-\delta)] * DELT] \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)의 우변에서 첫째항은 전력회사로부터의 전기구매 및 판매비용, 둘째항은 열병합발전시스템의 연료비용, 셋째항은 보조보일러의 연료비용, 넷째항은 근사화된 축열조의 열저장손실비용, 다섯째항은 열전송선로에서의 손실비용을 각각 나타내며 이때의 제약조건은 다음과 같다.

* 그림 5에서 에너지는 화살표가 표시된 방향으로만 흐르므로,

$$Y_{kj} \geq 0 \quad (2)$$

* 전기출력 또는 열출력의 상하한에 의해,

$$COE_L \leq Y_{1j} + Y_{2j} \leq COE_H \quad (3)$$

$$COT_L \leq Y_{5j} + Y_{6j} \leq COT_H \quad (4)$$

* 전기출력 및 열출력을 합한 종합출력의 상하한에 의해,

$$COE_L + COT_L \leq Y_{1j} + Y_{2j} + Y_{5j} + Y_{6j} \leq CO_H \quad (5)$$

* 보조보일러가 열출력의 상하한 범위내에서 운전되거나 운전 정지되는 경우의 조건식은,

$$AB_L \leq Y_{4j} + Y_{7j} \leq AB_H \quad \text{또는} \quad Y_{4j} + Y_{7j} = 0 \quad (6)$$

* 축열조 에너지저장량의 상하한제약에 의해,

$$TS_L \leq [(Y_{5j} + Y_{7j}) * \delta - Y_{6j}] * DELT + TS_{j-1} * (1-\mu)^{\text{DELT}} \leq TS_H \quad (7)$$

* 전기부하에서의 제약

$$Y_{2j} + Y_{3j} = \text{전기부하}_j \quad (8)$$

급력이 송열관에서의 손실분만큼 부족하므로 열수요를 충족시키지 못하게 된다. 따라서, 계산구간 4, 5에서 열에너지를 축열조에 미리 저장할 뿐만 아니라, 열생산에 의한 전기출력 부족분만큼 전기를 구매하고 있다. 결국, 전기구매단가가 높은 구간에서의 전기구매로 인해 총 운전비용은 앞의 두가지 경우보다 높아지나, 열병합발전시스템의 최대열출력보다 열부하가 더 큰경우에도 축열조를 이용하여 원활한 열에너지의 공급이 가능하므로, 생산공정의 차질발생을 방지함으로써 산업체의 전체이익은 오히려 증대될 뿐만 아니라 열병합발전시스템의 설비규모 축소효과에 의한 이익도 기대할 수 있다.

표 5 축열조가 있는 버터링사이클방식 열병합발전시스템에 대한 시뮬레이션 수행결과

계산구간	Y1j	Y2j	Y3j	Y4j	Y5j	Y6j	Y7j	Y8j	Y9j	COEj [P.U]	TSj [MWh]	최소운전비용 누계 [원]
1	0	20	10	-	0	0	-	41	11	0.85	15	25,574
2	0	30	10	-	0	0	-	51	14	0.85	12	58,076
3	0	60	0	-	0	0	-	82	25	0.85	10	108,857
4	0	60	10	-	10	0	-	87	28	0.85	37	169,599
5	0	60	10	-	10	0	-	87	28	0.85	61	230,666
6	0	60	10	-	0	10	-	92	27	0.85	22	290,341
7	10	50	0	-	0	0	-	82	25	0.85	19	337,404
8	0	30	10	-	0	0	-	51	14	0.85	16	369,903
9	0	20	10	-	0	0	-	41	11	0.85	14	395,240

표 6은 보조보일러 및 축열조가 없는 경우로서 전체적인 운전경향은 표 3의 경우와 비슷하나, 계산구간 6에서의 열공급부족으로 인하여 산업체의 생산공정에 차질이 발생하므로, 원활한 열에너지의 공급을 위해 열병합발전시스템의 설비규모 증대나 보조보일러의 설치 또는 축열조의 설치가 요구된다.

표 6 축열조가 없는 버터링사이클방식 열병합발전시스템에 대한 시뮬레이션 수행결과

계산구간	Y1j	Y2j	Y3j	Y4j	Y5j	Y6j	Y7j	Y8j	Y9j	COEj [P.U]	TSj [MWh]	최소운전비용 누계 [원]
1	0	20	10	-	-	-	-	41	11	0.85	-	25,109
2	0	30	10	-	-	-	-	51	14	0.85	-	57,337
3	0	60	0	-	-	-	-	82	25	0.85	-	107,947
4	0	70	0	-	-	-	-	87	28	0.847	-	164,049
5	0	70	0	-	-	-	-	87	28	0.847	-	220,151
6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

5. 결론

제시한 축열조의 모델이 있거나 없을 경우에 대하여 각각 산업체 열병합발전시스템의 단기운전계획수립을 위한 시뮬레이션을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 제시한 축열조 모델이 실제 산업체에서 사용되는 축열조의 수리모형으로 적용가능함을 확인하였다.
- (2) 산업체에서의 전기구매와 판매량은 열병합발전시스템의 종합효율에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] H.B. Puttgen and P.R. MacGregor, "Optimum Scheduling Procedure for Cogenerating Small Power Producing Facilities," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.4, No.3, pp.957~964, Aug. 1989.

- [2] "열병합발전에 의한 지역난방시스템의 세부설계 및 경제성 검토(별책부록)," 한국과학기술연구소, 1980.12, pp 46~47.
- [3] H. Choudjehbaklou and H.B. Puttgen, "Optimization Topics Related to Small Power Producing Facilities Operating under Energy Spot Pricing Policies," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.PWRS-2, No.2, pp.296~302, May 1987.
- [4] M.L. Baughman, N.A. Eisner and P.S. Merrill, "Optimizing Combined Cogeneration and Thermal Storage Systems : An Engineering Economics Approach," IEEE Trans. on Power Systems, Vol.4, No.3, pp.974~980, Aug. 1989.
- [5] "열병합발전시스템에 대한 기술검토 용역보고서," 한국전력 기술주식회사, 1985.10, pp 191~196.