

건물용 열병합발전 설비를 중심으로 한 종합 에너지 시스템의 최적 일간 운전모형 수립에 관한 연구

박종성* 장승찬** 심건보* 김정훈* 고요**
*홍익대학교 전기제어공학과 **에너지자원기술개발지원센터

A Study on Daily Operation Model for Total Energy System Including Building Cogeneration, Ice Storage, Thermal and Electrical Storage Facilities

Park, Jong-Seong* Chang, Seungchan** Shim, Keun-Bo* Kim, Jung-Hoon* Ko, Yo**
*Dept. of Elec. & Ctrl. Engineering, Hong-Ik University **RaCER

Abstract

In this paper, we propose an optimal daily operation model for the total energy system which includes cogeneration, thermal storage and electrical charger and ice storage facilities. Storing and utilizing the surplus thermal and electrical energy, the daily operation cost could be reduced and more efficient use of thermal energy could be achieved. The ice storage cooling system has a merit of reduce the electricity cost by time of day rate(peak/off-peak). And also, refrigerator can be down sized compare to the other cooling system. From this model, operation costs of the sample cogeneration system with/without auxiliary facilities are obtained and compared to each other. In case study, the sensitivity of operating cost is simulated according to the variation of cogeneration production cost, electricity rate, etc.

1. 서 론

현재 업무시설, 숙박시설 등 각종 대형 건물에 빙축열 시스템의 설치가 의무화되어 있는 등 에너지 효율적 이용에 대한 관심은 환경문제에 관련되어 높아져 가고 있다. 이에 따라 에너지 효율화 기기의 설치 및 운용을 통해 에너지 소비를 절감하고 전력선비의 건철을 회피하기 위한 각종 방안이 제시되고 있다. 열병합발전 시스템에 대해서도 이와 같은 에너지 소비와 연계 하기 위해서는 적절한 운전모델의 수립이 요청되며, 열병합발전 설비를 중심으로 에너지 효율을 높이기 위해 설치되는 각종 설비의 보급을 촉진하기 위해서는 운전 경제성에 대한 검토 또한 중요하다. 기존의 연구[1][2][3]에서 보조 설비로서 전기저장 및 축열을 고려하고 있으나 빙축열시스템을 포함하여 종합적인 분석이 가능한 모델 수립은 아직 까지 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 축열 시스템을 비롯하여 현재 부하관리의 일환으로 심야수요 창출 및 여름철 주간 첨두부하 억제를 위해 널리 설치되고 있는 빙축열 냉방 시스템, 잉여 전기를 저장하여 사용할 수 있는 전기저장 시스템 등과 열병합발전 시스템을 연계하는 종합적 에너지 시스템의 최적 일간 운전모형을 수립하고자 한다. 이를 위해 먼저 시스템을 개념적으로 구성하고 축열, 빙축열, 전기저장 설비의 기술 특성을 알아보고 기 발표된 축열을 고려한 운전모형[1]에 전기저장 장치와 빙축열을 도입한 모형을 수립한다. 이때 빙축열 시스템을 위해 냉방부하를 별도로 처리하고 빙축열 시스템의 운전 방식을 제약조건에 반영한다. 사례 연구에서는 축열조, 빙축열 시스템 및 전기 저장장치의 설치를 통한 영향을 알아보기 위해 이를 채용하지 않은 열병합 시스템과 운전비의 결과를 비교하고 발전단가, 전기요금 등의 변화에 따른 열병합발전 설비와 보조설비의 출력 변화를 알아본다.

2. 축열, 빙축열, 전기저장을 포함한 종합 에너지 시스템의 구성

전체적인 시스템의 구성도는 그림과 같으며 각 시스템은 다음과 같은 특성을 가진다.

2.1 축열조

열병합발전 시스템에서 방출되는 열을 온수의 형태로 저장하였다가 필요한 시간대에 사용하는 열 저장설비로서 열부하가 높은 시간에 미리 축열된 열을 이용할 수 있어 안정적인 운전이 가능하며 신뢰성이 보장된다. 또한 보조보일러의 운전을 감소시켜 운전비를 절감할 수 있다.

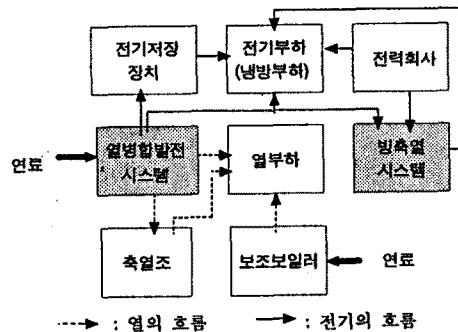


그림 1. 전체 시스템의 구성도

축열조의 운전방법은 대상 시스템의 운전특성에 따라 달라 지는데 일반적으로 기기의 용량을 감소하기 위한 연장운전, 기기의 운전시간 단축을 위한 단축운전, 심야전력을 이용한 축열을 위한 분리운전 등의 방식이 있다. 본 연구에서는 열병합발전의 24시간 운전시 용량의 감소를 위한 연장운전 방식을 채택 하여 모형을 수립하였다. 그리고 축열시 시간 경과 따른 축열의 손실은 축열조의 단열이 비교적 양호하여 시간당 0.15[%]정도로 비교적 작으므로 시간의 경과에 따라 일정하게 감소한다고 가정하였다[4].

2.2 빙축열 시스템

각종 건물에 독립적으로 설치되어 운전되고 있는 빙축열 시스템은 요금이 낮은 심야전력을 이용하여 야간에 얼음을 저장하고(재빙) 낮시간에 이를 방출하여(해빙) 에너지 이용을 시간대별로 일정하게 하므로서 첨두부하를 감소시키고 신규 전력 설비의 투자를 회피하여 국가적으로도 이득이 발생하며 개인은 전력 요금을 절감하는 효과를 가진다.

빙축열 시스템의 운전방식은 크게 전체 축열과 부분축열로 나뉘며 부분축열은 다시 냉동기 우선 방식과 축열조 우선 방식으로 나뉜다[5]. 전체 축열은 주간 냉방부하의 100[%]를 심야시간에 축열하므로써 주간에 냉동기를 가동하지 않는 방식으로 초기 투자비가 많이 든다. 본 연구에서는 냉동기의 용량감소 효과가 있도록 냉방부하의 40[%]정도를 부분축열 하고 빙축열의 출력을 변화하면서 냉동기와 함께 운전하는 방식을 택하였다. 부분축열시 빙축열시스템은 전력을 일정하게 소비하여 이를 모델에서 상수로 반영할 수 있어 부하와 같이 취급되며 빙축열의 출력은 변수가 된다.

2.3 전기저장장치

열병합발전 시스템에서 전기저장장치는 열추중에 의해 전기가 남는 경우 이용하여 남는 전기를 판매할 수 없거나 판매가 가능하더라도 그 가격이 낮은 경우 판매하지 않고 이를 저장하여 첨두부하 시간에 방전한다. 현재의 기술로서는 축전기를 이용할 수 있으며 충전 및 방전시 각각 15[%] 정도의 손실이 발생한다[6]. 이때 시간에 따른 저장 전기의 감소는 매우 작으므로 무시하였다.

3. 수리모형

3.1 모형 수립을 위한 가정

각종 보조설비를 포함하는 모형을 수립하기 위하여 기존의 열병합발전설비에 대한 가정[7]의에 앞에서 논의한 바에 따라 가정을 추가하면 다음과 같다.

1. 축열조에 저장된 열은 시간에 따라 일정한 비율로 감소한다.
2. 축열/방열시 비용발생은 없으며 저장량이 많을수록 유리하게 되므로 중단조건을 제한하지 않는다.
3. 전기저장장치의 충/방전시 비용발생은 없다.
4. 전기저장장치의 충방전효율은 미리 주어진다.
5. 시간에 따른 전장전기의 감소는 무시한다.
6. 방축열시스템과의 연계를 위해 전기를 사용하는 냉동기의 설치율 가정한다.
7. 방축열 시스템의 제빙 및 해빙 시간, 제빙시 사용전력은 미리 주어진다.

3.2 목적함수와 제약조건

목적함수는 대상구간의 운전비로서 OC로 표시된다. 이는 각 구간의 열병합발전비용, 보조보일러 연료비, 전기구입, 열공급저장비용으로 구성된다. 부하를 만족하며 축열 방축열 및 전기 저장장치를 고려하기 위한 제약조건은 식 3~식17과 같으며 이때 조건 i)~iv)는 축열을 고려한 운전 모형[1]에서 이미 수립한 바 있다.

$$OC = \sum_{\Delta t} OC \quad (1)$$

$$\text{단, } OC = \text{Min} (aP'_C + bQ'_R + cP'_S + fZ')\Delta t \quad (2)$$

i) 발전기 최대 출력 제약

$$0 \leq P'_C \leq n_g P'_{max} \quad (3)$$

ii) 보조보일러 최대출력 제약

$$0 \leq Q'_R \leq B_{max} \quad (4)$$

iii) 축열조 최대 저장 제약 : 축열조 용량에서 현재 저장되어 있는 부분을 제외한 만큼 축열이 가능하다.

$$Q'_S \leq Q_{max} - Q'_0 \quad (5)$$

iv) 축열조 최소 저장 조건 : 방열은 최소 저장용량 의해 제한을 받는다.

$$Q'_S \leq Q'_0 - Q_{min} \quad (6)$$

v) 전기저장장치 최대 충전 제약

$$P'_C \leq P'_{s,max} - P'_0 \quad (7)$$

이때, $P'_{0,t+1} = P'_0 + P'_C - P'_d$

vi) 전기저장장치 방전 제약 : 정해진 최소용량 이상을 유지하며 방전한다.

$$P'_d \leq P'_0 - P_{min} \quad (9)$$

vii) 해빙시 출력은 최대용량을 초과할 수 없다.

$$P'_{is} \leq P'_{is,max} \quad (10)$$

viii) 해빙시 남는 용량은 정해진 최소 값이상을 유지해야 한다.

$$P'_{is} \leq P'_{0, is} - P_{min, is} \quad (11)$$

이때, $P'_{0, is,t+1} = P'_{0, is} - P'_{is}$

ix) 전기부하 제약 : 방축열 운전 상태(제빙/해빙)에 따라 달라진다. 제빙운전시 냉동기 소비전력은 전기부하에 상수로 더해지며 이는 열병합발전, 전력회사, 전기저장장치로부터 공급된다.

$$L'_E + L'_is = (1 - \alpha_3) P'_C + (1 - \alpha_1) P'_S - P'_C + (1 - \alpha_9) P'_d \quad (13)$$

해빙운전시 방축열의 출력에 의해 냉동기 가동이 감소하므로 전기부하의 제약조건은 다음과 같이 변경된다.

$$L'_E = (1 - \alpha_3) P'_C + (1 - \alpha_1) P'_S - P'_C + (1 - \alpha_9) P'_d + (1 - \alpha_9) P'_{is} \quad (14)$$

x) 방축열의 출력은 냉방부하보다 클 수 없으므로 다음과 같은 제약조건을 도입한다.

$$(1 - \alpha_9) P'_{is} \leq L'_E \quad (15)$$

xi) 일부하 제약 : 열병합발전과 보조보일러, 축열로 일부하를 감당한다.

$$L'_0 \leq (1 - \alpha_3) \beta P'_C + (1 - \alpha_4) Q'_R + Z' - Q'_E + (1 - \alpha_6) Q'_W \quad (16)$$

xii) 모든 변수는 0이상의 값을 가진다.

$$P'_C \geq 0, Q'_R \geq 0, P'_S \geq 0, Z' \geq 0, P'_E \geq 0, P'_{is} \geq 0 \quad (17)$$

3.2 해법

제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 해를 구하기 위해 선형계획법(Linear Programming)을 이용하였다. 본 연구에서는 축열, 방축열, 전기저장이 많을수록 운전면에서 유리해 지므로 중단조건을 고려하지 않아 일간운전비의 계산은 각 시간 구간별로 차례로 수행되어 계산면에서 효율적이다. 이때 전 시간의 축열량, 전기저장용량, 방축열 용량은 식8, 식12와 같이 점화식으로 표현된다. 선형계획법을 이용하기 위한 문제의 구성은 다음과 같다.

$$\text{Min } C^T X$$

$$x$$

$$\text{s.t. } A_1 X_1 = b_1, A_2 X_2 \leq b_2, X \geq 0$$

$$C = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} P'_C \\ Q'_R \\ P'_S \\ Z' \\ Q'_E \\ Q'_W \\ P'_E \\ P'_{is} \\ L'_E \end{bmatrix}, b_1 = [L'_E + L'_is], b_2 = \begin{bmatrix} n_g P'_{max} \\ -L'_0 \\ B'_{max} \\ Q'_{max} - Q'_0 \\ Q'_0 - Q'_{min} \\ P'_{s,max} - P'_0 \\ P'_0 - P'_{s,min} \\ P'_{is,max} \\ P'_{0, is} - P'_{is} \\ L'_c \end{bmatrix}$$

$$A_1 = [(1 - \alpha_3) \ 0 \ (1 - \alpha_1) \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ (1 - \alpha_9) \ (1 - \alpha_9)]$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta(1 - \alpha_3) & -(1 - \alpha_4) & 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 - \alpha_6) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. 사례연구

사례연구에서는 제안된 모델을 적용하여 축열, 전기저장 및 방축열시스템을 포함한 종합 시스템의 일간 최적 운전비를 산출한다. 또한 열병합발전 단독운전 또는 보조설비 중 한가지만을 가동하는 경우에 대하여 운전비를 산출하고 결과를 서로 비교하여 각 보조설비에 대한 영향을 분석한다. 또한 열병합발전 단가, 전기요금, 보조보일러 운전단가의 변화에 따른 운전비의 감도를 알아본다. 사례연구에 사용된 입력자료는 다음과 같다. 대상건물은 호텔로서 기존에 조사된[8] 부하자료를 이용하였다.

4.1 입력자료

표 1. 열병합 시스템 자료

T	Δt	열병합발전 용량	열전비	선로 손실	보조보일러 용량
24	1	12,000[kW]	1.5	0.01	6,000[kW]

표 2. 축열시스템 자료

γ	Q_{max}	Q_{min}	초기값 $Q'_0 = 0$		
			봄/가을	여름	겨울
0.05	4,000[kW]	1,000 [kW]	2,500[kW]	1,000[kW]	3,500[kW]

표 3. 전기저장 시스템 자료

P_{max}	P_{min}	충전손실	방전손실
3,000 [kW]	0[kW]	15[%]	15[%]

표 4. 방축열 시스템 자료

$P_{is,max}$	$P_{is,min}$	제빙시간	제빙시 소비전력
18,000 [kW]	0[kW]	9시간 (22:00 ~ 08:00)	1500[kW]

표 5. 비용자료

열병합 발전단가	보조보일러 단가	전기요금 (심야시간)	전기요금 (기타시간)	열공급 저장비
65원/kWh	21원/kWh	68.8원/kWh	24.6원/kWh	210원/kWh

(* 심야시간 : 22:00 ~ 08:00)

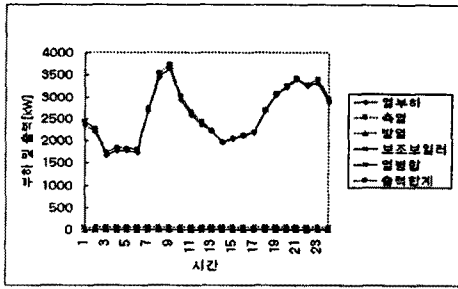


그림 3. 열부하와 출력 결과

열병합 발전단가, 보조보일러, 전기요금에 대한 민감도를 분석하기 위해 열병합발전 비용이 높아지는 경우(case1), 보조보일러 운전단가가 낮아 지는 경우(case2), 또는 높아지는 경우(case3), 전기요금이 증가하는 경우(case4)에 대하여 전기 및 열 출력의 결과를 검토한다. 그림 4~5에서 보면 먼저 case1에서는 발전비용을 100[원/kWh]로 하였으며 이때는 열병합발전을 가동하지 않고 모든 전력을 구입하는 것으로 나타났다. 따라서 보조보일러가 동작하며 전기저장 및 축열은 발생하지 않는다. case2에서는 보조보일러의 운전단가가 10[원/kWh]로 낮아지는 경우로 이때 열병합발전 단가를 35[원/kWh]로 하면 심야에는 전기를 구입하며 주간에는 열병합발전을 가동하여 열부하를 충족한다. 심야에는 보조보일러가 가동되며 전기부하가 높아지고 열부하가 낮은 주간에 축열이 발생한다. case3은 이와 반대의 경우로 보조보일러 운전단가가 높아져 발전으로 열부하를 감당하며 남은 전기는 저장하게 된다. 이때 축열은 발생하지 않는다. case4에서는 전기요금이 증가하여 열병합발전을 가동하게 되고 열부하를 충족하여 남은 전기를 저장한다.

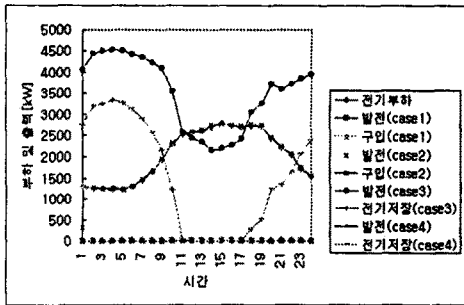


그림 4. 각 경우의 전기부하와 출력 결과

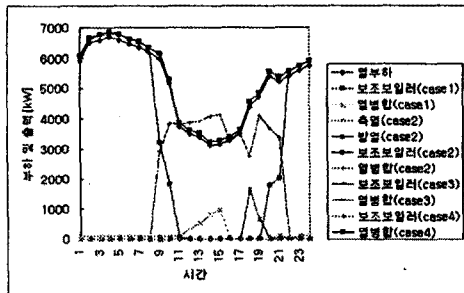


그림 5. 각 경우의 열부하와 출력 결과

다음의 표6은 각 계절별 운전비 계산 결과를 보여준다. 축열, 빙축열, 전기저장장치를 동시에 고려하는 경우 운전비가 가장 낮게 나타났으며 여름철에서는 빙축열에 의한 운전비감소가 다른 보조설비에 비해 크게 나타났다. 축열설비와 전기저장 설비 비교할 때 축열설비가 운전비감소가 상대적으로 커 이의 유용함을 확인할 수 있다.

표 6. 보조설비와 일간 운전비 계산결과 [천원]

	봄/가을	여름	겨울
모두 설치	3224.6	8878.8	3955.4
축열만 설치	3247.6	9441.7	3969.2
전기저장만 설치	3485.9	9903.1	3978.4
빙축열만 설치		9301.5	
보조설비없는 경우	3508.9	9928.1	3992.2

5. 결론

논문의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 열병합발전시스템과 축열, 빙축열 및 전기저장장치를 연계하는 중합에너지 시스템을 구성하고 이들의 특성을 반영하는 일간 운전모형을 수립하였다.
- 열병합발전 단가, 보일러 단가, 전기요금을 변화하여 열병합발전, 축열 및 전기저장 결과의 변화를 관찰한 결과 전기저장은 열병합발전 단가와 전기요금에 의해 영향을 받음을 확인 하였다. 보조보일러 단가가 낮은 경우 전기부하가 높고 열부하가 작은 주간에 축열이 발생함을 알 수 있었다.
- 축열, 빙축열, 전기저장 설비의 가동에 대한 일간 운전비를 분석해 본 결과 빙축열시스템이 유용하며 축열, 전기저장 설비의 순으로 나타났다.

향후 열병합발전에서 축열, 빙축열, 전기저장 설비의 투자에 대하여 적절한 타당성 평가가 이루어진다면 본 연구에서 고려한 시스템의 도입이 증가하여 에너지의 효율적 이용에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 박중성, 장승찬, 김정훈, 심진보, 고요 "축열을 고려한 소형 열병합발전 시스템의 최적 운전모형", 1996년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집.
- [2] 이종범, 정창호, 류승현 "다양한 보조설비를 가진 열병합발전 시스템의 단기운전계획", 1994년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp 24~26, 1994. 11.
- [3] Martin L. Baughman, Neil A. Eisner and Paul S. Merrill, Optimizing Combined Cogeneration and Thermal Storage Systems : an Engineering Economics Approach", IEEE Trans. PAS, Vol. 4, NO.3, pp 974-979, August, 1989
- [4] 한국전력공사, "심야전력기 성능향상 연구", 1991.9.
- [5] 새원공조, "빙축열냉방시스템" 1995.
- [6] 풍상산업부, "전기에너지 저장기술개발", 1996. 7. 14
- [7] 최석현, 최중기, 김정훈, 이봉용, "다기 발전기를 채용한 건물용 열병합 시스템에서 최적규모산정을 위한 확률적 최적운전모형", 1994년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집(B), pp. 840~842, 1994. 8.
- [8] 노동석, "건물열병합발전보급방안", 에너지경제연구원
- [9] Hans B. Puttgen and Paul R. MacGregor, "Optimum Scheduling for Cogeneration Small Power Producing Facilities", IEEE Trans. on PAS, Vol.4, No.3, pp.957-963.

[기호]

- OC : t 구간의 운전비 [원]
- a : 열병합발전 단가 [원/kWh]
- b : 보조보일러의 열단가 [원/kWh]
- c : 전기구입단가 [원/kWh]
- f : 열공급장비 단가 [원/kWh]
- P_G : t 구간의 열병합발전 시스템의 전기출력 [kW]
- Q_k : t 구간의 보조보일러의 출력 [kW]
- P_k : t 구간의 구입전력 [kW]
- Z : t 구간의 공급저장 열 [kW]
- Δt : 구간의 지속시간 [시간]
- P_{max} : 열병합 발전기의 최대 전기출력 [kW]
- n_g : 발전기 대수 [대]
- B_{max} : 보조보일러의 최대 열출력 [kW]
- $\alpha_1 \sim \alpha_9$: 각 선로의 손실을 [p.u.]
- Q_{max}, Q_{min} : 축열조 최대, 최소 저장량 [kW]
- L_k, L'_k : t 구간의 전기부하와 열부하 [kW]
- Q_k^c : t 구간 초기에 축열조에 남아있는 용량 [kW]
- Q_k^s, Q_k^d : t 구간의 축열량과 축열조 출력 [kW]
- γ : 단위시간당 축열 감소율 [p.u.]
- P_b : 빙축열설비의 방열 출력 [kW]
- P'_b : 빙축열설비에 남아있는 용량 [kW]
- P_s, P_d : t 구간의 충전과 방전 [kW]