

건물용 종합에너지시스템 구성요소의 최적 투자모형에 관한 연구

*서상욱, *박종성, *장승찬, *김정훈

*홍익대학교 전기제어공학과, *에너지자원기술개발지원센터

A Study on the Optimal Planning Model of Building Integrated Energy System's Components

*S. O. Suh, *J. S. Park, *S. C. Chang, *J. H. Kim

*Dept. of Electrical Eng. Hong-ik University, Seoul, 121-791

*Electrical Energy Conservation Div., RaCER, Seoul 137-060

Abstract

This paper presents an operation and planning model of integrated energy systems which consist of small scale cogeneration systems, thermal accumulator, ice storage and electrical energy storage systems. In the proposed planning model, an optimization of total cost which contains investment, operation, thermal shortage and salvage costs has carried out with the maximum principle based on the lifetime of each system component and unit price per capacity. From this model, optimal investment capacity per annum can be determined during the studied periods using the marginal costs according to the operation characteristics of each system component.

1. 서론

최근 우리나라의 에너지 소비는 년 9.6%로 증가하고 있고, 에너지 해외의존도도 점차 높아져 '96년에는 약 97%가 되었다. 또한 FCCC(기후변화협약)와 OECD 가입에 따라 환경규제가 강화될 것이므로, 에너지절약과 환경에 대한 대책이 마련되어야 한다.

이러한 대책 중 열병합시스템은 하나의 에너지원으로부터 전기와 열을 동시에 생산하여 총효율이 2배가 증가한 75~85%에 이르고, 또한 청정연료인 가스를 사용함으로써 상기 목적의 달성이 가능하다.

본 연구실에서는 소형 열병합발전시스템의 운전, 투자모형 및 축열조를 고려한 운전모형 등에 대해 발표한 바 있고[1], Timothy Yau가 전기저장장치(배터리)의 계통연계에 대해 발표하였고[2] 건물용 빙축열시스템에 대한 Knebel, P.E의 연구에서는 실측자료를 사용하여 시스템 특성을 모형화하였으나[3] 종합적인 관점에서 운전 및 투자모형에 대해서는 제시된 바가 없다.

본 논문에서는 건물용 소형 열병합발전시스템을 중심으로 축열조, 전기저장장치, 빙축열시스템의 시스템 특성과 손실을 반영한 확률론적 운전모형을 제안하고, 각 설비의 설비한계비용의 산법을 제시함으로써 최대원리를 이용하여 적정규모를 구할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 알고리즘의 효용성을 입증하기 위해 실제 건물을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

2. 종합 에너지시스템 구성요소의 시스템특성

2.1 시스템 구성

그림 2.1은 종합 에너지시스템의 전기와 열에너지 흐름이다.

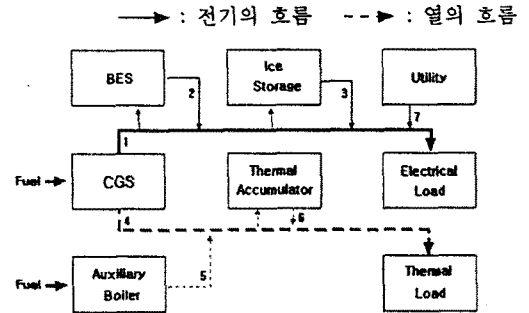


그림 2.1 종합 에너지시스템의 구성도

2.2 구성요소의 시스템 특성

2.2.1 전기저장장치

전기저장장치(BES; Battery Energy Storage)는 여러 개의 셀로 구성된 축전지 형태로서 전지부와 계통과의 연계를 위한 전력변환장치, 변압기, 필터 등으로 구성되며, 전지의 용량은 Ah 단위를 kW 단위로 치환하여 사용하였다. 시스템 특성은 용량의 100%로 충방전운전이 가능하고, 일간 손실(자기방전율)은 0.147%로 모델에서는 이를 고려하지 않았으며, 충방전시 각각 10%의 손실발생과 정전력 입출력을 가정하였다. 이에 따른 수리모델은 다음과 같다.

i) 최대 충전제약

$$P_c^{t'} \leq \min \left\{ P_{c,MAX} - \frac{P_0^{t'}}{(1-\eta_c)}, P_{c,max}^{t'} \right\} \quad (2-1)$$

이 때,

$$P_0^{t'+1} = P_0^{t'} + (1-\eta_c)P_c^{t'} - \frac{P_d^{t'}}{(1-\eta_d)} \quad (2-2)$$

ii) 최소 방전제약

$$P_d^{t'} \leq \min \left\{ (1-\eta_d)P_0^{t'}, P_{d,max}^{t'} \right\} \quad (2-3)$$

iii) $P_c^t \geq 0, P_d^t \geq 0$ (2-4)

2.2.2 빙축열시스템

심야전력을 이용하여 얼음을 저장(제빙)하고 이를 주간에 방출(해빙)함으로써 냉방부하를 담당하는 빙축열시스템은 냉동기의 가동여부에 따라 전체축열과 부분축열방식이 있는데, 본 논문에서는 냉방부하의 40%를 축열하여 냉동기와 함께 가동하는 부분축열방식을 채택하였다. 시스템 특성은 제빙시 일정전력을 소비하므로 이를 모델에서 상수로 반영하였으며, 제·해빙은 심야(22:00~08:00)시간대에 제빙을 하고, 주간에 해빙하도록 하였다. 또한 용량의 100% 제·해빙 운전이 가능하고, 빙축열조 내부손실은 시간당 1.6%로 하였다. 이에 대한 수리모델은 다음과 같다.

i) 빙축열시스템의 해빙제약

$$P_{is}^{p,t} \leq \min \{ (1 - \eta_{is}) P_{0, is}^{p,t}, P_{is}^{p,t, \max} \} \quad (2-5)$$

이 때,

$$P_{0, is}^{p,t+1} = P_{0, is}^{p,t} - \frac{P_{is}^{p,t}}{(1 - \eta_{is})} + L_{is}^{p,t} \quad (2-6)$$

$$\text{ii) } P_{is}^{p,t} \geq 0 \quad (2-7)$$

2.2.3 축열조(Thermal Accumulator)

축열조는 잉여열을 온수로 저장하는 대형 물탱크 형태로, 시스템 특성은 축열조 내부에서의 열손실을 시간당 0.15%, 축·방열시 운전비용은 발생하지 않는다. 축열조의 수리모델은 다음과 같다.

i) 축열조 저장제약

$$Q_s^{p,t} \leq \min \{ Q_{MAX} - \frac{Q_0^{p,t}}{(1 - \eta_s)}, Q_s^{p,t, \max} \} \quad (2-8)$$

이 때,

$$Q_0^{p,t+1} = Q_0^{p,t} + (1 - \eta_s) Q_s^{p,t} - \frac{Q_u^{p,t}}{(1 - \eta_u)} \quad (2-9)$$

ii) 축열조의 출력제약

$$Q_u^{p,t} \leq \min \{ (1 - \eta_u)(Q_0^{p,t} - Q_{\min}), Q_u^{p,t, \max} \} \quad (2-10)$$

$$\text{iii) } Q_s^{p,t} \geq 0, Q_u^{p,t} \geq 0 \quad (2-11)$$

3. 운전모형 및 설비한계비용 계산

3.1 목적함수

식 (3-1)은 선형계획법으로 풀기위한 확률론적 운전모형의 목적함수이다.[1]

$$OC = \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} s_p OC^{p,t} \Delta t \quad (3-1)$$

$$= \sum_{t=1}^{NT} \sum_{p=1}^{NP} s_p \left(\text{Minimize} \sum_{i=1}^I a_i P_{Gi}^{p,t} + b Q_{Ai}^{p,t} + c P_{is}^{p,t} + f Z^{p,t} \right) \Delta t$$

3.2 제약조건

앞에서 제시한 각 설비의 운전 제약조건식에 부하제약조건을 추가하면 다음과 같다.

3.2.1 전기부하 제약

i) 빙축열시스템의 제빙운전시는 일정 전력을 소비하므로 부하이다.

$$L_E' + L_S^{p,t} = (1 - \alpha_1) \sum_{i=1}^I P_{Gi}^{p,t} + (1 - \alpha_7) P_b^{p,t} - P_c^{p,t} + (1 - \alpha_2) P_d^{p,t} \quad (3-2)$$

ii) 빙축열시스템의 해빙운전시는 냉방부하를 담당하는 전원이다.

$$L_E' = (1 - \alpha_1) \sum_{i=1}^I P_{Gi}^{p,t} + (1 - \alpha_7) P_b^{p,t} - P_c^{p,t} + (1 - \alpha_2) P_d^{p,t} + (1 - \alpha_3) P_{is}^{p,t} \quad (3-3)$$

3.2.2 열부하 제약

$$L_Q' \leq (1 - \alpha_4) \sum_{i=1}^I \beta_i P_{Gi}^{p,t} + (1 - \alpha_5) Q_{Ai}^{p,t} - Q_s^{p,t} + (1 - \alpha_6) Q_u^{p,t} + Z^{p,t} \quad (3-4)$$

3.3 설비한계비용

설비한계비용은 부하 증가에 대비하여 적정 설비 투자를 하는 경우, 설비가 한 단위 증가하였을 때 발생하는 운전비와 공급지장비의 증분비용을 말하는 것으로 투자결정에 있어 중요한 지표가 된다.

본 논문에서는 운전모형에서 설비의 운전상태로부터 발생할 수 있는 경우의 수를 모두 고려하여, 이중 실제로 발생하는 경우에 대해서 설비한계비용을 계산할 수 있는 접근법을 제안한다. 전기저장장치의 설비한계비용(MC_c', MC_d')는 다음과 같다.

3.3.1 소형 열병합이 최대 출력인 경우

$$MC_c' = \frac{c}{(1 - \alpha_7)},$$

$$MC_d' = - \max \left\{ a \frac{(1 - \alpha_2)}{(1 - \alpha_1)}, c \frac{(1 - \alpha_2)}{(1 - \alpha_1)} \right\} \quad (3-5)$$

3.3.2 소형 열병합이 최대 출력이 아닌 경우

i) 전력구입이 발생하는 경우

$$MC_c' = \min \left\{ \frac{a}{(1 - \alpha_1)}, \frac{c}{(1 - \alpha_7)} \right\}$$

$$MC_d' = - \max \left\{ a \frac{(1 - \alpha_2)}{(1 - \alpha_1)}, c \frac{(1 - \alpha_2)}{(1 - \alpha_1)} \right\} \quad (3-6)$$

ii) 전력구입이 발생하지 않는 경우

$$MC_c' = \frac{a}{(1 - \alpha_1)}, MC_d' = -a \frac{(1 - \alpha_2)}{(1 - \alpha_1)} \quad (3-7)$$

같은 방법으로, 구성요소의 설비한계비용은 각 설비의 운전상태가 최대 입/출력인 상태에서만 발생함을 알 수 있다.

4. 최적 투자규모 선정

4.1 투자계획의 개념

종합 에너지시스템의 설치비는 자금이 많이 투입되는 항목으로, 장기적인 관점에서 본 최적 계획이 필요하다. 경제모형은 고려 대상기간 동안만 시스템이 운전한다고 보아 검토대상기간 말기에 잔존가치를 회수하는 한계기간모형을 사용한다.

4.2 최적 투자모형

목적함수인 총비용은 투자비, 운전비, 공급지장비 및 잔존가치로 구성하고, 최적화기법으로는 최대원리법을 채용하여 최적조건을 도출한다.

조건식으로 나타나는 투자수익은 설비한계비용, 투자단가 및 잔존가치를 이용하여 계산되며 이 결과를 이용, 새로운 각 설비의 투자용량을 결정하게 되

고, 반복 계산하여 이 값이 허용오차 범위 이내로 수렴하면 최적 투자량이다.[4]

5. 사례연구

5.1 입력자료

복합건물인 L건물을 샘플시스템으로 사례연구를 수행하였고, 이 때 입력한 자료는 다음과 같다.

표 5.1 설비투자단가와 수명자료

	소형 열병합	축열조	전기저장 장치	빙축열 시스템
투자단가 [원/kW]	2,066,558	50,000	700,000	67,000
수명 [년]	15	10	10	20

표 5.2 비용계수 [원/kWh]

열병합 발전단가	보조보일러 발전단가	전력구입 단가(주간)	전력구입 단가(야간)	열공급 저장비
65	21	68.8	24.6	210

5.2 결과분석 및 검토

그림 5.1은 샘플시스템의 전기관련 설비의 운전양상을 나타내고 있고 그림 5.2는 열관련설비에 대한 것이다.

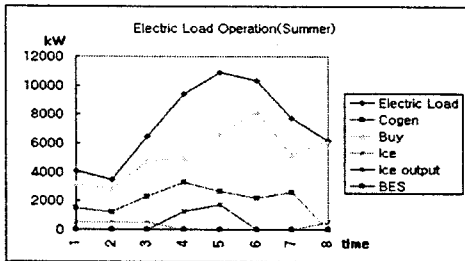


그림 5.1 전기부하 관련설비의 운전양상

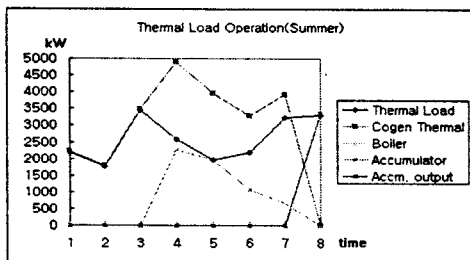


그림 5.2 열부하 관련설비의 운전양상

표 5.3 각 설비의 적정 투자용량

	소형 열병합	축열조	전기저장 장치	빙축열 시스템
투자용량 [원/kW]	3,273.91	3,860.30	0	3,684.35

표 5.3은 시뮬레이션의 결과인 각 설비의 적정 투자용량을 나타낸 것이다. 적정규모 계산시 반복횟수는 18-21회였고, 수렴 오차는 2% 이내였다. 전기저장장치는 향후 기술개발로 현재의 1/3 정도의 투자단가를 가진다면 투자가 발생한다는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 소형 열병합발전시스템, 축열조, 전기저장장치 및 빙축열시스템을 포함한 건물용 종합 에너지시스템의 확률론적 운전 및 투자 모형을 수립하고, 설비한계비용을 산정하는 계산식을 제안함으로써 각 설비에 대한 적정규모를 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

참고문헌

- [1] 김 정훈 외, "건물용 열병합발전설비를 중심으로 한 종합 에너지시스템의 최적 일간 운전모형 수립에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 724~726, 1996. 7.
- [2] Timothy Yau, et al., "Effects of Battery Storage Device on Power System Dispatch", IEEE Trans. on PWRs, Vol PAS-100, No. 1, pp. 375-383, Jan. 1981
- [3] Knebel.P.E, "Thermal Storage with Ice-Harvesting System", International Load Management, pp. 253-269, 1986
- [4] J. H. Kim, et al., "Long-term Based Optimal Sizing of A Building Cogeneration System", IEEE Conference on Electricity Sector Development and DSM, Kuala Lumpur, MALAYSIA, pp. 31 - 38, 1995.11.

기호설명

- $P_c^{b,t}, P_d^{b,t}$: t 구간의 총, 방전량 [kW],
- P_c^{MAX} : 전기저장장치의 용량 [kW]
- $P_0^{b,t}$: t 구간에서의 초기 충전량 [kW]
- $P_c^{P,t}, P_d^{P,t}$: t 구간의 최대 총, 방전량 [kW]
- $L_{is}^{b,t}, P_{is}^{b,t}$: t 구간의 제, 해빙양 [kW]
- $P_{is}^{b,t}$: t 구간의 최대 충전량 [kW]
- $P_{0is}^{b,t}$: t 구간에서의 초기 제빙양
- $Q_s^{b,t}, Q_s^{P,t}$: t 구간의 축, 방열량 [kW],
- Q_{MAX}, Q_{min} : 축열조 최대, 최소 저장량 [kW],
- $Q_0^{b,t}$: t 구간 초기의 축열량 [kW],
- $Q_s^{P,t}, Q_d^{P,t}$: t 구간의 최대 총, 방전량 [kW]
- $a_1 \sim a_7$: 각 선로의 손실
- η : 열손실 계수
- OC : 전체 운전비 [원]
- $OC^{b,t}$: t 구간에서의 운전비 [원]
- NT : 전체 구간수
- NP : 전체 확률 사건수
- n : 발전기 대수
- a_i : i 발전기의 발전단가 [원/kWh],
- a : 한계발전기 단가 [원/kWh],
- b : 보조보일러의 열단가 [원/kWh],
- c : 전력구입단가 [원/kWh],
- f : 열공급저장단가 [원/kWh],
- $P_{Gt}^{b,t}$: 소형 열병합의 전기출력 [kW],
- $Q_A^{b,t}$: 보조보일러의 열출력 [kW],
- $P_A^{b,t}$: 전력회사로부터 구입한 전력 [kW],
- $Z^{b,t}$: 공급저장열 [kW]
- Δt : 구간의 지속시간 [시간]
- s_p : p 사건이 일어날 확률
- β_i : i 발전기의 열전비
- L_E^t, L_Q^t : t 구간의 전기부하와 열부하 [kW]