

동적 계획법을 이용한 냉방시스템 최적운전에 관한 연구

유성연, 한규현[†], 이제묘^{*}, 이일수^{**}

충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단, ^{*}국가핵융합연구원, ^{**}한국표준과학연구원

A Study on Optimal Operation of Cooling System Using Dynamic Programing

Kyu-Hyun Han[†], Seong-Yeon Yoo, Je-Myo Lee^{*}, Il-Su Lee^{**}

BK21 Mechatronics Group at Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

^{*}National Fusion Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

^{**}Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea

ABSTRACT: The objective of this study is to find the optimal operational planning of the hybrid cooling system, which is combined by ice storage system and the absorption chiller. The optimization technique used in this study is dynamic programming. The objective function is summed cost during a day including charge and discharge periods of ice storage system and operation time of absorption chiller. Assuming that initially ice storage tank is stored fully and the cooling load is perfectly predicted for the operational planning. This method provides the most efficient and economic combination of equipment operational planning for cooling with respect to energy consumption cost.

Key words: optimal operation planning(최적운전계획), cooling system(냉방시스템), dynamic programming(동적계획법), cooling load(냉방부하), energy consumption cost(에너지 비용)

기 호 설 명

C : 에너지 비용 [Won/h]
 E : 공급부하율 [kW]
 E_{nom} : 공칭용량 [kW]
 E_{min} : 최소용량 [kW]
 E_p : 예측냉방부하 [kW]
 J : 전체가격함수 [Won/h]
 k : 단위시간 [h]

그 리 스 문 자

β : 성능계수

1. 서 론

우리나라 전체 에너지 수요 중 30%는 건물 부문이 차지하고 있으며, 건물에너지 사용량 중 50%가 냉·난방과 관련된 공조설비 유지관리에 사용되고 있다.⁽¹⁾ 따라서 건물의 냉난방에너지를 절감하는 것은 매우 중요한 국가적인 과제이며, 이를 위해서 빙축열, 수축열, 지열, 지역냉방과 같은 환경 친화적이고, 에너지 절약적인 냉방시

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-8901; fax: +82-42-821-8894

E-mail address: lovelyday00@naver.com

시스템이 건물의 냉방에 적용되어 확산되고 있다. 이러한 냉방시스템들은 건물의 지리적 환경이나 에너지 수요 패턴에 따라 여러 장치가 조합된 형태로 구성되어 있고, 운전 전략도 다양하기 때문에 쾌적한 냉방조건과 에너지 절감을 동시에 달성하기 위한 효과적인 냉방시스템의 운전 방법이 매우 중요하다. 이러한 점을 고려할 때 냉방시스템의 효과적인 운전 전략을 실질적으로 달성하는 운전자를 위한 최적제어 기술개발이 필요하다. 즉 운전자가 건물의 시간별 냉방부하 수요 패턴을 미리 예측하여 사전에 파악하도록 안내해주고, 예측된 냉방부하를 바탕으로 시간별, 계절별로 달라지는 전기 및 가스 요금을 고려한 시스템 운전 전략을 수립하는 프로그램이 있다면 냉방시스템의 효율적인 운용과 에너지 사용량 절감이 가능할 것이다.

냉방시스템의 최적제어 관련 국·내외 기술은 냉방부하의 정확한 예측에 의한 안정된 운전이 필요한 빙축열 시스템 최적제어 관련 연구개발에 집중되어 있다. Rupanagunta et al⁽²⁾은 현대 제어 이론을 빙축열 시스템의 운전제어에 적용한 연구를 발표하였다. 빙축열 시스템을 상태변수적 시스템으로 보고, 시스템의 운전을 시간에 대하여 이산화한 최적제어문제로 설정하여 운전전략을 24시간에 걸친 운전비용을 최소화하는 것으로 정의하였으며, 시스템에 주어지는 냉각요구량과 개개의 시스템 구성요소에 대한 용량을 제한조건으로 설정하였다. 사용한 최적화 알고리즘은 generalized reduced gradient 알고리즘이다. Lee et al⁽³⁾은 빙축열 시스템에 있어 운전비용을 최소화시킬 수 있는 방안으로서 냉방부하를 정확히 예측한다는 가정하에 dynamic programming을 이용하여 최적운전을 계획하고 시스템 운전 시뮬레이션을 수행한 결과 기존의 시스템 제어방식인 냉동기 우선방식과 빙축열 우선방식에 비해 에너지소비량 및 운전비용이 절감되었음을 확인하였다. OoKa et al⁽⁴⁾은 선택된 냉방시스템을 구성하는 냉동기들의 최적운전조합을 찾기 위해 건물 에너지 수요 및 장치들에 관련된 데이터를 유전 알고리즘의 입력 데이터로 하여 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량을 최소화 하는 방법을 모색하였다. Kwon et al은 실제 다중 복합 시설 건물을 대상으로 실제 냉동기 운전 방식 및 생산단가에 따른 원가절감 냉동기 운전 알고리즘과 프

로그래를 개발하여 실제 운전방식과 비교하는 연구를 하였다.

본 연구에서는 대규모 냉방에너지를 소비하는 건물에 냉방을 공급하는 집단냉방에너지 시스템 중 빙축열 시스템과 흡수식 냉동 시스템으로 구성된 냉방시스템의 최적운전을 모색하기로 하였다. 즉 미리 예측된 냉방부하를 만족시키는 범위에서 냉방 시스템에 설비된 냉동기 별 성능계수와 에너지 가격을 고려한 운전 시뮬레이션 방법을 모색하기 위해 정확한 냉방부하예측을 가정하고, 동적계획법(dynamic programming) 기법을 적용하여 운전비용을 최소화 시키는 최적병렬운전계획을 제안하였다.

2. 시스템 최적운전 기법

가장 효율적이고 경제적인 최적화된 냉방시스템 운전을 하려면 냉방부하를 예측하고 이에 따라 운전비용을 최소화할 수 있는 최적화 기법을 적용함으로써 더욱 운전비 절감을 꾀할 수 있을 것이다.

Table 1에서 보는 바와 같이 우리나라의 전력 요금은 복잡한 구조를 가지고 있으며, 동일 량의 에너지를 사용하더라도 계절별, 시간대별로 따라서 다른 요금을 지불해야 한다. 또한 흡수식 냉동기와 같은 가스냉방을 할 경우 도시가스 요금 체계를 참조해야 하기 때문에 더욱 복잡해진다. 즉 경제적인 냉방 시스템 운전을 위해서는 에너지원의 다원화 및 다각적인 검토를 하여 에너지 정책 제도적인 혜택을 통해 에너지원단위를 최소화할 수 있는 전략으로 운전하는 것이 바람직하다. 따라서 다양한 열원으로 구성된 냉방시스템을 최적으로 운전하기 위해서는 이미 냉방운전이 시작되기 이전에 운전계획을 수립하여야 하며, 냉방 운전기간에 해당하는 시간 동안의 냉방부가 미리 예측 되어야 한다. 최적운전계획을 위해서 모든 시스템의 시뮬레이션은 임의의 시간간격으로 분할한 상태에서 계산하며, 건물 냉방부하는 독립변수로 고려한다. 시간에 따라 일전간격으로 분할한 형태로서 하루 중 운전비용을 최소화하려는 최적화 문제는 다음과 같은 목적함수로 표현된다.

Table 1. Electric power fee

구 분		기본요금 (원/kW)	전 력 량 요 금(원/kWh)			
			시간대	여름철 (7~8월)	봄, 가을철 (4~6,9월)	겨울철 (10~익년3월)
고압 A	선택 I	5,320	경 부 하	42.50	42.50	42.50
			중간부하	85.30	63.50	79.50
			최대부하	146.40	85.30	106.80
	선택 II	6,120	경 부 하	38.30	38.30	38.30
			중간부하	81.10	59.40	74.40
			최대부하	142.50	81.10	101.70
고압 B	선택 I	5,320	경 부 하	41.20	41.20	41.20
			중간부하	82.50	61.50	77.10
			최대부하	141.40	82.50	103.40
	선택 II	6,120	경 부 하	37.00	37.00	37.00
			중간부하	78.50	57.50	72.50
			최대부하	137.40	78.50	98.30

Minimize

$$J(k) = \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^N E(k,n) C(k,n) \beta(k,n) \Delta t \quad (1)$$

위 식에서 $J(k)$ 는 임의의 시간 k 에서의 총 에너지 비용을 나타내며, $E(k,n)$ 는 임의의 시간 k 에서 임의의 열원 n 이 감당하게 될 에너지 소비율이고, $C(k,n)$ 는 각 열원에 해당하는 표 1과 2에서와 같은 전기 및 가스 요금이며, $\beta(k,n)$ 은 열원별 성능계수를 의미한다. 시스템에 필요한 제한조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$\sum_{n=1}^N E(k,n) = E_p(k) \quad (2)$$

$$E_{nom}(n) \geq E(k,n) \geq E_{min}(n) \quad (3)$$

식 (2)의 의미는 어떤 순간 k 에서의 모든 열원들의 에너지 소비율의 합은 예측된 냉방부하 $E_p(k)$ 와 같아야 한다는 것이다. 식 (3)은 임의의 열원이 공칭용량 $E_{nom}(n)$ 을 초과할 수 없고, 시스템의 성능 및 안정성을 위해 최소용량 $E_{min}(n)$ 이상으로 운전되어야 함을 의미한다. 따라서 해당 열원의 공칭용량 및 최소용량은 열원 제작사에서 제시하는 값을 이용할 수 있고, $\beta(k,n)$ 은 열원의 성능곡선으로부터 추정할 수 있다.

3. 시스템 최적운전 시뮬레이션

Fig. 1은 4개의 개별 건물로 구성된 연구소 건물에 냉방부하를 공급하는 냉방시스템에 본 최적화 기법을 적용해 본 결과이다. 냉방시스템의 공급부하는 심야전력을 이용하는 1,890 USRT.h 용량의 빙축열조 방냉, LNG를 열원으로 하는 330USRT 용량의 흡수식 냉동기, 전력을 열원으로 하는 123 USRT 용량의 터보 냉동기로 구성되어 있다. 적용한 냉방시스템으로부터 부하를 공급받는 건물들은 정밀 실험실이 위치한 건물로서 24시간 냉방이 필요할 뿐만 아니라 4월부터 10월까지 지속적으로 냉방이 필요한 건물이기도 하다. Fig. 1의 결과는 7월 임의의 날을 선정하여 모의 실험을 실행한 결과이다. 최적제어가 적용된 냉방시스템은 빙축열 시스템으로 구성되어 있기 때문에 전력요금이 가장 비싼 최대부하 요금 시간대인 13시에서 17시까지 축냉조의 방냉을 통해 냉방을 공급하는 운전을 하고 있으며, 그 외 주간 시간은 가스를 열원으로 하는 흡수식 냉동기에 의해 운전되고 있음을 볼 수 있다. 또한 경부하가 적용되는 야간에는 가스의 요금이 전력요금보다 비싸기 때문에 야간 냉방은 터보 냉동기가 우선순위로 감당하며 모자라는 부분은 흡수식 냉동기가 담당하고 있다. 운전 시뮬레이션 결과 공급부하로 인해 소모된 각 장치요소별 에너지

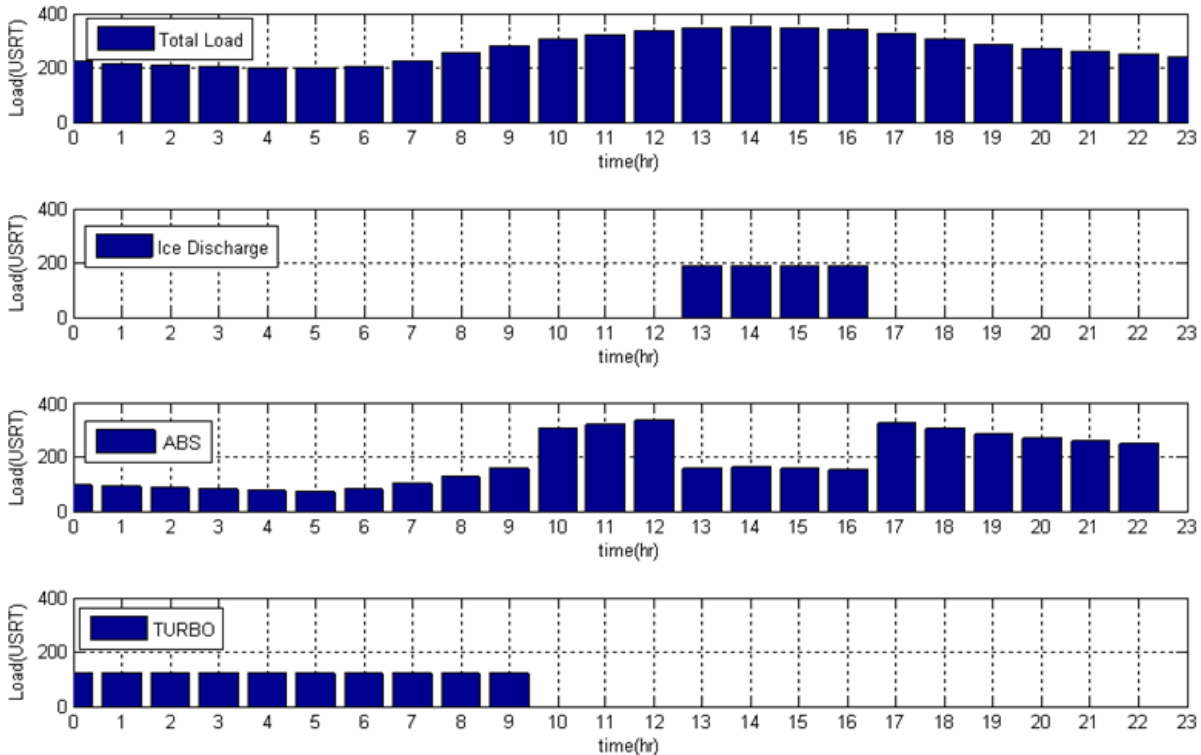


Fig. 1 The optimal operation simulation results of hybrid cooling system

비용 합계는 382,690원으로 추정되었다. 여기서 각 냉동기의 펌프나 벨브, 냉각탑과 같은 세부 운영비는 제외하였다.

4. 결 론

대규모 냉방에너지를 소비하는 건물에 냉방을 공급하는 집단냉방에너지 시스템 중 빙축열 시스템과 흡수식 냉동 시스템으로 구성된 냉방시스템의 최적운전을 모색하기로 하였다. 즉 미리 예측된 냉방부하를 만족시키는 범위에서 냉방 시스템에 설비된 냉동기 별 성능계수와 에너지 가격을 고려한 운전 시뮬레이션 방법을 모색하기 위해 정확한 냉방부하예측을 가정하고, 동적계획법(dynamic programming) 기법을 적용하여 운전비용을 최소화 시키는 최적병렬운전계획을 제안하였다.

참고문헌

1. Korea Energy Management Corporation, "Statistical Analysis on the Electric Power Consumption of Individual Usage of Building", 2002
2. Rupanagunta, Paresh, Baughman, Martin L. and Jones, Jerold W., 1995, Scheduling of Cool Storage Using Non-linear Programing Techniques, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1279-1285.
3. K. H. Lee, B. T. Choi, Y. J. Joo, S. R. Lee, S. H. Han, 2000, Optimal Scheduling of Ice Storage System with Prediction of Cooling Loads, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering-Journal of SAREK, Vol. 12, No. 11, pp982-994