

직접부하제어자원으로써 에어컨 주기제어 방법론 개발

두석배*, 김정옥*, 김형중**, 김희철**, 박종배***, 신종린***
 *(주)나오디지털, **에너지관리공단, ***건국대학교

Development of Control Method for Air-Conditioner as the Resources of DLC

Seog Bae Doo*, Jeoung Uk Kim*, Hyeong Jung Kim**, Hoi Cheol Kim**, Jong Bae Park***, Joong Rin Shin***
 *NAO Digital Co., **The Korea Energy Management Co., ***Konkuk University

Abstract - This paper presents a methodology for satisfying the thermal comfort of indoor environment and reducing the summer peak demand power by minimizing the power consumption for an Air-conditioner within a space.

KEPCO(Korea Electric Power Corporation) use the fixed duty cycle control method regardless of the indoor thermal environment. This method has disadvantages that energy saving depends on the set-point value of the Air-Conditioner and DLC has no net effects on Air-conditioners if the appliance has a lower operating cycle than the fixed duty cycle.

A variable duty cycle estimates the PMV(Predict Mean Vote) at the next step with a predicted temperature and humidity coming from the back propagation neural network model. It is possible to reduce the energy consumption by maintaining the Air-conditioner's OFF state when the PMV lies in the thermal comfort range.

The proposed methodology uses the historical real data of Sep. 7th, 2001 from a classroom in Seoul to verify the effectiveness of the variable duty cycle method comparing with fixed duty cycle.

The result shows that the variable duty cycle reduces the peak demand to 2.6times more than fixed duty cycle and increases the load control ratio by 8% more. Based on the variable duty cycle control algorithm, the effectiveness of DLC is much more improved as compared with the fixed duty cycle.

과 피크억제 목적의 원격제어에어컨을 구입, 설치하는 수용가에게 기기 설치비의 일부를 한국전력이 지원하며, 다만 한국전력의 육지전력계통과 연계되지 않은 도서지역, 무선 중계시설이 없는 지하층, 산간오지, 낙도 등은 지원대상에서 제외하고 있다.

한국전력의 팩키지 에어컨 원격 제어는 단방향성 무선 수신기를 팩키지 에어컨에 부착하여 OFF 제어 기능, 일괄 온도 제어 기능, +N℃ 온도제어 기능, 주기제어 기능, 정상복귀 기능등을 수행할 수 있다. 이들중 대표적인 제어방식이 주기제어이며, 이는 에어컨을 크게 두 개의 그룹으로 분류하고 그룹별로 정상동작(10분)과 OFF동작(10분)을 주기적으로 반복하는 것으로서, 운전시간을 정상운전시 보다 적게 함으로써 에너지 절감을 달성하기 위한 방식이다.[2]

해의 경우 에어컨을 이용한 직접부하제어 (DLC: Direct Load Control)에 대해서는 미국과 대만에서 많은 논문이 발표되고 있으며, 대부분 피지로직을 이용한 연구가 주류를 이루고, 개별적인 제어 관점이 아닌 전력계통과 연계한 시스템 관점에서 접근하고 있다. [3]

본 논문에서는 기존의 에어컨 직접부하제어가 실내 환경을 고려하지 않고, 고정주기에 의한 제어를 실행함으로써 발생하는 제어효과의 비효율성을 개선하고, 직접부하제어 실행 시간대에 실내 거주자의 쾌적도를 고려하면서 에어컨의 소비전력을 최소화하여 하절기 최대 수요전력을 경감하기 위한 제어방법론을 제시하고자 한다.

2. 가변 주기제어 알고리즘

2.1 문제의 정식화

가변 주기제어 알고리즘은 단일 공간에 위치한 단일 에어컨에 대하여 실내 환경 조건을 고려하면서 에어컨의 소비전력 최소화하기 위한 제어방법론을 제시하는데 있으며, 이를 위한 목적함수를 아래와 같이 정의된다.[4]

$$\text{Minimize } E = \sum_{n=1}^N L(n) \quad (1)$$

$$L(n) = L_{ACTUAL}(n) - L_{DLC}(n) + L_{PB}(n) \quad (2)$$

여기서,

E : N 제어 사이클 동안 소비된 총 전력 에너지
 n : 현재의 제어 사이클 단계, 바로이전 단계는 n-1

LACTUAL : 정상적인 상태에서의 실내 냉방부하 총량

LDLC : DLC에 의한 차단 부하량

LPB : Payback에 의한 부가 부하량

if t=TON, LDLC(n) = 0

if t=TOFF, LDLC(n) = LACTUAL(n)+ LPB(n)

LPB(n) = αLDLC(n-1)+ βLDLC(n-2)+ γLDLC(n-3)

α,β,γ: 이전 DLC 에 따른 Payback 영향 계수

1. 서 론

우리나라의 냉방부하는 매년 급속도로 성장하고 있으며 하절기 전력수요의 증가는 대부분 냉방부하로부터 기인하므로, 냉방부하의 조절 및 제어는 국가의 에너지사용 효율극대화 측면에서 매우 중요한 사안이 되었다. 국내 하계 냉방부하 특성을 분석해보면 냉방부하중 에어컨이 차지하는 부분이 적지 않다. 에어컨은 1990년대 초까지는 사무실 또는 부유층 대상기기로 여겨져 왔으나, 1994년 후서로 인하여 그 보급이 확대되었고, 1997년, 1998년 IMF의 영향으로 보급률이 잠시 감소하다가 1999년 4월 이후 평균 온도가 25도 이상의 고온현상 및 에어컨 제조사의 할인 경쟁으로 보급률이 상승 하였다. 2002년 기준 9,956천대의 에어컨이 공급되어 냉방부하 8,910MW, 피크대비 19.5%의 점유율을 보이고 있다.[1]

이에 한국전력에서는 팩키지 에어컨을 대상으로 원격제어에어컨 보급지원제도를 1999년 7월부터 실시하고 있으며, 이 프로그램에 참여하는 수용가들에게 일정금액을 리베이트로 지원하는 형태이다. 즉, 소비전력이 2kW이상인 팩키지 에어컨(18평 - 83평용)으로서 전기소비절약

정의된 목적함수의 $L_{DLC}(n)$ 에 대하여 주기제어의 가동시간 $T_{on}(n)$, 정지시간 $T_{off}(n)$ 에 관하여 풀어서면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L(n) = L_{ACTUAL}(n) - L_{DLC}(n) + L_{PB}(n)$$

$$= L_{ACTUAL}(n) - \frac{T_{off}(n)}{(T_{on}(n) + T_{off}(n))} L_{ACTUAL}(n) + L_{PB}(n)$$

$$= L_{ACTUAL}(n) \left(\frac{T_{on}(n)}{(T_{on}(n) + T_{off}(n))} \right) + L_{PB}(n) \quad (3)$$

위 식의 우변항을 $T_{on}(n)$ 로 나누어 정리하고

$$\frac{T_{off}(n)}{T_{on}(n)} = k(n)$$

라 두면, 식 (3)은

$$L(n) = L_{ACTUAL}(n) \frac{1}{1+k(n)} + L_{PB}(n) \quad (4)$$

정의된 목적함수에 있어 제약조건이 없는 경우 $L_{DLC}(n)$ 의 양을 최대화함으로써 목적함수를 만족할 수 있다. 하지만 $L_{DLC}(n)$ 의 양을 최대화하는 경우는 에어컨의 동작을 항상 OFF상태로 유지하는 것으로 이는 수용가의 불만을 야기 시킬 수 있다. 이러한 이유로 다음과 같이 실내 환경의 쾌적도(PMV)가 만족되는 경우 에어컨 OFF제어가 가능하게 하는 제약조건을 정의 한다.

$$T_{off}(n) = f(PMV(n+1)) \quad (5)$$

$$= func(Temp(n+1), Humd(n+1))$$

여기서 PMV는 ISO Standard 7330에 규정하고 있는 PMV 계산법을 적용하였다[5].

$$PMV = (0.303 e^{-0.0036m} + 0.28) [(M-W) - H - Ec - Eres - Cres] \quad (6)$$

식 (5)에서와 같이 에어컨에 대한 $T_{off}(n)$ 을 결정하기 위해서는 현재 단계에서 수집된 데이터를 통한 다음단계 10분후의 온도와 습도가 예측되어야 하고, 예측값 $Temp(n+1)$ 과 $Humd(n+1)$ 을 이용하여 계산된 PMV가 쾌적범위를 만족해야 하므로 아래와 같이 제약조건을 구체화할 수 있다.

$$\text{if}(PMV(n+1) < 0.5),$$

$$\text{then } T_{off}(n) = T_{OFF} + T_{OFF} = 2T_{OFF} \quad (7)$$

$$\text{else } T_{off}(n) = T_{OFF}$$

정의된 목적함수와 제약조건을 토대로 가변주기제어를 위한 제어흐름도를 그림1에 보였다.

2.2 신경회로망의 구현

2.2.1 입력 자료의 선정

한국전력은 냉방 부하의 직접제어로 하계피크부하를 감소시켜 효율적 수요관리와 전력설비 건설에 따른 투자비 감소효과를 극대화하기 위해 원격에어컨 제어사업의 시행 시점은 7월과 8월 오후 2시부터 4시 사이에 10분 가동, 10분 정지의 주기제어로 운영하고 있다.[2] 따라서 본 논문에서는 하절기간인 7월, 8월 오후 시간대에 수집한 데이터를 신경회로망의 입력 자료로 사용한다. 실내 온도 예측시 사용되는 20개의 입력 자료는 예측시 이전 10분간 실내온도 (분당 1개의 입력자료), 10분간 실외온도(분당 1개의 입력자료)이며, 실내습도 예측시 사용되는 20개의 입력 자료는 예측시 이전 10분간 실내습도 (분당 1개의 입력자료), 10분간 실외습도(분당 1개의 입력자료)

이다. 신경회로망의 학습용 데이터로 이용하기 위하여 각 데이터는 에어컨 정지 후 20분간의 데이터를 수집하였다.

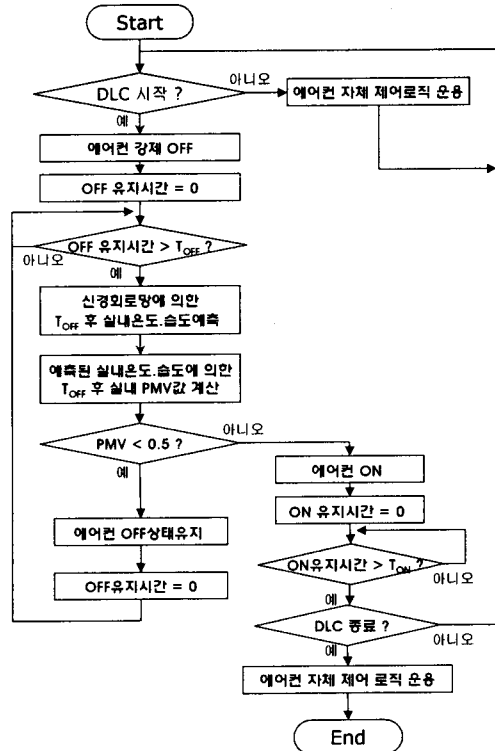


그림 1 가변 주기제어 흐름도

Fig 1 Flow chart for a variable duty cycle control

2.2.2 알고리즘 학습요소 결정

본 논문에서 사용한 활성화함수는 단극활성함수(Binary sigmoid activation function)이고, 적용된 λ 값은 1로 두었다. 아울러 학습률은 예측치가 최소지점을 지나쳐버리는 오버슈트가 일어나지 않도록 하기 위하여 0.01을 선택하였고, 모멘텀항은 0.1을 사용하였다.

3. 사례연구 및 고찰

고정 주기제어 방식과 제시된 가변 주기제어 방식과의 비교를 위하여 서울 안암동 소재 강의실의 2001년 9월 7일 오후 2시 이후의 데이터를 이용하여 그 성능을 분석하였다. 수집데이터는 평균 45분의 제어 사이클을 갖고 동작하고, 실내 냉방부하가 동일하게 유지되는 관제로 25분간 에어컨 가동, 20분간 에어컨 정지하는 패턴을 갖고 있다. 또한 에어컨 정지 시 실내온도의 상승 곡선이 에어컨 가동 시 실내온도 하강 곡선보다 완만하게 변화되므로 실내 냉방 부하가 에어컨 용량에 비해 작은 경우 라고 볼 수 있다.

수집된 실내온도, 실내습도, 외기온도 및 외기습도 데이터의 70%를 이용하여 신경회로망에 대한 학습이 이루어졌으며, 나머지 20%의 데이터를 이용하여 신경회로망에 대한 검증용 하였고, 나머지 10% 데이터는 실내온도 예측값에 대한 오차율 확인용으로 사용하였다. 실내온도와 실내습도의 예측오차율은 2%이내의 범위에서 예측되었으며, 그림 2와 그림 3에 보인 예측실내온도와 예측실내습도 데이터를 이용하여 계산된 PMV값을 그림 4에

보였다. 그림에서 볼 수 있듯이 첫 번째, 두 번째, 네 번째 사이클의 경우 10분 동안 에어컨을 기동하고 20분 동안 에어컨을 정지하는 경우에도 실내 환경은 쾌적도를 유지하고 있는 것을 알 수 있으며, 세 번째 사이클의 경우 예측 PMV가 쾌적범위를 벗어나기 때문에 고정 주기제어 방식과 동일하게 10분 동안 에어컨을 기동하고 이후 10분 동안 에어컨을 정지되었다.

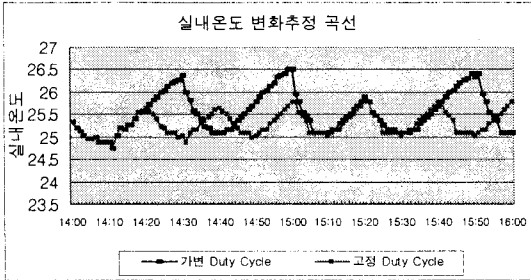


그림 2 주기제어별 실내온도 변화 추정 곡선
Fig.2 Estimation of indoor temperature as duty control

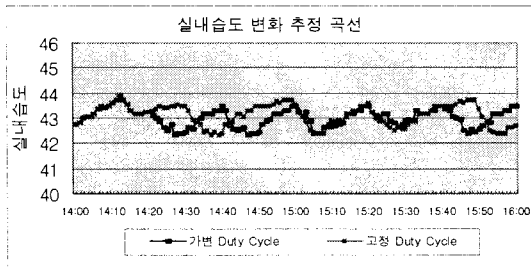


그림 3 주기제어별 실내습도 변화곡선
Fig.3 Estimation of indoor humidity as duty control

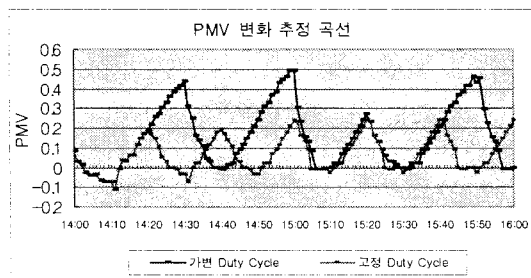


그림 4 주기제어별 PMV 변화 추정 곡선
Fig.4 Estimation of PMV as duty cycle control

3.1 고정 주기제어 적용시 전력 절감량

시뮬레이션 데이터의 정상 운전율은 전체 운전 사이클 시간 대비 가동시간의 비율로서 약 55%(= 25/(25+20))이다. DLC 명령에 의하여 고정 Duty Cycle에 의한 주기제어가 수행되는 경우 실내온도 변화와 상관없이 10분 에어컨 가동, 10분 에어컨 정지의 50% Duty Cycle을 가지기 때문에 시뮬레이션에서의 전력절감량은 다음과 같다.

고정 주기제어 적용시 DLC시간대 전력 절감량 = DLC시간x(정상가동률-DLC적용 가동률)x에어컨소비전력

여기서, DLC 시간 = 오후 2시 - 오후 4시 (2시간)
정상운영시 가동률 = (25/(25+20)) = 0.55
고정주기제어적용 가동률 = (60/(60+60)) = 0.5
에어컨 소비전력 = 3.8kW 이므로
∴ 전력 절감량 = 2x(0.55-0.50)x3.8 = 0.38 kWh

3.2 가변 주기제어 적용시 전력 절감량

그림1에 보인 알고리즘과 같이 가변 Duty Cycle을 적용하기 위해서는 신경회로망에 의한 실내온도와 실내습도에 대한 예측이 이루어지고, 예측된 두 개의 값을 이용하여 PMV를 계산해야한다. 계산된 PMV를 이용하여 쾌적도에 따른 에어컨의 다음단계 동작 상태를 결정함으로써 Duty Cycle을 가변하여 에어컨 소비 부하량을 최소화할 수 있다. 가변 Duty Cycle에 의한 주기제어 수행되는 경우 최소가동률은 33% Duty Cycle (10분 가동, 20분 정지)이고, 최대 가동률은 고정 Duty Cycle의 50%이며, 시뮬레이션 데이터의 전력절감량은 다음과 같다.

가변 주기제어 적용시 DLC시간대 전력 절감량 = DLC시간x(정상가동률-DLC적용가동률)x에어컨 소비전력

여기서, DLC 시간 = 오후 2시 - 오후 4시 (2시간)
정상운영시 가동률 = (25/(25+20)) = 0.55
가변주기제어적용 가동률 = (50/(50+70)) = 0.416
에어컨 소비전력 = 3.8kW 이므로
∴ 전력 절감량 = 2x(0.55-0.416)x3.8 = 1.02 kWh

가변 주기제어 적용시 전력 절감량은 1.02kWh로서 이는 고정 주기제어 적용시의 전력 절감량 0.38kWh보다 약 2.6배 증가하였으며, 주기제어에 따른 부하감소율은 5%에서 13%로 증가시킬 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 직접부하제어 관점에서 에어컨 부하를 효율적으로 제어하기 위한 방법으로 가변 Duty Cycle에 의한 주기제어 방법을 제시하였다. 제안된 방법론은 기존의 한국전력의 원격 에어컨 보급 사업에서 실시하고 있는 고정 Duty Cycle에 의한 주기제어 방법 대비 제어 효과를 개선하기 위한 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서 제시된 제어방법론과 고정 주기제어 방법과의 비교를 위하여 하절기 건물 내 온도, 습도 변화데이터를 이용하여 분석을 수행하였다. 수집된 현장데이터는 정상상태에서 55%의 가동률을 갖는 환경조건이었으며, 가변 주기제어에 의한 방법을 적용할 경우 고정 주기제어 방법을 적용한 경우보다 에어컨 부하 감소율 8%, DLC시간대 전력 절감량 0.64kWh의 성능개선을 보여 하절기 전력수급 문제해소에 좋은 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 에너지*자원기술개발사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력, "2003 가전기기 보급률 조사 분석서", 2004.
- [2] 한국전력, "2003 원격제어 에어컨 보급사업 시행계획", 2003.
- [3] K.Bhattacharry and M.L.Crow, "A Fuzzy Logic Based Approach to Direct Load Control", IEEE Transaction on Power System, Vol 11, No2,1996
- [4] H.T.Yang and K.Y.Hung, "Direct Load Control using Fuzzy Dynamic Programming", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol 146, No3,1999
- [5] ASHRAE, "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy", ASHRAE Standard 55-92,1991