

데이터 기반의 상태 예측을 통한 가정용 히트펌프 최적 제어 알고리즘 연구

임예지, 이해중, 손민재, 김대웅, 김재홍*, 김홍석
서강대학교, *LG 전자

sguyed@sogang.ac.kr, lhj910120@gmail.com, thsalswo536@gmail.com,
cracker2345@naver.com, *jaehong02.kim@lge.com, hongseok@sogang.ac.kr

A Study on an Optimal Control Algorithm for Residential Heat Pumps Using Data-Driven State Prediction

Yeji Lim, Haejoong Lee, Minjae Son, Daewoong Kim, Jaehong Kim*, Hongseok Kim
Sogang University, *LG Electronics

요 약

가정 에너지 소비의 대부분 전기 수요가 아닌 열 수요에 영향을 받아 가정 에너지 관리 시스템에서 난방시스템의 효율적인 제어 연구는 필수적이다. 난방시스템의 제어의 어려운 점은 제어의 결과 상태인 온도 변화를 계산하기 복잡하다는 점, 실제 가정에서 얻기 힘든 상수가 포함된 정보라는 것이다. 이를 해결하기 위해 센서데이터만을 이용해 불확실한 상태를 예측하는 모델을 개발하고 최적화 문제에 적용하는 모델 예측 제어 알고리즘을 제안한다.

I. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지 소비 효율 향상이 중요한 문제로 대두되면서 주거용 태양광 발전 시스템, 에너지 저장 장치 등 가정 에너지 관리 시스템의 중요성이 증가하고 있다. 특히, 겨울철 가정 에너지 소비는 대부분 전기 수요가 아닌 열 수요에 영향을 받으며 난방에 69%, 온수 공급에 15%가 사용된다[1]. 전체 에너지 소비의 상당 부분을 차지하는 만큼 난방 시스템의 효율적인 제어를 통해 에너지 관리 시스템의 효율성을 증가시킬 수 있다.

주거용 난방이 포함된 에너지 관리 시스템은 콘크리트의 밀도, 온도 손실, 에너지의 열 변환 효율 등의 복잡한 수치 시스템으로 묘사되고[1] 불확실성이 높은 온도가 아닌 에너지 측면의 알고리즘에 집중한다[2]. 온도를 고려하기 위한 중요한 요소인 난방 시스템 자체의 성능 계수는 기기 내의 유체 온도와 자세한 구조와 관련 있다. 이러한 수치는 실제로 시스템을 운영하며 측정하기 어려워 외부 센서 측정 데이터를 기반으로 예측해야 한다[3]. 이러한 한계를 갖는 난방 시스템을 실용적으로 제어하기 위해 본 논문에서는 자세한 물리적 상수를 사용하지 않고 센서 측정 데이터만을 이용하여 신경망을 학습한다.

제안하는 알고리즘은 난방 시스템의 성능 계수를 예측하는 것을 넘어서 온도를 고려한 제어 알고리즘에 집중한다. 공기를 열원으로 갖는 히트 펌프의 주파수를 제어하기 위해 MPC 방식의 알고리즘을 제안한다. Model Predictive Control(MPC) 방식은 주어진 현재 상태(State)에서 미래 제어 입력(Action)을 제어 변수로 하여 미래 출력치를 예측, 제어를 수행하는 방식이다. 사용자의 목표온도를 미리 알고 동작하여 에너지 절감하기 위해 MPC 방식을 적용하여 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 기여도는 다음과 같다. 첫째, 미래 상태를 예측하기 위해 실제 가정에서 측정된 주파수, 전력량, 실내 공기 온도, 실외 공기 온도, 히트펌프의 출수 온도 데이터만을 이용하여 미래의 전력량과 출수 온도를 예측하는 multi-target 모델을 개발한다. 둘째, 개발한 모델을 사용할 수 있는 최적화 알고리즘을 정식화 하여 기존의 제어보다 에너지 소비량을 감소시켰으며 이를 통해 가정 에너지 관리 시스템에서의 센서 데이터를 이용한 히트펌프 최적 제어 가능성을 보였다.

II. 본론

본 논문에서는 가정용 히트펌프 제어를 위해 제안한 MPC 알고리즘의 수식은 다음과 같다.

$$\min_{freq(k)} \sum_{i=0}^{N^a-1} power(t+i) + \alpha \sum_{i=0}^{N^a-1} discomfort(t+i) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=0}^{N^a-1} discomfort(t+i) \leq \sum_{i=0}^{N^a-1} discomfort_{ref}(t+i) \quad (2)$$

$$discomfort(k) = occu(k) \cdot (waterout(k) - target(k))^2 \quad (3)$$

$$discomfort_{ref}(k) = occu(k) \cdot (waterout_{ref}(k) - target(k))^2 \quad (4)$$

$$power(k), waterout(k) = f(freq(k), state(k)) \quad (5)$$

$$waterout(k) \leq 80 \quad (6)$$

where $k \in \{t, \dots, t + N^a - 1\}$.

N^h : history sequence. N^a : ahead sequence.

3 시간 전에 최적화문제를 풀어 미래를 고려할 수 있게 하여 미래 3 시간의 제어 계획을 세운다. 제어 변수는 히트펌프의 주파수이며 전력량을 최소화하는데 목표가 있다. (3), (4)에 정의되는 사용자의 불편도는 출수온도와 목표온도의 차이의 제곱과 재실자의 유무를 표현하는 변수의 곱으로 정의한다. 이때 $occu(k)$ 는 목표온도 값이

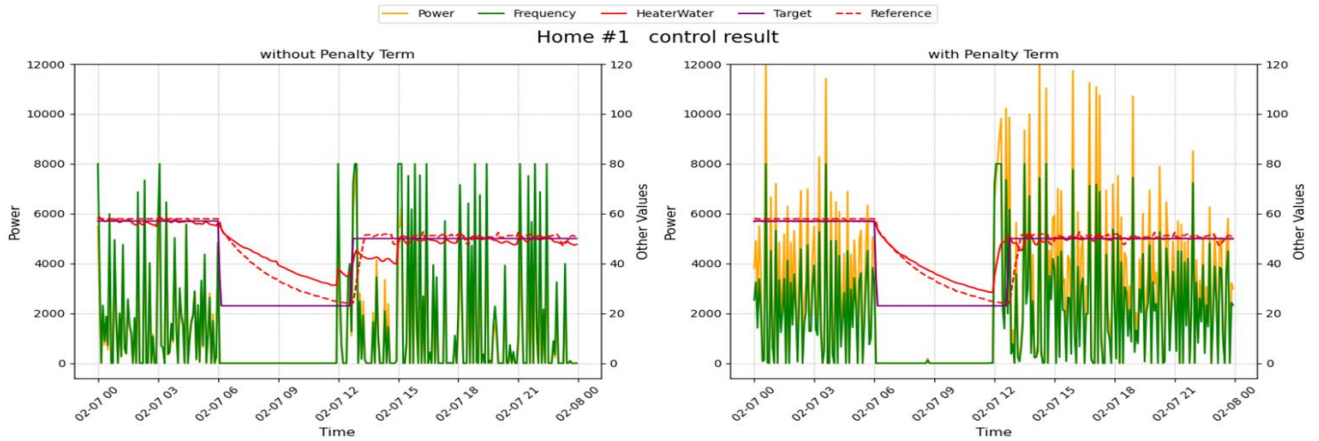


그림 1. MPC 제어 수행 결과

31℃ 미만인 경우 재실자가 없는 것으로 간주하여 0으로 이외에는 1로 설정하였다. 식(2)에서 사용자의 불편도를 부등식 제약 조건으로 사용하여 기존의 제어(ref)보다 목표온도를 더 잘 따라가게 하였다. 식(5)는 MPC 방식의 알고리즘을 구현하기에 필수적인 요소로 주파수(action)에 대한 전력량, 출수온도(미래 state)를 알려지지 않은 함수 f 로 묘사한다. 본 논문은 미지의 함수 f 를 [3]의 연구결과와 같이 MLP 구조의 신경망으로 대체하여 수식화 한다.

(2)의 비선형 부등식 제약조건과 대체한 신경망의 비선형성으로 non-convex 문제로 정의되며 복잡도가 높은 최적화 문제이다. 이를 보완하기 위해 제안된 알고리즘의 목적식에 사용자의 불편도를 penalty term 형태로 추가하였다. 이를 통해 하루 제어를 위해 최적화를 푸는 시간이 평균 12.37 분에서 1.77 분으로 86% 감소하는 결과를 확인하였다. 제어 결과의 일부인 그림 1은 Penalty Term의 유무를 바꿔 실험한 결과 예시이다. Penalty Term이 있는 경우 Target 온도를 더 고려하고 더 많은 에너지를 사용하는 결과를 확인할 수 있는데 사용자의 불편도와 에너지 절감 정도를 조절할 수 있음을 알 수 있다.

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실험은 2개의 가정에서 진행하며, 각각 13개월, 12개월의 실제 데이터를 활용한다. 겨울철의 제어 결과를 확인하기 위해 2월을 테스트 데이터로 선정해 테스트 기간을 제외한 데이터를 신경망 학습에 사용한다. 입력은 [실외 온도, 주파수, 전력량, 실내온도, 출수온도]의 과거 1시간, [실외 온도, 주파수]의 미래 3시간으로 구성되며 출력은 [전력량, 출수온도]의 미래 3시간이다. 신경망의 성능 지표는 R2 score를 사용하였으며 표 1과 같은 좋은 성능을 확인하였다.

index	전력량	출수온도
1	0.981	0.991
2	0.953	0.906

Table 1. 신경망 예측 성능 (R2)

위의 신경망을 최적화에 적용하여 2월 한달간 제어 실험을 진행하였다. (2)의 제약조건의 유무를 바꿔 에너지 절감을 수치적으로 확인하였고 표 2와 같이 평균적으로 23% 절감효과를 보였다. 제안한 Penalty Term의 효과로 제약조건이 없어도 불편도를 고려할 수 있으며 실험에서도 모든 경우에서 기존의 제어보다 더 적은 불편도 수치를 확인했다. 제약조건이 없는 경우

index	with (2)	without (2)
1	4.12	11.36
2	31.33	45.18

Table 2. 기존 제어에 대한 에너지 절감 성능(%)

온도보다 에너지 절감의 목표가 강해지는 효과로 (2)식이 없는 경우가 더 많은 에너지 절감을 이루었다. 또한 그림 1에서 MPC의 의도에 부합하게 Target 온도가 올라가기 3시간 전부터 천천히 온도를 높이는 결과를 확인할 수 있다.

III. 결론

본논문에서는 가정에서 공기 열원 히트펌프 동작을 효율적으로 하기 위한 제어 알고리즘을 제안하였다. 주파수를 제어하기 위해 최소화할 전력량과 맞춰야 하는 온도 변화를 Multi target MLP 모델로 대체하여 최적화 알고리즘을 도입하였다. 또한 복잡한 문제의 계산 시간을 줄이기 위해 penalty term을 도입해 효과를 확인하였고 실제 실험에서 계산시간이 86% 감소하였다. 또한 모든 실험에서 에너지 절감에 효과적이었으며 자세한 수치적 정보 없이 센서데이터만으로 실제 가정의 적용 가능성을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 (주)LG 전자, 산업통상자원부(MOTIE) 그리고 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 202470054.01, No. 202300321745)

참 고 문 헌

- [1] Langer, Lissy, and Thomas Volling. "An optimal home energy management system for modulating heat pumps and photovoltaic systems." *Applied Energy* 278 (2020): 115661.
- [2] Langer, Lissy, and Thomas Volling. "A reinforcement learning approach to home energy management for modulating heat pumps and photovoltaic systems." *Applied Energy* 327 (2022): 120020.
- [3] Chen, Yu, et al. "Machine-learning-based performance prediction of the energy pile heat pump system." *Journal of Building Engineering* 77 (2023): 107442.