

모델 예측제어 기반 온실 발전시스템 최적 제어 연구 Optimal Control of a Greenhouse Power System Based on Model Predictive Control (MPC)

박동규¹ · 정상민¹ · 이철희^{1*}

Dong-Gyu Park, Sang Min Chung and Chul-Hee Lee

Received: 1 Nov. 2024, Accepted: 20 Nov. 2024

Key Words : Absorption chiller(흡착식 냉방기), CCHP system(CCHP 시스템), Fuel cell(연료전지), Greenhouse(온실), Heat pump(히트펌프), Model predictive control(모델 예측 제어), Thermal Storage Tank(열 저장 탱크)

Abstract: This paper presents a method for optimizing thermal and energy management in a greenhouse through an integrated Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) system, which includes a fuel cell, heat pump, and absorption chiller. The fuel cell supplies both power and heating, while the absorption chiller is responsible for cooling. The heat pump supports both heating and cooling as required. The study utilizes MATLAB/Simulink simulations and a Model Predictive Control (MPC) algorithm to examine real-time control of thermal flow, ensuring that the thermal storage tank's target temperature is maintained. The control strategy considers environmental variables, such as fluctuations in external temperature, to maximize the energy efficiency of the smart agricultural greenhouse system. The results demonstrate that the proposed control method improves both heating and cooling performance, leading to energy cost savings and enhanced operational stability. This research opens new avenues for improving energy management and control efficiency in smart agricultural systems, with potential applications in large-scale agricultural practices.

기호 설명

A_E : Heat exchange area

$A_{total-plate}$: Total heat exchange area

C_p : Specific heat capacity

E_{Nernst} : Nernst voltage

f : Friction factor

h_{in} : Enthalpy of the inlet fluid

h_{out} : Enthalpy of the outlet fluid

I : Current

L : Length

\dot{m} : Mass flow rate

N : Number of cells

P_{in} : Inlet pressure

P_{out} : Outlet pressure

PH_2 : Partial pressure of hydrogen

PO_2 : Partial pressure of oxygen

\dot{Q} : Heat transfer rate

Q_{abs} : Absorbed heat

Q_{plate} : Heat transfer rate for the plate

Q_{total} : Total heat rate

T_{in} : Inlet temperature

T_{out} : Outlet temperature

U : Overall heat transfer coefficient

U_{AE} : Heat transfer coefficient for the exchanger

U_{plate} : Heat transfer coefficient for the plate

* Corresponding author: author: chulhee@inha.ac.kr

1 1 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- V : Voltage
- V_{act} : Activation voltage
- V_{cell} : Cell voltage
- V_{conc} : Concentration voltage loss
- V_{Nerst} : Nernst voltage
- V_{Ω} : Ohmic voltage loss
- V_{Stack} : Stack voltage
- ΔP : Pressure drop
- ΔT : Temperature difference
- ΔT_{lm} : Logarithmic mean temperature difference

1. 서론

최근 수십 년 동안 급격한 경제 발전 및 산업화로 인하여 화석연료 에너지의 소비가 증가함에 따라 대기 오염 및 지구 온난화가 악화되고 있다. ¹⁾ 이러한 환경 문제를 해결 하기 위하여 다양한 협약을 국제적으로 체결하여 문제를 해결하기 위한 집단적인 행동을 시행하고 있다. ²⁾ 하지만 화석연료 사용을 급격히 줄이기에는 여러 현실적인 한계가 있어, 친환경적이고 지속 가능한 에너지 시스템을 마련하는 것이 중요한 과제로 떠오르고 있다. ³⁾ 파리 협정에 따라 우리나라는 2030년까지 37%에 해당하는 온실가스를 저감 해야 하며, 저감 해야 할 온실가스 중 국내 농축산 사업 부문의 온실가스 배출량은 전환, 산업, 수송, 건물에 이어 5번째로 많다. 직접적으로 탄소 배출의 원인이 되는 유류 부문 사용량은 감소하고 있으나, 전력 사용량은 계속 증가 하는 상황이다. ⁴⁾ 이러한 상황에서 수소를 활용한 사업들이 활발히 진행되고 있으며, 신 재생 에너지를 활용하여 전기생산 및 냉열 및 온열을 농업 시설에서 활용하는 기술을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. ⁵⁾ 신 재생 에너지 중에 수소 연료전지는 환경오염 물질인 배출가스를 배출 하지 않고 수소와 물을 배출 하며, 전기 전지에 비하여 온도 나 다양한 환경변수에 비해 더 적은 영향을 받는다. ⁶⁾ 뿐만 아니라 에너지 밀도가 다른 배터리 구동 시스템보다 높아 더 많은 양을 저장할 수 있으며, 무탄소 전력 생산이 가능하여 농업용 온실과 같은 고에너지 소비 시설에서 안정적이고 독립적인 에너지원으로 활용될 수 있다. ⁷⁾ 이런 장점이 있는 연료전지를 활용하면서 온실의 난방과 냉방에 모두 적합한 시스템으로 삼중 열병합발전(CCHP)시스템이 있다. 열병합 발전은 동일 열과 전

력을 생산하였을 때 개별적으로 생산하는 것보다 높은 효율성과 지속 가능한 에너지 생산에 큰 장점이 있다. ⁸⁾ 삼중 열병합발전시스템의 운영 원리는 연료가 주 동력원에서 연소 되고 이를 통해 연료전지에서 전력을 생산한다. ⁹⁾ 이런 운영 과정에서 생성된 열이 회수되어 열 용도로 사용되며, 삼중 열병합발전시스템에서 회수한 열에너지를 냉방 에너지를 전환 하는 열 기반 냉방 기술이 사용되기도 하며, 이러한 역할을 가장 많이 수행하는 부품 중 하나가 흡착식 냉방기이다. ¹⁰⁾ 냉방, 난방 및 전력을 동시에 제공할 수 있는 삼중 열병합발전시스템은 농업 뿐 아니라 병원, 슈퍼마켓, 학교 등 다양한 분야에서도 각광받고 있다. ¹¹⁾ 삼중 열병합발전시스템의 운영을 최적화하기 위한 다양한 전략과 최적화 방법 및 제어에 관한 많은 연구가 진행되었다. 선행 연구로 풍력 및 태양광 같은 신재생 에너지 출력의 불확실성을 다루기 위해 삼중 열병합발전시스템의 확률적 최적화 운영 모델을 제시하였다. ¹²⁾ 냉방 및 난방의 부하와 신재생 에너지 출력의 확률적 특성을 목표로 간격 계획 기반의 예비 스케줄링 모델을 제안하였으며, ¹³⁾ 퍼지 프로그래밍 최적화 알고리즘을 기반으로 열병합 발전시스템의 에너지 관리 및 제어 방법을 제안하였다. ¹⁴⁾ 언급한 선행 연구들은 냉방, 난방, 전력 병합 마이크로그리드의 계획과 경제적 스케줄링 연구에 중점을 두었지만, 에너지 출력과 부하의 예측 오류를 충분히 반영하지 못하였고, 예측되지 않은 순간적인 변동 온도가 에너지 관리에 미치는 영향도 고려 되지 않았고, 이는 삼중 열병합발전시스템의 효율적이고 안정적인 운영에 영향을 미친다. 이를 해결하기 위해 많은 연구자들이 예측 모델을 통해 예측 정확도 개선을 시도했다. 시스템의 부하 예측을 위한 예측 모델로 변수가 포함된 자기 회귀 이동 평균 모델을 선정하여 최소 자승 접근법을 사용해 모델 매개변수를 식별하였고, ¹⁵⁾ 적응형 방식으로 시계열과 선형 회귀를 결합한 통계 방법이 냉방 및 전력 부하 수요 예측을 위해 제안하여 연구를 진행하였다. ¹⁶⁾ 다른 연구에서는 삼중 열병합 발전시스템의 장치 및 냉각탑을 사용하는 냉방기가 있는 경우 재생 에너지 공급의 변동을 완화하기 위해 냉방 및 전력 각각에 대해 일일 예측 스케줄링 모델과 실시간 디스패치 모델이 설정되었으며, 다른 시간 규모의 디스패치 계획을 적용하여 연구를 진행하였다. ¹⁷⁾ 냉각장치 및 열저장 장치의 결과를 기반으로 최

적화되었으며, 그 후 결과 데이터를 예측 데이터로 대체하고, 그리드를 통해 전력 균형을 맞추고 열저장 장치를 통해 냉방 균형을 맞추기 위해 피드백 제어를 추가 했다.¹⁸⁾ 모델 예측 제어(MPC)는 여러 전력 시스템 분야에서 성공적으로 적용되었으며, 일부 연구자들은 이를 삼중 열병합 발전 시스템에 적용하여 연구를 진행했다.¹⁹⁾ 선행된 연구들의 결과를 토대로 에너지의 변동성과 불확실성에 대응하고, 예측 오차를 실시간으로 보정하여 시스템의 경제적 효율을 높이는 장점이 있으며, 난방, 냉방, 전력 수요 간의 복잡한 상호작용을 종합적으로 관리할 수 있어 MPC 제어를 삼중 열병합 발전 시스템에 적용하여 연구를 진행하였다. 기존 연구는 주로 냉방, 난방, 전력부하 및 신재생 에너지 출력의 변동성을 단일 시간 규모에서 다루거나 예측 오차를 보정하는 데 한계가 있었다. 또한, 외부 환경 변동에 따른 부하 변화와 시스템 성능 간의 상호작용을 충분히 반영하지 못한 경우가 많다. 본 연구에서는 연료전지, 히트펌프, 흡착식 냉방기 등으로 구성된 CCHP 시스템을 대상으로 외부 환경 변동에 따라 실시간으로 냉난방 및 전력 수요를 조정할 수 있는 MPC 기반 통합 제어 전력을 제시한다. 이를 통해 환경 변화와 부하 예측 오차를 실시간으로 보정하며, 시스템의 안정성과 에너지 효율을 동시에 극대화할 수 있는 방안을 제시한다. 삼중 열병합 발전 시스템은 연료전지 10 kW급 두 개, 5 kW급 하나, Main heat-pump, Sub heat-pump, 흡착식 냉방기, 두 개의 온수 저장 탱크로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 냉방 상황을 고려하여 연료전지, 서브 히트펌프, 온수 저장 탱크, 흡착식 냉방기만으로 구성하여 연구를 진행하였다. 전체 시스템의 계략도는 Fig. 1에 나타내었다.

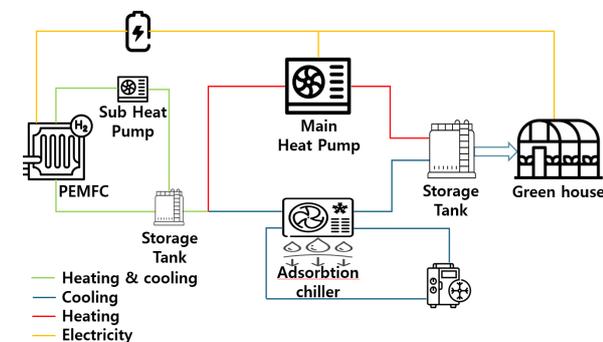


Fig. 1 Schematic Diagram of a Fuel cell-Based Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) system for Greenhouse.

2. 모델링

2.1 삼중열병합 발전시스템 모델링

설계된 모델링의 열의 흐름은 연료전지에서 발생한 폐열을 온수를 통해 열을 이동시켜 서브 히트펌프를 지나 온수 저장 탱크로 이동하고 저장된다. 흡착식 냉방기의 효율을 최대한으로 끌어 올리기 위하여 온수 저장 탱크에 저장된 온수는 히트펌프의 응축기 부분으로 들어와 냉매와 열교환을 통해 냉각시키는 동시에 히트펌프의 증발기 부분으로 들어오는 온수는 높은 온도의 냉매와 온수의 열교환을 통하여 더 높은 온도로 흡착식 냉방기로 배출하여, 흡착식 냉방기의 효율을 더 높이기 위해 전략을 사용하여 설계를 진행하였다.

각 부품은 MATLAB/Simulink를 사용하여 모델링하였고, 전체 시스템 MATLAB/Simulink 모델링은 Fig. 2에, 각 부품의 명칭은 Table 1에 나타내었다.

시뮬레이션 모델링은 열 손실은 고려하지 않고, 온수 및 냉매, 냉각수의 흐름은 각 부품에서 열을 흡수하고 전달하기 위해 설계된 경로만을 따르는 것을

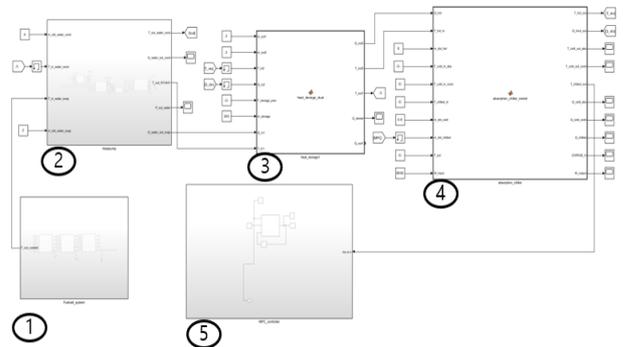


Fig. 2 MATLAB/Simulink Design of a Fuel Cell-Based Combined Cooling, Heating, and Power (CCHP) System for Greenhouse.

Table 1 Component-specific designations for the entire cooling system.

Number	Component
①	Fuel Cell
②	Heat Pump
③	Heat storage
④	Absorption Chiller
⑤	MPC Controller

가정하였고, Python Cool prop 라이브러리를 통하여 Reynolds 수를 온도와 압력에 따라 계산하여 층류와 난류 상태를 구분하였다.

2.1.1 연료전지 모델링

연료전지 내부의 물리적 및 화학적 과정은 매우 복잡하며, 그 성능은 작동 온도, 상대 습도, 유입 압력 등 여러 운전 조건에 영향을 받는다. 연료전지를 모델링 할 때 사용한 주요 식들은 식 (1) - (4) 은 다음과 같다.²⁰⁾

$$V_{act} = V_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (1)$$

$$E_{Nernst} = 1.229 - (0.85 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 298.15)) + (4.3085 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \log(pH_2 \cdot \sqrt{pO_2})) \quad (2)$$

$$V_{stack} = N \cdot V_{cell} \quad (3)$$

$$P_{generated} = V_{stack} \cdot I \quad (4)$$

식(1)은 연료전지의 전압 V_{act} 를 구하는 식으로, 이는 Nernst 전압 V_{Nernst} , 활성화 전압 강하 V_{act} , 저항 손실 전압 강하 V_{Ω} , 농도 손실 전압 강하 V_{conc} 로 구성된다. 식(2)는 Nernst 전압 E_{Nernst} 을 계산하기 위한 식으로, 이 전압은 온도 T 와 수소 및 산소의 분압 PH_2 및 PO_2 에 따라 결정된다. 이때 Nernst 전압은 연료전지 반응의 기본 전위와 환경 조건에 따라 달라진다. 식(3)은 셀 수 N 에 따라 스택 전압 V_{Stack} 을 계산하며, 식(4)는 스택 전압 V_{Stack} 와 전류 I 를 곱하여 연료전지의 출력 전력 $P_{generated}$ 를 구한다.

2.1.2 히트펌프 모델링

히트펌프에서는 응축기 부품에서 들어오는 온수는 히트펌프 내에 냉매를 통하여 냉각을, 고온이 된 냉매는 히트펌프에서 응축, 압축, 팽창의 과정과 증발기에서 들어오는 온수로부터 냉각 반응이 일어나고,²¹⁾ 증발기 출구에서의 온수는 더 많은 열에너지와 높은 온도로 온수 저장 탱크로 배출된다. 히트펌프 시스템에서는 식 (5) 열역학 제 1법칙을 응용하여 출구 온도를 계산하고, 식(6) 다르시-와이스바흐 방정식을 통해 팽창밸브에서의 압력강하를 계산하였다.²²⁾ 히트펌프 모델링에서 사용한 대표적인 식들은 다음과 같다.

$$T_{Out} = T_{In} + \frac{Q_{total}}{\dot{m} C_p} \quad (5)$$

$$\Delta P = f \cdot \left(\frac{L_{capillary}}{D_{in}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{in} \cdot v_{in}^2}{2} \right) \quad (6)$$

$$Q_{plate} = U_{plate} \cdot A_{total-plate} \cdot LMTD_{plate} \quad (7)$$

식(5)는 온수의 입구 온도 T_{in} , 총열량 Q_{total} , 유량 \dot{m} , 비열 C_p 를 이용하여 출구 온도 T_{out} 을 계산하는 식이다. 식(6)은 다르시-와이스바흐 방정식을 통해 열 교환기 내부의 압력강하 ΔP 를 계산하며, 이는 유체의 밀도 ρ_{in} , 속도 v_{in} , 그리고 관의 길이와 유효 직경 비율에 따라 결정된다. 마지막으로, 식(7)은 열 교환기 관면에서의 열전달량 Q_{plate} 를 계산하는 식으로, 열 전달계수 U_{plate} , 열교환 면적 $A_{total-plate}$, 그리고 평균 온도 차 $LMTD_{plate}$ 를 사용하여 열교환 효율을 평가한다.

2.1.3 흡착식 냉방기 모델링

흡착식 냉방기는 MOF 모델로 두 개의 냉각탑과 응축기, 증발기로 이루어졌으며, 온수 저장 탱크로부터 온수가 순환하면서 열교환을 하고, 냉각탑으로부터 냉각수를 받고, 온실과 냉수를 순환하는 시스템으로 모델링을 진행하였다. 흡착식 냉방기 모델링에 사용한 주요 식들은 히트펌프와 같게 식(8)은 열역학 제 1법칙을 응용하여 출구 온도와 전체적인 열교환 값들을 모델링 하였고,²³⁾ 추가적으로 사용한 식 (9) - (10) 은 아래 나타내었다.

$$T_{Out} = T_{In} + \frac{Q_{total}}{\dot{m} C_p} \quad (8)$$

$$\dot{Q} = U_{AE} \cdot A_E \cdot \Delta T_{lm} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{Liquid} \cdot C_p \cdot \Delta T_{lm} \quad (10)$$

식(8)은 식(5)와 같으며, 식 (9)는 열 교환기에서의 열전달량 \dot{Q} 를 계산하기 위한 식으로, 열 전달계수 U_{AE} , 열교환 면적 A_E , 그리고 온도 차 ΔT_{lm} 에 따라 결정된다. 식(10)은 흡착식 냉방기에서 흡수된 열량을 구하는 식으로, 유체의 질량 유량 \dot{m}_{Liquid} , 비열 C_p , 그리고 온도 변화를 이용해 계산된다.

3. 제어기 설계

삼중열병합 발전시스템에서는 온실의 온도에 따라 적절한 온도의 냉수를 제공하여 온실의 필요 온도를 지속적으로 안정적으로 유지하여야 하는데, 이를 위하여 온수의 유량을 조절하여 냉수의 온도를 제어하는 MPC 제어기를 개발하였다. MPC 제어는 현재 상태의 변수들과 모델방정식을 이용해 시스템의 미래 거동을 예측하고, 이를 기반으로 주어진 제약 조건 하에서 목적함수를 최소화하는 최적의 제어 입력을 도출하는 제어 기법으로 상태 피드백을 갖춘 상태 공간 모델을 기반으로 하며, 매 샘플링 시점마다 예측된 미래 상태를 바탕으로 제어 입력을 결정해 시스템의 성능을 최적화하는 방식이다.²⁴⁾ MPC는 두 가지 주요 예측 구간을 설정하여 제어를 수행한다. 첫 번째로 입력 예측 구간(control horizon, N_c)은 미래 일정 기간의 제어 입력을 예측하는 구간이며, 두 번째로 출력 예측 구간(prediction horizon, N_p)은 예측된 제어 입력이 시스템 출력에 미치는 영향을 평가하는 구간이다. MPC는 이 두 예측 구간을 기반으로 하여, 각 샘플링 시점에서 주어진 제약 조건 내에서 목적함수를 최소화하는 제어 입력 MV를 계산해 시스템에 적용한다.²⁵⁾

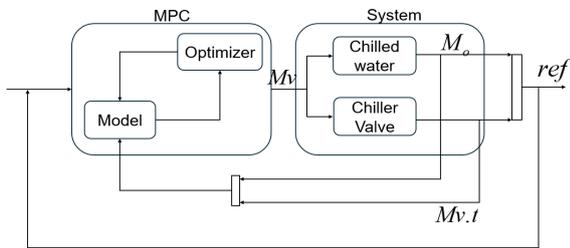


Fig. 3 Schematic of the greenhouse power system MPC controller.

본 연구에서는 흡착식 냉방기의 출구 냉수 온도와 온수의 온도를 주요 제어 목표로 설정하고 각각의 제어를 위해 온수의 질량 유량을 제어 입력으로 사용한다. MPC의 목적함수 J 는 식(11)과 같은 2차 형식으로 정의하였으며, 예측 오차와 제어 입력 변화량을 포함하였다.

$$J = (R_s - \hat{Y})^T Q (R_s - \hat{Y}) + \Delta \hat{U}^T R \Delta \hat{U} \quad (11)$$

R_s 는 지령 값 벡터, \hat{Y} 는 예측 출력 벡터, Q 는 예측 오차 가중행렬, R 은 입력 변화량 가중행렬이다.

MPC는 예측 구간 내에서 J 를 최소화하는 제어 입력을 산출하며, 각 샘플링 시점마다 입력 변수를 예측하여 시스템을 최적화한다. 연속시간 상태 공간 모델방정식은 식(12)에 나타내었다.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (12)$$

식에서 x 는 특정 물리량이 아닌 미지의 상태변수이고, y 는 출력 변수이다. 연속상태 공간 모델에서 이산 시간 모델로 변환하여 차분형 상태 공간 모델 식(13)~(14)을 구하였다.

$$\Delta x(k+1) = A \Delta x(k) + B \Delta u(k) \quad (13)$$

$$y(k+1) = y(k) + CA \Delta x(k) + C \Delta u(k) \quad (14)$$

현재 상태를 통해 미래 출력을 예측하는 식은 다음과 같다.

$$\hat{y} = Fx(k) + \Phi \Delta U \quad (15)$$

4. 시뮬레이션 결과

MPC 제어기의 제어 입력 범위는 1.5에서 10까지의 범위로 실제 흡착식 냉방기의 스펙에 따른 타당한 범위 내로 설정하여 진행하였다.

Prediction horizon은 15, Control horizon은 2로 설정하였으며, Sampling time은 0.5로 설정하였다. 이런 MPC 제어기가 설정 범위 내에서 제대로 제어를 수행하고 있는지 확인하기 위하여 제어 입력값을 확인하였고, Fig. 4에 나타내었다.

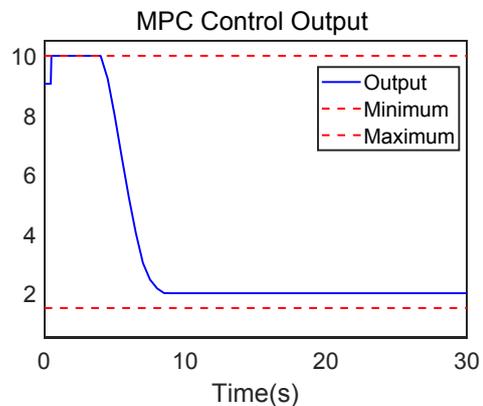


Fig. 4 MPC Control Inputs for a Fuel Adsorption Chiller Mass flow rate.

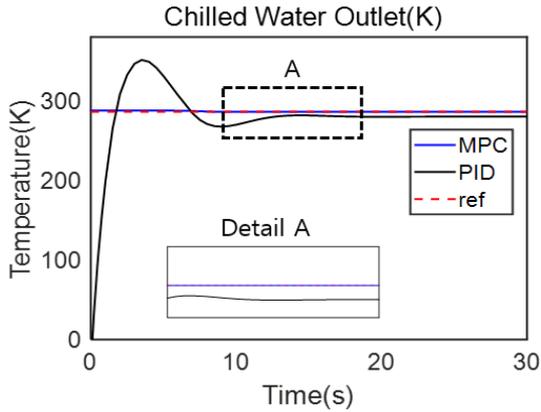


Fig. 5 The chilled water outlet temperature in an adsorption chiller using an MPC controller and a PID controller.

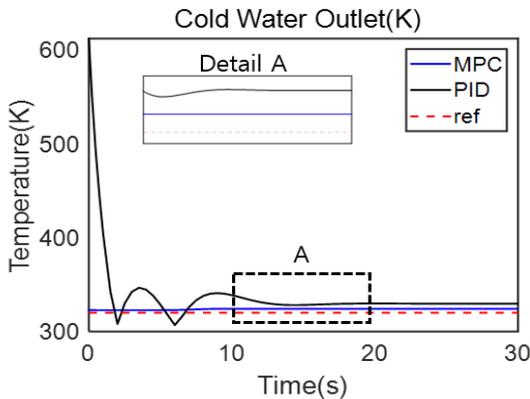


Fig. 6 The cold water outlet temperature in an adsorption chiller using an MPC controller and a PID controller.

MPC 제어기의 제어 입력값이 최소, 최대 범위 내에서 정상적으로 작동하는 것을 알 수 있었다. 후에 기존의 다른 제어기인 PID 제어기와 성능을 비교해 보았다. 흡착식 냉방기에서 온실로 빠져나가는 냉수의 온도 값을 비교하여 각각 Fig. 5에 나타내었다.

흡착식 냉방기의 출구 온수 온도를 286K로 유지하는 것을 목표로 제어 시뮬레이션을 진행한 결과, PID와 MPC 제어기 모두 일정 수준의 온도 조절 성능을 보이며 목표 온도에 근접하는 작은 오차 범위를 나타냈다. 그러나, 세부 결과를 비교해보면 MPC 제어기가 PID 제어기보다 더 신속하게 안정적인 온도에 도달하며, 제어 성능 면에서 더욱 뛰어난 특성을 보여주었다. 특히, MPC 제어기는 외란에 대한 빠른 응답 특성 덕분에 온도 변화에도 민첩하게 대응하였으며, 오버슈트가 작고 수렴 속도가 더욱 우수하게 나타났다. 냉각수 출구 온도를 비교한 결과에서는,

MPC 제어기의 오차가 PID 제어기보다 약 2K 더 작게 나타나 보다 정밀한 온도 제어가 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, MPC 제어기의 오버슈트 값은 PID 제어기보다 약 20K 작았으며, 안정적인 온도에 도달하는 시간도 3초 정도 빨라 제어기의 속도와 안정성 측면에서 더욱 우수한 성능을 입증하였다. 이러한 차이는 냉각수 출구 온도 제어에서 MPC 제어기가 더 효율적이고 일관된 성능을 발휘할 수 있음을 보여준다. 냉수 출구 온도에서도 마찬가지로, MPC 제어기는 PID 제어기에 비해 온도 오차가 약 1.3K 더 작았고, 목표 온도에 수렴하는 시간이 약 6초 더 빠른 것으로 나타났다. 오버슈트 값에서는 약 10K 차이가 나타나며, PID 제어기는 오버슈트가 두 차례 발생하였지만,

MPC 제어기는 큰 온도 변동 없이 한 번에 안정적인 값에 수렴하여 냉수 온도를 효과적으로 제어할 수 있었다. 이러한 차이는 MPC 제어기의 고유한 예측 제어 능력이 냉수 출구 온도 제어에서도 더 안정적이고 일관된 결과를 도출할 수 있음을 보여준다.

결과적으로, MPC 제어기는 PID 제어기에 비해 온도 안정성, 응답 속도, 오버슈트 최소화 측면에서 월등히 우수한 성능을 보였다. 이를 통해 MPC 제어기가 삼중 열병합 발전 시스템 제어에 있어 PID 제어기에 비해 탁월한 정확도와 효율성을 제공하며, 장기적으로 시스템의 에너지 절감과 운영 안정성에도 기여할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 온실 CCHP(냉난방 및 전력 병합 발전) 시스템에 모델 예측 제어(MPC)를 적용하여 최적의 열 관리 및 에너지 절감을 실현하기 위한 제어 전략을 제안하였다. MPC 기반 제어기는 시스템의 온도 조절 성능을 향상시키고 변동성이 높은 환경 조건에도 안정적인 냉수 출구 온도를 유지하는 데에 있어 기존 PID 제어기에 비해 우수한 성능을 보였다. 시뮬레이션 결과, MPC 제어기는 PID 제어기 대비 더 빠르게 목표 온도에 도달하고, 오버슈트 발생을 현저히 줄이며, 작은 오차 내에서 안정적인 온도를 유지하였다. 특히 MPC는 미래 상태를 예측하여 각 샘플링 시점마다 제어 입력을 최적화하기 때문에, 환경 변화에 대한 즉각적인 대응과 제어 정확도에서 PID 제어기보다 큰 이점을 나타냈다. 또한 MPC 제어기는 흡착식 냉방기의 냉수 출구 온도를 목표 온

도(286K)에 보다 신속하게 수렴시키며, 온도 변화에 따른 안정성을 제공함으로써 에너지 효율을 높였다. 이에 반해 PID 제어기는 외부 환경 조건에 민감하게 반응하여 잦은 오버슈트를 발생시키고, 수렴 시간 또한 MPC 제어기에 비해 길게 나타났다. 이를 통해 MPC 기반 제어가 PID 방식에 비해 온도 안정성과 응답 속도 측면에서 우수함을 확인할 수 있었다. 이는 온실 발전 시스템에서의 MPC 적용 가능성을 입증하였으며, 이를 통해 에너지 절감과 운영 안정성 측면에서 유의미한 개선 효과를 나타냈다. 특히 MPC 제어기는 냉난방 시스템이 불필요하게 과도하게 작동하거나 추가 장비를 가동하지 않고도 최적의 온도를 유지할 수 있게 하여 시스템의 경제성을 더욱 높일 수 있다.

후 기

이 논문은 2024년도 농촌진흥청 연구사업(과제번호: 2390000119)의 지원을 받아 연구되었음

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) X. chen., G. Gong., Z. Luo., and J. Wan, "Performance analysis of 5 kW PEMFC-based residential micro-CCHP with absorption chiller." *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(33), 10647-10657, 2015.
- 2) N. Maamoun, "The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success," *J. of Environmental Economics and Management* Vol.95, pp.227-256, 2019.
- 3) B. Bolin and H. S. Kheshgi, "On strategies for reducing greenhouse gas emissions," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.98, No.9, pp.4850-4854, 2001.
- 4) G. H. Kim, J. G. You, and Y. J. Jang, "Final energy consumption in the agricultural sector and future challenges," *National Assembly Research Service*, 2021.
- 5) J. Y. Park, T. Bui, S. Park, D. LEE, Y. Bae, and S. M. Lee, "Fuel cell-based cogeneration system for greenhouse cooling and heating, *Transactions of the Korean hydrogen and new energy society*, 34(6), 667-672, 2023
- 6) K. H. Han, S. G. Park and H. Kim, "Technology Trend on Hydrogen Fuel Cell Excavator," *J. of Drive and Control*, Vol.6, pp.48-52, 2023.
- 7) M. A. Son, Y. S. Kang and Y. J. Kim, "Technology Trend on Hydrogen Fuel Cell Tractor," *J. of Drive and Control*, Vol.6, pp.57-61, 2023.
- 8) A. Canova, et al, "Emission characterization and evaluation of natural gas-fueled cogeneration microturbines and internal combustion engines," *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2900-2909, 2008.
- 9) H. Cho, AD. Smith, P. Mago, "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization," *Applied Energy*, 136, 168-185, 2014
- 10) L. Urbanucci, L. Bruno and D. Testli, "thermodynamic and economic analysis of the integration of high-temperature heat pumps in trigeneration systems," *Applied energy*, 238, 516-533, 2019.
- 11) Y. Y. Ge, S. A. Tassou, and I. Chear, "Performance evaluation of a tri-generation system with simulation and experiment," *Applied Energy*, 86(11), 2317-2326, 2009.
- 12) B. Sang, J. Hu, G. Li, J. Xue, and J. Ye "Equivalent modeling method of battery energy storage system in multi-time scales," In 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia) (pp. 252-256), 2016.
- 13) E. Grover-Silva, et al "A stochastic optimal power flow for scheduling flexible resources in microgrids operation," *Applied energy*, 229, 201-208, 2018
- 14) M. H. Moradi, et al "An energy management system (EMS) strategy for combined heat and power (CHP) systems based on a hybrid optimization method employing fuzzy programming," *Energy* 49 (2013): 86-101, 2013.
- 15) M. Liu, Y. Shi, and F. Fang "Load forecasting and

- operation strategy design for CCHP systems using forecasted loads," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(5), 1672-1684, 2015.
- 16) A. Vaghefi, et al "Modeling and forecasting of cooling and electricity load demand," *Applied Energy*, 136, 186-196, 2014.
 - 17) D. McLarty, C. C. Savate, J. Brouwer and F. Jabbari, "Micro-grid energy dispatch optimization and predictive control algorithms; A UC Irvine case study," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65, 179-190, 2015.
 - 18) Z. Bao, et al "A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution—Part I: Model and methodology," *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5), 2257-2266, 2014.
 - 19) A. Vahidi, A. Stefanopoulou, and H. Peng, "Current management in a hybrid fuel cell power system: A model-predictive control approach," *IEEE Transactions on control systems technology*, 14(6), 1047-1057, 2006.
 - 20) A. Souissi, "Adaptive sliding mode control of a PEM fuel cell system based on the super twisting algorithm," *Energy Reports*, 7, 3390-3399, 2021.
 - 21) S. M. Chung, D. G. Park, and C. H. Lee, "Developing a Cooling System for Fuel Cell Stacks Combined with Heat Pump Technology Using 1-D Simulation," *Journal of Drive and Control*, 21(2), 1-7, 2024.
 - 22) T. D. Kwon, W. H. Jung, and J. W. Jeong, "Energy performance analysis of a cascade heat pump system for heating in a semiconductor fabrication plant," *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, 103745, 2023.
 - 23) B. Han, and A. Chakraborty, "Adsorption characteristics of methyl-functional ligand MOF-801 and water systems: Adsorption chiller modelling and performances," *Applied Thermal Engineering*, 175, 115393., 2020.
 - 24) J. H. Seo, K. S. Oh, and H. J. Noh, "Model predictive control-based steering control algorithm for steering efficiency of a human driver in all-terrain cranes," *Advances in Mechanical Engineering*, 11(6), 1687814019859783. 2019.
 - 25) X. Ren, et al "Design and analysis of solar hybrid combined cooling, heating and power system: A bi-level optimization model," *Energy*, 292, 130362. 2024.