Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 634~642
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.634

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

Simscape™를 활용한 PEM 수전해 시뮬레이션 모델 개발 및 적용에 관한 연구

서영민 · 구태형 · 노현우 · 하동우 · 고락길†

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

Study on Development and Application of PEM Water Electrolysis Simulation Model Using Simscape™

YOUNG MIN SEO, TAE HYUNG KOO, HYUN WOO NOH, DONG WOO HA, ROCK KIL KO†

Hydrogen Electric Research Team, Electric Mobility Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, 12 Jeongiui-gil, Seongsan-gu, Changwon 51543, Korea

†Corresponding author :
rkko@keri.re.kr

Received 28 October, 2024
Revised 28 October, 2024
Accepted 20 November, 2024

Abstract >> In this study, an integrated simulation model in the Simscape™ environment for the polymer electrolyte membrane (PEM) water electrolysis system was developed. The PEM water electrolysis system consists of an ultrapure water production device, reservoir, water pump, heater, heat exchanger, cooling system, stack, dehumidifier, regulator, and mass flow meter. To verify the integrated simulation model, the simulations were performed using power data for solar power generation and wind power generation. It was found that the simulation results related to the stack were greatly affected by the power profile of solar power generation and simulated wind power generation.

Key words : Dynamic simulation(동적 시뮬레이션), Polymer electrolyte membrane (고분자 전해질 막), Water electrolysis(수전해), Thermal management system(열관리 시스템), Renewable energy(신재생 에너지)

1. 서 론

연료 전지는 높은 에너지 효율과 상당히 낮은 가스 배출로 인하여 지난 몇 년 동안 에너지 저장 분야의 잠재력이 높은 후보로 손꼽히고 있다. 전해질을 기반으로 다양한 형태의 연료 전지가 설계되었으며 대표적으로 양성자 교환막/고분자 전해질 막 연료 전지(proton exchange/polymer electolyete membrane fuel cell, PEMFC), 고체 산화물 연료 전지(solid oxide fuel cell), 인산 연료 전지(phosphoric acid fuel cell), 용융 탄산염 연료 전지(molten carbonate fuel cell), 알칼리성 연료 전지(alkaline fuel cell), 직접 메탄올 연료 전지(direct methanol fuel cell) 및 아연 공기 연료 전지(zinc air fuel cell) 등이 포함된다[1-3].

연료 전지라는 화학적 및 물리적인 개념이 확립되었음에도 불구하고 작동상의 어려움으로 인하여 기

2024 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

존 배터리를 완전히 대체하기는 아직 어려운 실정이다. 이러한 이유로 휴대가 가능하고 안전하게 저장할 수 있는 지속 가능한 연료, 부하 변동에 대한 응답, 비용 저감 등에 대한 필요성이 강조되고 있다. 따라서 전력 시스템이나 전기 자동차와 같이 에너지 저장과 관련된 주요 응용 분야에서는 연료 전지의 제어, 설계 및 최적 작동을 연구하여 전압, 전력, 전류 및 부하 변화의 함수로서 연료 전지의 동적 거동을 이해하는 것이 중요하다[4-6].

많은 연구자들이 성능 향상과 비용 절감을 위하여 연료 전지를 모델링하고 분석하는 데 상당한 노력을 기울여 왔다[7-14]. Schumann 등[15]은 Matlab/Simulink® (MathWorks, Natick, MA, USA)를 통해 연료 전지 모델을 구현하고 전기장 수정 전극으로 확장하여 외부에서 인가된 전압을 통해 저항을 제어하였다. 전기적으로 제어가 가능한 연료 전지의 전기 등가 회로를 개발하여 구현하였으며 매개변수화하는 방법을 제시하였다. Baum 등[16]은 최대 10 kHz의 주파수에서 펄스 부하하에 연료 전지 스택의 정적 및 동적 전기적 거동을 나타내는 PEMFC 스택의 전기 등가 회로 모델을 제시하였다. 해당 모델은 연료 전지 스택에 직접 연결된 전력 전자 시스템의 동적 시뮬레이션에 적합하며 특별한 전기화학적 임피던스 분광학 측정 없이 매개변수화할 수 있다.

Mahjoubi 등[17]은 스택 성능 향상과 스택 성능 저하 방지에 대한 개방형 음극 PEMFC의 열관리에 대하여 분석하였다. 적절한 제어 전략을 설계하기 위하여 Matlab/Simscape™ (MathWorks)를 통한 인과관계에 따른 접근 방식을 기반으로 다중 물리 연료 전지 모델을 개발하고 실험적으로 검증하였다. Moazeni와 Khazaei[18]는 다양한 조건이 연료 전지의 동적 응답에 미치는 영향을 연구하기 위해 상태 공간 접근법을 기반으로 단일 셀 PEMFC의 신호 모델을 개발하였다. 결과적으로 Matalb/Simscape™를 통해 PEMFC의 100 W 시뮬레이션을 검증하고 최적의 작동 조건 세트를 제안하였다.

통합 수전해 시뮬레이션의 적용 영역의 확대를 위해서는 인버터, 컨버터 등을 포함한 전기기기 모델과 각종 기계 부품의 모델 간의 연계를 위해 멀티 도메인 환경에서 시뮬레이션을 수행할 필요성이 있다. 이때 Simscape™를 사용하면 Simulink® 환경 내에서 신속하게 물리 시스템 모델을 만들 수 있다. 또한 Simscape™에서는 블록 다이어그램 및 기타 모델링 패러다임과 직접 통합되는 물리적 연결을 기반으로 물리 컴포넌트 모델을 개발할 수 있다. Simscape™는 제어 시스템을 개발하고 시스템 수준의 성능을 테스트하는 데 도움을 준다. Matlab 변수 및 표현식을 사용하여 모델을 파라미터화하고 Simulink®에서 물리 시스템에 대한 제어 시스템을 설계할 수 있다. 특히 Simscape™는 Simulink®와 다르게 전기, 열유체, 가스 등 다양한 도메인에 대한 개발 환경이 독립적으로 제공된다[18].

상용 Simscape™ 프로그램은 멀티 도메인 환경 적용에 있어 Simulink® 프로그램보다 개선된 환경을 제공하므로 본 연구에서는 Simulink®로 개발된 통합 시뮬레이션 모델을 Simscape™ 환경의 모델로 변경하였다. 따라서 본 연구에서는 polymer electrolyte membrane (PEM) 수전해 시스템에 대한 Simscape™ 환경의 통합 시뮬레이션 모델을 개발하고 각 모델의 과도 현상 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 또한 해당 모델을 실제 전력 및 모의 발전 생산량 프로파일에 적용한 시뮬레이션 결과에 대해 고찰하였다.

2. PEM 수전해 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 PEM 수전해 시스템에 대한 Simscape™ 환경의 통합 시뮬레이션 모델을 개발하였다. Fig. 1은 본 연구에서 고려한 Simscape™ 기반으로 개발된 각각의 구성 모델이 통합된 PEM 수전해 시스템 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 본 연구에서 고려한 수전해 시스템은 초순수 생산 장치, 레저버, 물 펌프, 히터, 열교환기, 냉각 시스템, 스택, 제습기, 레귤레이터, 질량 유량계 등으로 이루어져 있다. 전체 시스템의 구성을 구성품 사진 배열을 통해 사용자가 직관적으로 이해할 수 있게 하였으며 구성품 사진의 클릭을 통해 상세한 코드를 확인하고 수정할 수 있도록

하였다. 자세한 PEM 수전해 시스템의 주요 구성품과 기능은 다음과 같다.

1. 순수 제조 장치: 유기물, 염분 등을 제거한 순수한 물 제조.
2. 순수 저장탱크: 생산된 순수를 저장하는 탱크. 저항은 1-10 MΩ.
3. 냉각수 펌프: 전해액 열교환기로 냉각수 순환.
4. 가스 열교환기: 고온의 가스(수소, 산소) 냉각.
5. 칠러(냉각기): 가스 열교환기의 냉각수 냉각.
6. 히터: 초기 스택 온도 조절.
7. 전해조(stack): 물 전기 분해를 통해 수소 및 산소 제조.

통합 수전해 시뮬레이션의 적용 영역의 확대를 위해서는 인버터, 컨버터 등을 포함한 전기기기 모델과 각종 기계 부품의 모델 간의 연계를 위하여 멀티 도메인 환경에서 시뮬레이션을 수행할 필요성이 있다. 특히 Simscape™는 Simulink®와 다르게 전기, 열유체, 가스 등 다양한 도메인에 대한 개발 환경이 독립적으로 제공된다. 따라서 본 연구에서는 기존 Simulink® 기반으로 개발한 PEM 수전해 시스템의 구성품에 대한 개별적인 모델에 대해 Simscape™를 통해 PEM 수전해 시스템 통합 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

Fig. 2는 Simscape™로 구성된 PEM 수전해 시스템의 물 공급계 모델에 대한 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 물 공급계는 수전해 시스템의 운전 온도를 결정하는 중요한 모듈로 급수 펌프, 열교환기, 전기히터와 제어기 등으로 구성하였다. 전기히터는 시스템 운영 초기 스택의 운전 온도 상승을 위해 공급수를 가열해 주며 열교환기는 시스템이 정상 상태일 때 스택의 발열로 가열된 물의 냉각을 위해 사용된다. 열교환기의 냉각 측(cold side)은 일정한 온도 및 유량의 물이 흐르는 것으로 가정하였다.

Fig. 3은 각각 열교환기와 전기히터의 온도 과도 현상에 대한 Simscape™ 기반의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 열교환기와 전기히터의 과도 현상에 관한 결과는 출구 온도로 각각 분석하였다. 스택으로 공

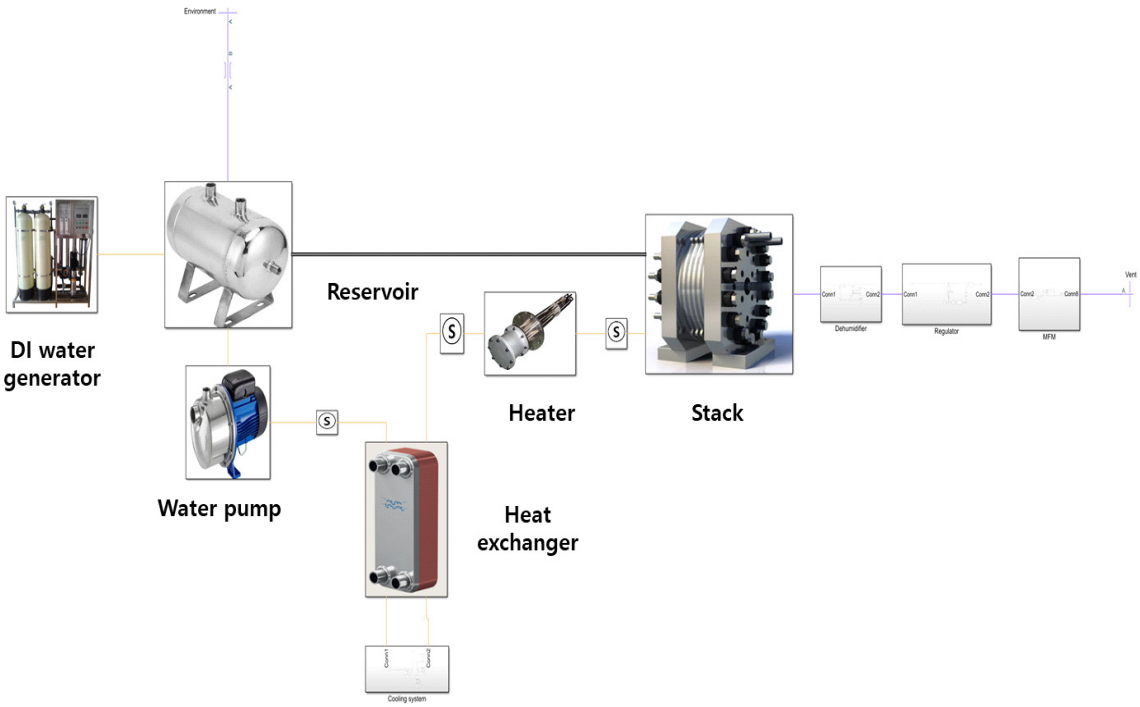


Fig. 1. Diagram of polymer electrolyte membrane water electrolysis system

급되는 물은 열교환기에 의하여 냉각되고 전기히터에 의하여 가열된다. 시간이 지남에 따라 열교환기와 전기히터 온도는 급격하게 증가한 후 감소하여 정상 상태를 유지함을 알 수 있다. 따라서 열교환기와 전기히터를 통합한 시뮬레이션에서 적절한 결과를 도출하였음을 알 수 있다. 추후 각 구성품은 실험 데이터 기반으로 개선 및 검증이 필요하다.

Fig. 4는 Simscape™로 구성된 초순수 저장조와 펌프 시뮬레이션 모델이다. 초순수 펌프는 수전해 스택에 연료로 사용되는 초순수를 공급하기 위한 펌프이며 보유하고 있는 펌프의 성능 데이터를 이용한 실험적 모델로 구성하였다. 초순수 생산 장치는 시스템의 온도 동특성에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 본 연구에서는 펌프로 구성하였다. 구성된 펌프는 저장조의 수위를 유지하기 위한 제어 전략에 따라 50%를 기준으로 수전해 스택의 물 소비를 보

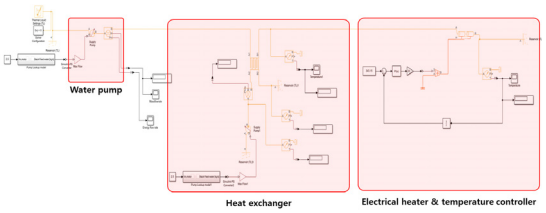


Fig. 2. Water supply system model

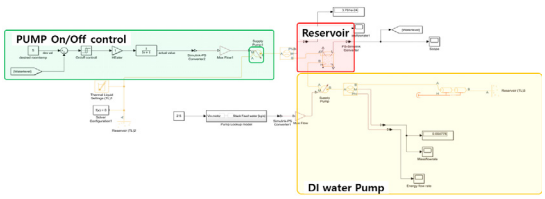
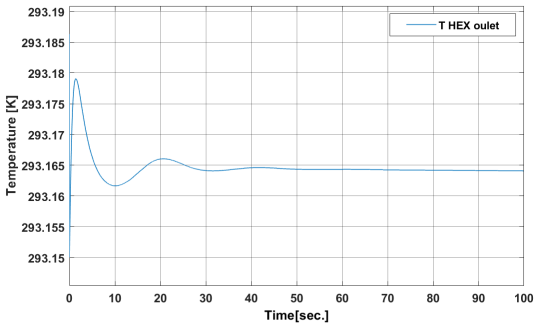
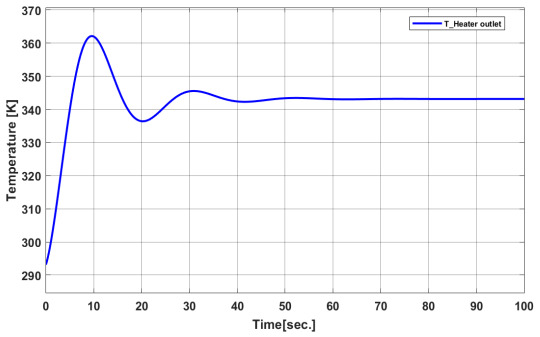


Fig. 4. DI water generator and pump model

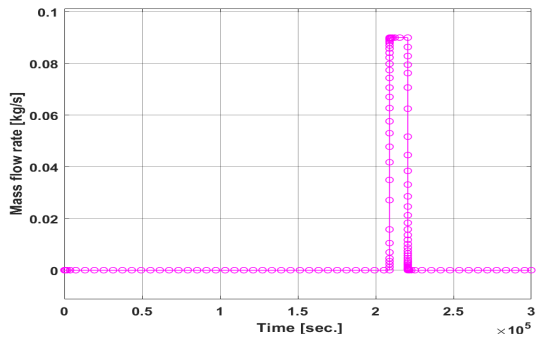


(a) Heat exchanger

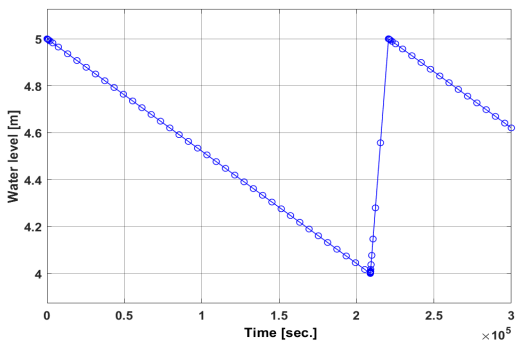


(b) Heater

Fig. 3. Transient result for temperature of heat exchanger and heater



(a) Mass flow rate



(b) Water level

Fig. 5. Transient result for mass flow rate and water level of DI water reservoir

상해 주기 위하여 on/off 제어기를 이용하여 구동하였다.

Fig. 5는 시간에 따른 펌프의 유량 및 저장조의 수위 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 각각 나타낸다. 유량의 경우 일정 시간이 지났을 때 순간적으로 약 0.09 kg/s의 일정한 유량이 공급되는 형태를 보이며 이로 인해 물의 수위 변화는 점차 감소하다가 다시 증가하는 형태의 반복적인 주기의 패턴을 보인다. 따라서 초순수 저장조와 펌프의 on/off에 대한 통합 시뮬레이션에서 적절한 결과를 도출하였음을 알 수 있다.

Fig. 6은 저장조 및 물 공급계 모델을 통합한 시뮬레이션 모델을 보여준다. 저장조 및 물 공급계 통합 모델은 펌프 on/off 제어, 공급수의 유량 제어, 열교환기를 포함한 냉각 시스템, 전기히터 제어 모델 등이 포함되어 있다. 이를 통해 저장조의 온도 및 수위 변화, 열교환기 입출구 온도 및 전기히터에 의한 온도 결과 도출이 가능하다.

Fig. 7은 저장조의 온도 및 수위 변화, 열교환기의 고온 영역과 저온 영역 그리고 전기히터에 의한 온도 시뮬레이션 결과들을 보여준다. 저장조 온도는 시간이 지남에 따라 점차 증가하며 그 기울기가 감소하게 된다. 물의 수위 변화는 시간이 지남에 따라 감소했다가 증가하는 형태를 보인다. 펌프와 열교환기 온도는 저장조의 결과와 유사하게 점차 증가하며 그 기울기가 감소하는 형태를 보인다. 열교환기 출구 온도는 일정하며 전기히터에 의한 온도는 스택 온도와 유사하게 증가하다가 감소하여 정상 상태 온도를 유지하는 형태로 나타난다. 따라서 저장조 및 물 공급계를 통합한 시뮬레이션에서 적절한 결과를

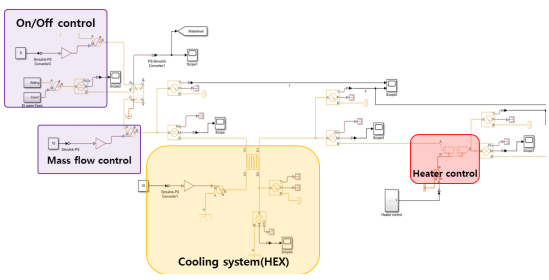
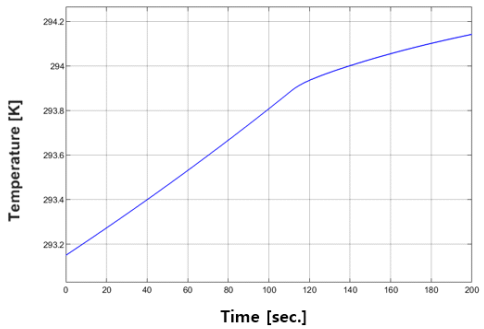
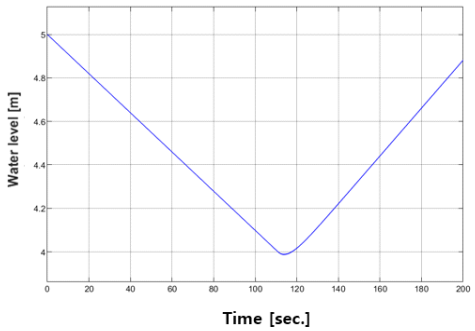


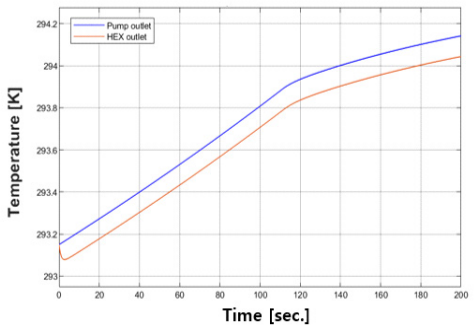
Fig. 6. Water supply system and reservoir model



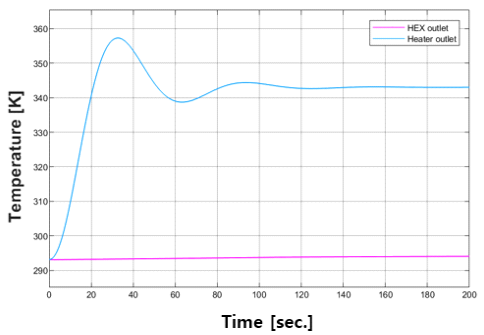
(a) Temperature (reservoir)



(b) Level meter (reservoir)



(c) Pump & heat exchanger



(d) Heat exchanger & heater

Fig. 7. Transient result for PEM water electrolysis system

도출하였음을 알 수 있다.

Fig. 8은 수전해 스택에서 배출되는 수소 라인에 대한 시뮬레이션 모델을 보여준다. 수소 배출 라인 모델은 수소 가스 내 수분 제거를 위한 가스 분리(gas separator) 모델과 수소 가스 가압을 위하여 가스 레귤레이터(gas regulator)를 이용한 가스 압력 제어 모델로 구성되어 있다. 본 연구에서는 가스 분리 모델을 Simscape™의 체임버 모델로 구성하였으며 가스 내 수분을 제어함으로써 고순도 수소 생산에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 Simscape™ 기반의 수전해 시스템의 통합 시뮬레이션 모델을 검증하기 위하여 대표적인 신재생에너지인 태양광 발전과 풍력 발전에 대한 전력 데이터를 이용하여 시뮬레이션 작업을 수행하였다. Fig. 9는 실제 한국전기연구원에 설치된 태양광 발전 설비로부터의 전력 생산 데이터를 이용한 전력 프로파일과 풍력 발전으로부터의 모의 전력 프로파일을 나타낸다. 본 연구에서는 직접 태양광 발전 설비를 구축하여 시간에 따른 전력 프로파일을 확보하였다. 태양광 발전 설비의 경우 0인 상태에서 특정 시간이 지나면 급격하게 전력이 증가하여 최댓값을 유지하다가 다시 급격하게 전력이 감소하여 0의 값을 유지하는 큰 사다리꼴의 프로파일 형태를 가진다. 풍력 발전의 경우 직접 전력 프로파일을 확보하기 어려워 직사각 형태의 일정 주기를 가지는 프로파일을 가지도록 모사하였다. 두 신재생에너지의 전력 데이터를 활용하여 Simscape™ 기반의 수전해 시스템의 통합 시뮬레이션 모델을 검증하였다.

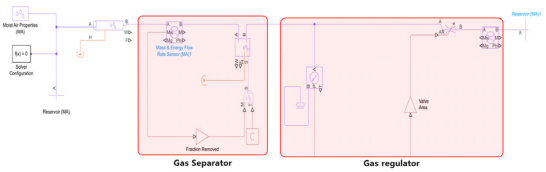
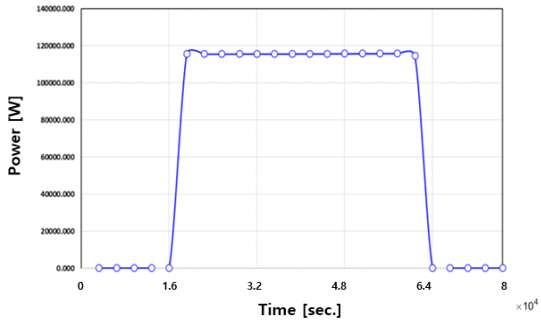


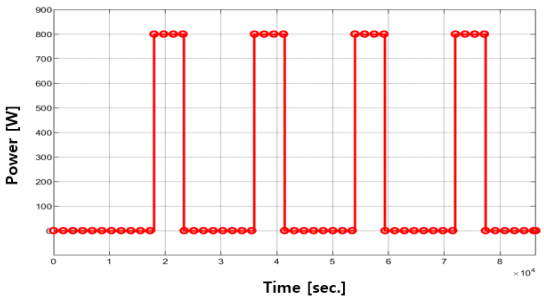
Fig. 8. Hydrogen exhaust line model for PEM water electrolysis system

(a) Picture for photovoltaic power generation



(b) Profile for photovoltaic power generation

(c) Picture for wind power generation



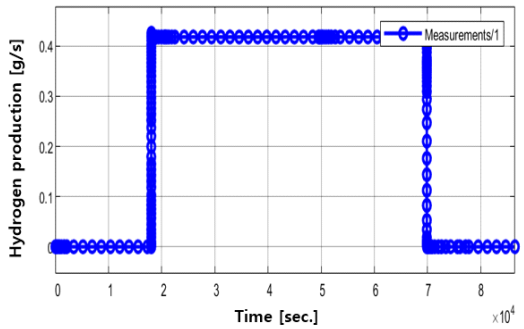
(d) Profile for wind power generation

Fig. 9. Input data for Simscape™ simulation for PEM water electrolysis system

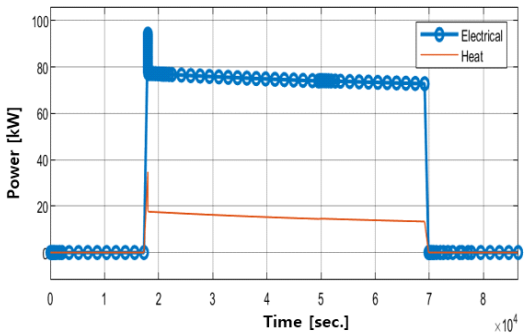
Fig. 10은 실제 태양광 전력 생산량을 적용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 초순수 탱크 수위 모델, 초순수 탱크 온도 및 스택 전단 온도 변화 등의 결과는 제외하고 시간 및 인가 전류에 따른 스택의 수소 생산량, 소모 전력, 발열량, 스택 온도 변화 등 스택과 관련된 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 인가 전류에 따른 수소 생산량은 전력 프로파일과 유사한 형태로 도출되며 소모 전력과 발열량은 순간적인 전력 프로파일의 증가로 인해 피크가 발생하였다가 서서히 감소하게 된다. 이로 인해 스택 전압이 동일한 형태로 피크가 발생하였다가 서서히 감소하고 전력이 0이 되면 일정 전압을 유지하게 된다. 마지막으로 스택 온도는 일정 온도를 유지하다가 순간적인 전력 증가로 인해 급격하게 온도가 상승하게 되고 전력이 0이 되면 초기 온도보다 높은 온도를 유지하게 된다.

Fig. 11은 모의 풍력 발전 전력 생산량을 적용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 모의 풍력 발전 전력을 적용한 시뮬레이션 결과는 태양광 발전 전력 프로파일 결과와 유사한 결과를 도출하였다. 인가 전류에 따른 수소 생산량은 전력 프로파일과 유사한 형태로 도출하였으며 소모 전력과 발열량은 순간적인 피크가 발생하였다가 일정 시간을 유지하고 이후 감소하는 형태로 일정 주기를 가지게 된다. 스택 전압도 피크가 발생하였다가 서서히 감소하고 일정 전압을 유지하는 주기가 나타난다. 스택 온도는 일정 온도를 유지하다가 급격하게 온도가 상승하게 되고 반복적인 전력 프로파일에 따라 점차 온도가 증가하는 패턴이 나타난다.

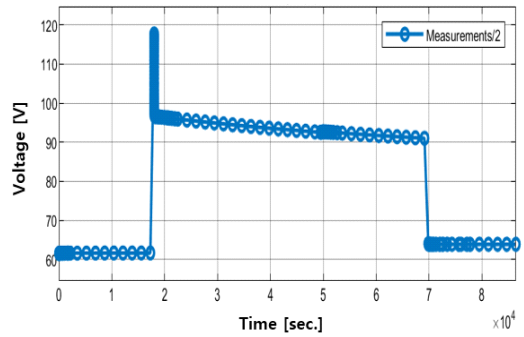
태양광 발전 및 모의 풍력 발전의 전력 프로파일에 따라 스택과 관련된 시뮬레이션 결과가 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 Simscape™ 기반의 수전해 시스템의 통합 시뮬레이션 모델을 통해 실제 신재생에너지의 전력 프로파일에 따른 연료전지 성능에 대한 구현이 가능함을 알 수 있다. 추후 연구에서는 다양한 실험을 통해 현재 단계보다 더 높은 신뢰성과 정확도를 포함하는 PEM 수전해 성능 평가 검증 모델을 개발하고자 한다.



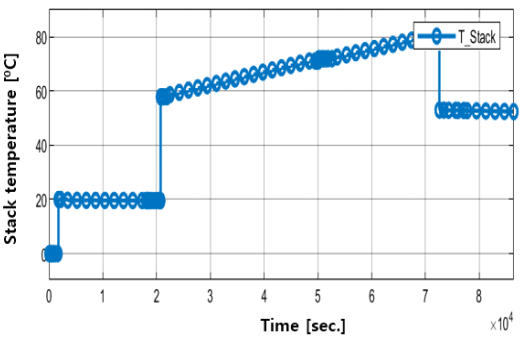
(a) Hydrogen production



(b) Power consumption

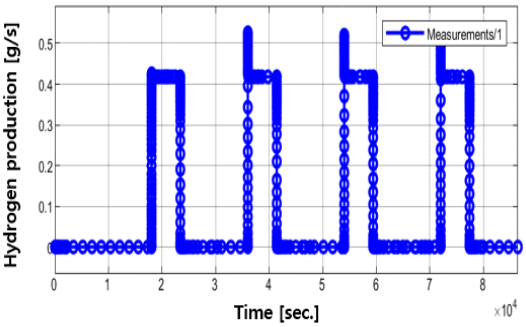


(c) PEMWE stack voltage

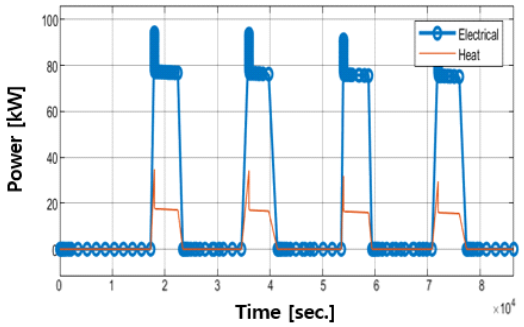


(d) Stack temperature

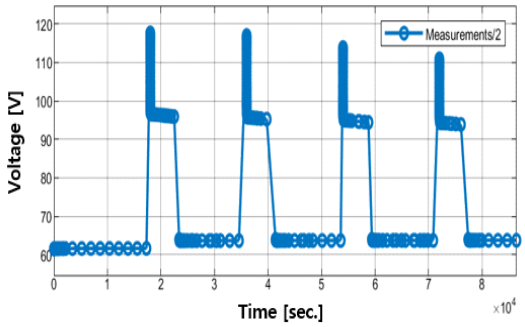
Fig. 10. Simulation results for photovoltaic power generation



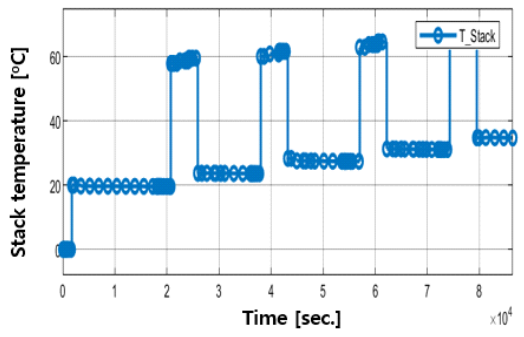
(a) Hydrogen production



(b) Power consumption



(c) PEMWE stack voltage



(d) Stack temperature

Fig. 11. Simulation results for wind power generation

4. 결 론

본 연구에서는 PEM 수전해 시스템에 대한 Simscape™ 환경의 통합 시뮬레이션 모델을 개발하고 각 모델의 과도 현상 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 본 연구에서 고려한 수전해 시스템은 초순수 생산 장치, 레저버, 물 펌프, 히터, 열교환기, 냉각 시스템, 스택, 제습기, 레귤레이터, 질량 유량계 등으로 이루어져 있다. PEM 수전해 시스템의 구성품에 대한 개별적인 모델에 대하여 Simscape™를 통해 PEM 수전해 시스템 통합 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 Simscape™ 기반의 수전해 시스템의 통합 시뮬레이션 모델을 검증하기 위해 대표적인 신재생에너지인 태양광 발전과 풍력 발전에 대한 전력 데이터를 이용하여 시뮬레이션 작업을 수행하였다. 태양광 발전 및 모의 풍력 발전의 전력 프로파일에 따라 스택과 관련된 시뮬레이션 결과가 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 본 연구에서 개발한 Simscape™ 기반의 수전해 시스템의 통합 시뮬레이션 모델을 통해 실제 신재생에너지의 전력 프로파일에 따른 연료전지 성능에 대한 구현이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 24A01070). 본 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(Korea Planning & Evaluation Institute of Industrial Technology) 연구비 지원에 의한 연구임(No. 24A02148).

References

1. A. Perna, M. Minutillo, and E. Jannelli, “Investigations on an advanced power system based on a high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell and an organic Rankine cycle for heating and power production”, Energy, Vol. 88, 2015, pp. 874-884, doi: https://doi.org/10.1016/

j.energy.2015.07.027.
2. S. S. Araya, F. Zhou, V. Liso, S. L. Sahlin, J. R. Vang, S. Thomas, X. Gao, C. Jeppesen, and S. K. Kær, "A comprehensive review of PBI-based high temperature PEM fuel cells", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 46, 2016, pp. 21310-21344, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.024.
3. I. M. Kong, A. Jung, and M. S. Kim, "Investigations on the double gas diffusion backing layer for performance improvement of self-humidified proton exchange membrane fuel cells", Applied Energy, Vol. 176, 2016, pp. 149-156, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.057.
4. Y. Bicer, I. Dincer, and M. Aydin, "Maximizing performance of fuel cell using artificial neural network approach for smart grid applications", Energy, Vol. 116, Pt. 1, 2016, pp. 1205-1217, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.050.
5. Y. D. Lee, J. Y. Kim, D. J. Yoo, H. Ju, and H. Kim, "Review of research trend in fuel cell: analysis on fuel-cell-related technologies in electrode, electrolyte, separator plate, stack, system, balance of plant, and diagnosis areas", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 530-545, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.530.
6. S. A. Park, E. K. Lee, J. W. Lee, S. K. Lee, J. S. Moon, T. W. Kim, and Y. K. Cheon, "A study on performance characteristic and safety of alkaline water electrolysis system", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 601-609, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.601.
7. J. K. Kuo and C. F. Wang, "An integrated simulation model for PEM fuel cell power systems with a buck DC–DC converter", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 18, 2011, pp. 11846-11855, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.107.
8. K. Latha, S. Vidhya, B. Umamaheswari, N. Rajalakshmi, and K. S. Dhathathreyan, "Tuning of PEM fuel cell model parameters for prediction of steady state and dynamic performance under various operating conditions", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 5, 2013, pp. 2370-2386, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.102.
9. B. Kim, D. Cha, and Y. Kim, "The effects of air stoichiometry and air excess ratio on the transient response of a PEMFC under load change conditions", Applied Energy, Vol. 138, 2015, pp. 143-149, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.046.
10. S. W. Tsai and Y. S. Chen, "A mathematical model to study the energy efficiency of a proton exchange membrane fuel cell with a dead-ended anode", Applied Energy, Vol. 188, 2017, pp. 151-159, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.128.
11. T. Taner, "Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: a case study of modeling and simulations", Energy, Vol. 143, 2018, pp. 284-294, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.102.
12. J. W. Yun, J. Y. Han, K. T. Kim, and S. S. Yu, "Model based hardware in the loop simulation of thermal management system for performance analysis of proton exchange membrane fuel cell", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 23, No. 4, 2012, pp. 323-329, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2012.23.4.323.
13. W. Y. Lee, G. G. Park, Y. J. Shon, S. G. Kim, and M. Kim, "Fault detection and diagnosis methods for polymer electrolyte fuel cell system", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 28, No. 3, 2017, pp. 252-272, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.3.252.
14. T. Koo, R. Ko, H. Noh, Y. Seo, D. Ha, D. Hyun, and J. Han, "Development of a fault diagnosis model for PEM water electrolysis system based on simulation", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 478-489, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.478.
15. M. Schumann, C. Cosse, D. Becker, D. Vorwerk, and D. Schulz, "Modeling and experimental parameterization of an electrically controllable PEM fuel cell", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 56, 2021, pp. 28734-28747, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.107.
16. L. Baum, M. Schumann, F. Grumm, and D. Schulz, "Large-signal time-domain equivalent circuit model for PEM fuel cell stacks", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 52, Pt. A, 2024, pp. 1285-1299, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.240.
17. C. Mahjoubi, J. C. Olivier, S. Skander-mustapha, M. Machmoum, and I. Slama-belkhodja, "An improved thermal control of open cathode proton exchange membrane fuel cell", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 22, 2019, pp. 11332-11345, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.055.
18. F. Moazeni and J. Khazaei, "Electrochemical optimization and small-signal analysis of grid-connected polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells for renewable energy integration", Renewable Energy, Vol. 155, 2020, pp. 848-861, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.165.