

연료전지용 PCS 설계를 위한 연료전지 스택 모델링

고정민, 김종수, 강현수, 이병국

성균관대학교 정보통신공학부

Modeling of Fuel Cell Stack to Design of Power Conditioning System (PCS)
for Fuel Cell Application

Jeong-Min Ko, Jong-Soo Kim, Hyun-Soo Kang, Byoung-Kuk Lee

School of Information & Communication Engineering, Sunkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는 연료전지용 PCS 설계 및 시뮬레이션 시 연료전지의 비선형 전원 특성에 의한 영향을 확인하기 위하여 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC) 스택을 전기화학 방정식을 기반으로 모델링한다. 모델링된 연료전지 전원을 부스트 컨버터의 입력으로 활용하여 시뮬레이션을 수행한다.

1. 서 론

최근 화석연료 매장량 제한과 연소 시 발생되는 온실가스로 인한 지구 온난화 문제로 인해 신재생에너지원의 필요성이 크게 대두되고 있다. 다양한 신재생에너지원 중 연료전지는 고효율 출력과 대형 발전소부터 휴대용에 이르기까지 적용범위가 넓은 장점 때문에 연구개발이 가속화되고 있다. 여러 종류의 연료전지 중 PEMFC는 저온구동이 가능하여 On/Off 사이클에 대한 내구성이 다른 연료전지보다 우수하다. 또한 출력밀도가 높으며, 시동시간이 짧아 휴대용 및 자동차용 전원으로 각광받고 있다.

연료전지는 비선형 직류 출력 특성 때문에 원하는 형태의 전력 제어를 위한 전력변환장치 (PCS)가 필요하다. PCS의 최적설계를 위해서는 입력전원인 연료전지의 출력 발생 특성의 이해가 반드시 필요하다. 때문에 현재까지 다양한 연구가 수행되었다. 임피던스 분광법을 이용한 연료전지 모델링이 수행되었다 [1]. 이 연구는 전문적인 전기화학의 이해가 필요하여 PCS 설계 시 적용하기 어렵다. 또한 BJT, 다이오드 및 수동소자를 이용한 Pspice 기반 전기적 회로 모델링이 수행되었다 [2]. 이 연구는 연료전지 스택의 변화에 능동적으로 대처하기 어렵다.

그래서 본 논문에서는 PEMFC를 전기화학 방정식을 기반으로 단계적으로 모델링하였다. 네른스트 모델과 분극현상을 이해하고 PEMFC 스택 비선형 출력전압을 모델링하였다. 모델링 결과를 MATLAB/Simulink로 시뮬레이션 하였다. 또한 모델링 된 전원을 부스트 컨버터의 입력으로 활용하여 시뮬레이션 하였고, 기존의 이상적인 DC 전압원을 적용하는 경우와의 차이를 비교하였다.

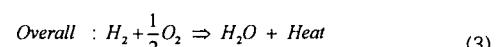
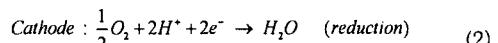
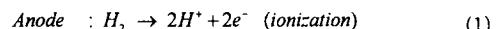
2. PEMFC 모델링

2.1 PEMFC 구조 및 동작원리

PEMFC는 중앙에 고분자 전해질 막(Membrane)이 있고, 막의 양쪽에 연료극 (Anode)과 공기극 (Cathode)의 두 전극이 위치한다. 막과 전극은 일반적으로 일체형으로 제작되고 막-전극 접합체 (Membrane Electrolyte Assembly, MEA)라고 한다. 전해질은 수소이온에 대해서만 전도도를 가지며 하고 나파온 (Nafion)이 주로 사용된다. 전극은 얇은 지지체와 탄소천이나 탄소종이 위에 측매를 도포한 측매층으로 구성되어 있다. 지지체는 측매층을 지지하는 역할 외에도 반응기체를 측매층으

로 확산시켜주는 기체 확산층 (Gas Diffusion Layer, GDL)의 역할도 한다.

연료극 (Anode)에서의 반응은 산화 반응이다. 수소는 연료극에서 수소이온 (H^+)과 전자 (e^-)로 분리된다. 이온은 전해질 막을 통해 산소극으로 이동하고, 전자는 집전판을 통해 외부회로로 흘러 전류를 발생시킨다. 산소극 (Cathode)에서의 반응은 환원반응이며, 산소가 수소이온과 전자와 반응하여 물이 생성된다. 전체 반응식은 식 (1)-(3)과 같다.



2.2 네른스트 모델

연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 장치이며, 화학에너지는 깁스 자유 에너지로 표현된다. 깁스 자유에너지는 온도뿐 아니라 반응 기체의 압력과 농도에 의해서도 변화한다. 이를 고려하여 구한 이론적 최대전압 (Open Circuit Voltage, OCV)은 1.229V이다.

네른스트 모델은 깁스 자유에너지 변화량에서 기체분압과 전압 등을 고려하여 유도할 수 있으며 식 (4)와 같다.

$$E = E^\circ + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \quad (4)$$

여기서, E° 는 평형전극 전위, R 은 가스 상수 (8.3144 $J/molK$), T 는 절대온도 (K), F 는 패러데이 상수 (96,495 C/mol), P 는 분압을 나타낸다.

2.3 분극현상 및 스택 출력전압

실제 연료전지 스택의 출력전압은 전압손실로 인해 OCV 보다 항상 작게 나온다. 이 손실을 분극 (Polarization)이라고 한다. 분극은 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

첫 번째는 활성화 분극 (Activation Polarization)이다. 활성화분극은 전극 표면에서 수소나 산소의 반응속도가 느린 경우 발생한다. 활성화 분극은 식 (5)와 같이 텐펠 방정식의 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_o} \quad (5)$$

여기서, α 는 전이계수, n 은 반응에 참여한 전자의 개수, i_o 는 교환 전류밀도, i 는 전류 밀도를 나타낸다.

이 식에서 볼 수 있듯이 반응속도가 느린 경우 α 와 i_o 가 작아져서 전극의 과전압 즉, 활성화 분극이 증가한다. 이 손실을 줄이려면 좋은 촉매를 사용하여 전이계수를 높이거나 전극의 표면적을 넓혀 교환전류밀도를 크게 해야 한다.

두 번째로 저항분극 (Ohmic Polarization)이다. 저항분극은 이온의 이동에 대한 전해질 내의 저항과 전극을 지나는 전자의 흐름에 대한 저항, 분리판/집적판과 전극 사이의 접촉저항 때문에 발생된다. 이 손실은 일반적인 옴의 법칙을 따르며 식 (6)과 같다.

$$\eta_{ohmic} = IR_T \quad (6)$$

여기서 R_T 는 이온, 전기, 접촉에 의한 모든 저항의 합이다.

세 번째로 농도분극 (Concentration Polarization)이다. 농도분극은 산소극과 연료극의 반응 속도 차이에 의한 농도 차이, 반응물과 생성물의 확산속도 차이 등에 의해 발생한다. 흑크의 확산 법칙과 반응물이 전극에 공급되는 최대한의 전류밀도인 제한 전류밀도를 고려하면 식 (7)과 같이 유도된다.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (7)$$

여기서 i_L 은 제한 전류밀도이며 식 (8)과 같이 표현된다.

$$i_L = \frac{nFDP}{RT\delta} \quad (8)$$

여기서, D 는 확산계수, δ 는 확산층의 두께이다.

PEMFC의 운전전압은 OCV에서 각 손실을 뺀 값으로 식 (9)과 같다.

$$V = E - (i + i_o)r - A \ln \left(\frac{i + i_o}{i_o} \right) + B \ln \left(1 - \frac{i + i_o}{i_o} \right) \quad (9)$$

여기서, $A = \frac{RT}{\alpha nF}$, $B = \frac{RT}{nF}$ 이다.

3. 시뮬레이션

모델링 된 화학 방정식을 기반으로 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 이상적인 DC 전압원과 비선형 특성을 갖는 PEMFC의 전원 특성을 승압형 컨버터와 연계하여 시뮬레이션 하였다.

그림 1은 각 분극현상으로 인한 PEMFC의 단위 셀 비선형 V-I 특성곡선을 나타낸다.

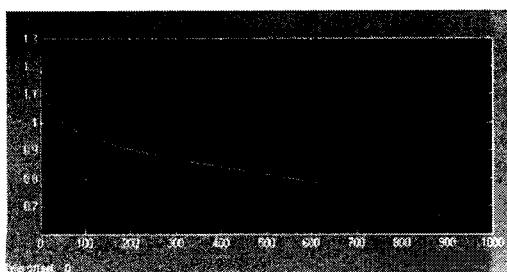


그림 1 PEMFC의 V-I 특성곡선

그림 2는 이상적인 DC 전압원을 입력으로 한 부스트 컨버터의 출력파형을 나타낸다. 부하의 변화가 입력 전압과 전류에 영향을 미치지 않는다.

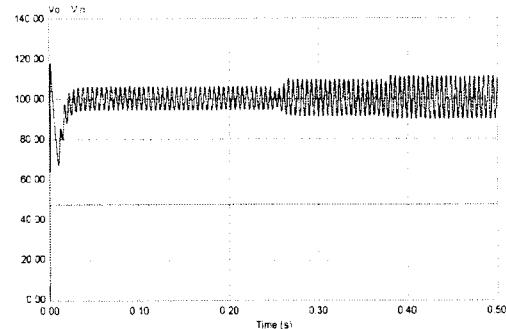


그림 2 DC 전압원 입력에 대한 출력곡선

그림 3은 연료전지 모델을 입력으로 한 부스트 컨버터의 출력파형을 나타낸다. 부하의 변화에 따라 입력 전압과 전류가 변화되는 것을 볼 수 있다. 입력전원의 비선형 특성으로 인해 입력전류의 증가가 이상적인 DC 전원에 비해 큰 것을 확인할 수 있다.

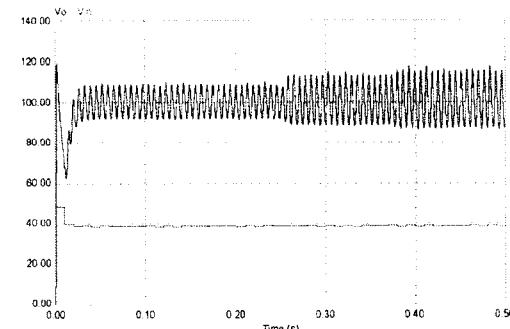


그림 3 연료전지 모델 입력에 대한 출력 곡선

4. 결 론

본 논문에서는 PEMFC를 전기화학 방정식을 기반으로 모델링하였고, 컴퓨터 시뮬레이션으로 비선형 출력 특성을 구현하였다. 이를 기반으로 전원의 차이에 따른 PCS의 출력력 특성을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 PCS 최적 설계를 위하여 입력 전원 조건이 반드시 고려해야 한다는 것을 확인하였다. 모델링 결과는 PCS 최적 설계를 위한 시뮬레이션 입력조건으로 활용할 수 있을 것이다.

【참 고 문 헌】

- [1] W.J. Choi, J. W. Howze, P. Enjeti., "Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current", J. of power sources, 158, pp. 1324-1332, 2006
- [2] Yu. D Yuyarajan. S, "A Novel circuit model for PEM fuel cells" APEC '04. Nineteenth Annual IEEE, Volume 1, pp. 362-366 Vol. 1, 2004.
- [3] James Larminie, Andrew Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", pp. 1-66, 2003
- [4] 김종수, 최규영, 나재형, 강현수, 이병국, 이원용, "연료전지 용 고효율 주변장치(BOP) 설계를 위한 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC) 스택 모델링", 대한전기학 학계 학술대회 논문집, pp. 201-203, 2007