

부하변화에 따른 스택전압 과도특성을 고려한 연료전지 모델링

고정민, 김중수, 최규영, 강현수, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Fuel cell stack modeling considering dynamic characteristic of stack voltage according to load variation

Jeong-Min Ko, Jong-Soo Kim, Gyu-Yeong Choe, Hyun-Soo Kang, Byoung-Kuk Lee
School of Information & Communication Sungkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는 연료전지의 정특성과 전압의 과도 특성을 고려한 연료전지 모델링을 하였다. 전기화학적 방정식으로부터 연료전지의 정특성을 모델링하였고, 실험결과 파형을 분석하여 RC 시상수를 이용하여 과도특성을 모델링하였다. 모델링은 Matlab Simulink를 이용하여 이루어졌으며, NEXA system을 이용하여 실험한 결과와 비교, 분석하여 이 모델링의 유용성을 검증하였다.

1. 서 론

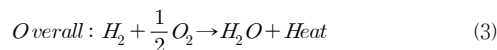
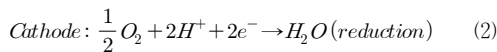
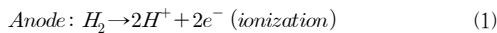
환경오염이나 유가 상승 등 현재 에너지의 단점에 의해 연료전지나 태양광, 풍력 등의 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중에서도 연료전지는 전기적 에너지 외에도 폐열을 사용할 수 있을 뿐 아니라, 기후의 변화에 따른 생산 전력 변화가 적고, 효율이 높다는 점 등 많은 장점을 갖고 있다. 연료전지의 출력전압을 안정되고 사용하기 편하게 조정하기 위해서는 PCS (Power Conditioning System)가 필수적이다. 이 PCS 설계를 할 때에는 연료전지의 출력전압이 일정하지 않아 제어하는 데 어려움을 갖는 특성을 고려해야 한다. 그러므로 PCS 최적화 설계에 있어 단순한 DC전원이 아닌 연료전지의 출력전압 특성을 가지고 있는 모델이 필요하다.

이런 이유로 여러 가지 방법으로 연료전지 모델링이 이루어져 왔다. 전기적으로 연료전지를 모델링한 경우에는 전기소자 R, C를 이용하였다. R과 C를 병렬로 연결하고, 거기에 다시 R을 직렬 연결하여 연료전지와 축전기 사이의 동특성 상호작용을 표현하여 모델링하였다 [1]. 그리고 물을 중요한 동특성의 변수로 생각한 경우에는 확산 층과 전극에서 물 분자나 습기 등 물과 관련된 식을 정상상태 식으로부터 유도하여 수학적으로 모델링하는 연구도 진행되었다 [2]. 그 외에 반응물의 농도를 동특성의 변수로 고려하고, 특정 작동 점에서 작은 입력 변수 맥동을 이용하여 소신호적으로 접근하는 연구도 수행되었다 [3]. 본 논문에서는 동특성의 원인들보다 동특성에 의한 연료전지의 전압 파형 결과 자체에 중점을 두었고, 이 파형을 Matlab Simulink를 이용하여 모델링하였다.

2. PEMFC 모델링

2.1 PEMFC 구조 및 동작 원리

연료전지는 산소와 수소가 반응하여 물이 되는 화학반응을 이용하여 전력을 얻는 장치이다. 이때, 산소가 공급되는 전극을 공기극 (cathode), 수소가 공급되는 전극을 연료극 (Anode)이라고 한다. 이 두 극 사이에는 전해질이 존재하는데, 이 전해질로 특히, 고분자 전해질 막을 사용하는 연료전지를 PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)라고 한다. 연료극에서는 산화반응이 일어나 수소가 수소분자와 전자로 분리되고, 산소극에서는 연료극에서 외부회로를 통해 넘어온 전자와 전해질을 통해 전달된 수소분자가 산소분자와 반응하는 환원반응이 일어나 물이 생성된다. 화학방정식으로 나타내면 식 (1)-(3)과 같다.



2.2 PEMFC 정특성 모델링

연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변화하는 장치이며, 화학에너지는 깁스 자유에너지로 표현된다. 깁스 자유에너지는 온도, 반응기체의 압력, 농도에 의해 변화하며 이를 통해 구한 이론적인 연료전지의 최대 전력 (OCV, Open Circuit Voltage)은 1.229V이다.

네른스트 모델은 깁스 자유에너지변화량을 유도하여 구할 수 있으며, 식 (4)와 같다.

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

여기서, E_o 는 평형전극 전위, R 는 가스 상수 (8.3144 J/mol K), T 는 절대온도 (K), F 는 페러데이 상수 (96,495 C/mol), P 는 분압을 나타낸다.

실제 연료전지 스택의 출력전압은 전압손실로 인해 항상 OCV보다 낮게 나온다. 이 전압 손실을 분극 (Polarization)이라 하며, 크게 활성화 분극, 저항 분극, 농도 분극으로 나눌 수 있다. 활성화 분극 (Activation Polarization)은 전극 표면의 수소나 산소의 반응속도가 느린 경우에 발생하는 손실로 식 (5)와 같이 타펠 방정식의 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

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

여기서, α 는 전이계수, n 은 반응에 참여한 전자의 계수, i_o 는 교환전류 밀도, i 는 전류밀도를 나타낸다. 저항 분극 (Ohmic Polarization)은 이온의 흐름에 의해 전해질에서의 저항, 전자의 흐름에 의한 외부회로와 전극에서의 저항, 전극사이의 접촉 저항 등에 의해 생기며, 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, R_T 는 발생하는 모든 저항의 합이다. 농도 분극 (Concentration Polarization)은 산소극과 연료극의 반응 속도 차이에 의한 농도차이, 반응물과 생성물의 확산속도의 차이 등에 의하여 생기며, 워크의 확산법칙과 제한전류밀도를 고려하여 식 (7)과 같이 유도된다.

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

여기서, i_L 는 제한전류밀도이다.

OCV와 위의 손실들을 고려하면 실제 PEMFC의 운전전압은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = E - (i + i_n)r - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_o} \right) + B \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_o} \right) \quad (8)$$

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

위의 전기화학방정식들을 Matlab Simulink에서 수학적으로 표현하여 정특성을 구현하였다.

2.3 PEMFC 과도특성 모델링

연료전지가 에너지를 생산하기 위해서는 연료전지 스택 외에도 개질기, 열교환기, 펌프, 콘덴서, 가습기, 송풍기, 압축기, 필터, 유체제어기 등의 BOP (Balance of Plant)system을 필요로 한다. 이러한 BOP system 들이 연료전지 내부에서 발생하는 분극과는 또 다른 손실을 발생시킨다. 특히, 연료전지가 실제 작동할 때에는 펌프나 밸브 등의 연료

전달 시스템의 제약으로 연료의 공급 속도가 연료전지 내부의 반응속도에 따라가지 못하여 부하가 갑자기 증가할 때, 전압이 정상상태와는 다른 과형을 보이는데, 이를 과도특성이라고 한다 [4]. 이런 특성을 고려하지 않은 PCS에서는 제어 불안정성이 야기되고, 시스템에 손상이 생길 수도 있다. 그러므로 연료전지를 전원으로 하는 PCS 설계를 위해서는 연료전지 모델링에 이러한 과도 특성이 구현되어야 한다.

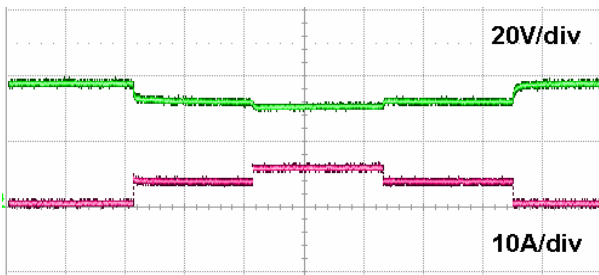
이러한 과도특성은 부하가 감소할 때, 전압이 급격히 떨어졌다가 시간이 흐름에 따라 지수함수의 과형으로 정특성에 다다른 과형을 보인다. 그러므로 과도특성의 모델링은 이 과형의 형태에 따라 RC 시상수를 이용하여 구현할 수 있다. RC 시상수는 식 (9)와 같다.

$$y = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\tau = RC) \quad (9)$$

위 식을 이용해 부하가 감소할 때만 과도특성을 보이는 연료전지를 모델링하였다. 모델링할 때에 과도특성의 원인보다는 과도특성이 나타나는 과형 결과에 중점을 두었다. 그리고 실험 결과를 통해 각각의 파라미터를 얻어 연료전지 모델링에 적용하였다.

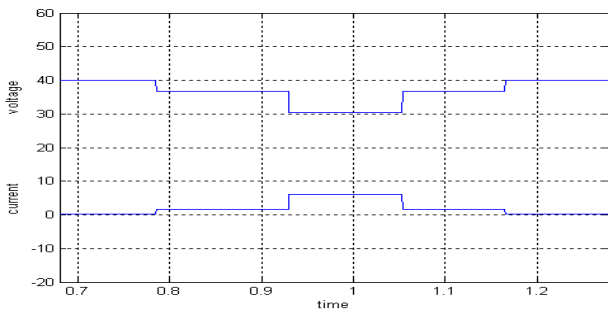
3. 시뮬레이션 및 실험 결과

연료전지의 정특성과 과도특성을 Matlab Simulink로 구현하였다. 연료전지의 정특성은 전기화학적 방정식을 이용하여 표현하였고, 과도특성은 정특성에서 출력된 전압을 받아 부하가 감소할 때만 RC 시상수에 의해 전압이 급격히 떨어졌다가 정상상태에 도달하는 과도특성을 표현하고 이 전압을 부하의 전원으로 썼다. 그리고 이 부하에서 출력되는 전류를 다시 연료전지의 입력전류로 사용하도록 시뮬레이션 하였다. 그림 1은 NEXA system에서 부하를 변화시킬 때의 전류와 전압 과형으로 위쪽의 과형이 전압, 아래쪽의 과형이 전류의 변화를 나타낸다.



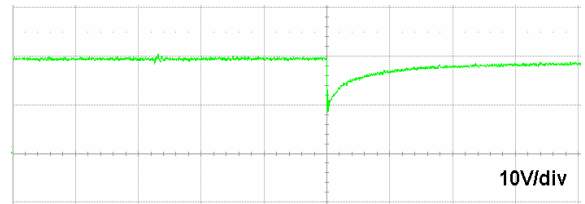
〈그림 1〉 NEXA system의 전류와 전압 과형

그림 2는 부하의 변화에 따른 연료전지 정특성 모델링의 결과로 연료전지의 전압과 전류를 나타낸다. 부하가 증가할 때 전압이 감소하고 전류는 증가하며, 부하가 감소할 때는 전압이 증가하고 전류가 감소한다. 그림 2의 시뮬레이션 결과가 그림 1의 실험 결과와 유사함을 확인할 수 있다.

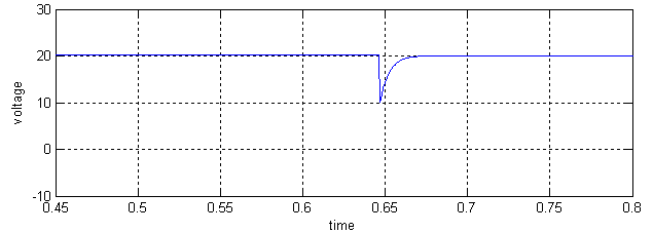


〈그림 2〉 연료전지 전압

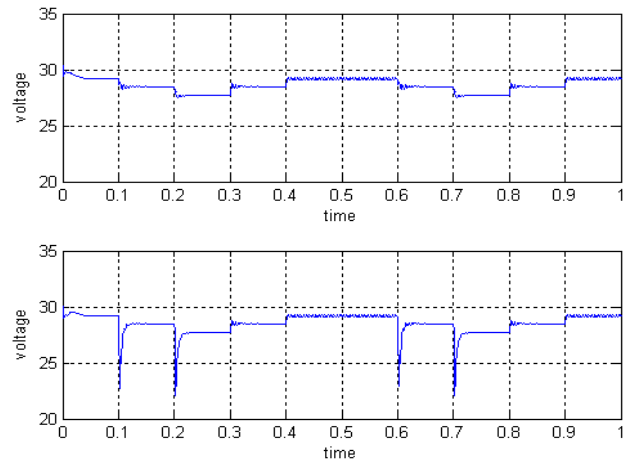
그림 3은 NEXA system의 실험 결과 과형으로 부하가 감소할 때의 전압과형이다. 부하가 감소할 때, 급격히 감소했다가 시간이 지나면서 정상상태의 전압으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 전압의 과도특성을 모델링한 것의 시뮬레이션 결과에서 부하가 감소할 때의 전압과형을 확대한 것이다. 그림 4는 그림 3의 실험 결과 과형과 같은 형태의 과형을 나타낸다. 이 과형의 떨어지는 정도와 전압이 급격히 감소한 후 정상상태에 도달하기까지 걸리는 시간은 실험결과를 정리하여 모델링의 파라미터에 적용하였다.



〈그림 3〉 NEXA system 전압과형



〈그림 4〉 과도특성 모델링 시뮬레이션



〈그림 5〉 시뮬레이션 결과

그림 5는 정특성 모델링과 과도특성 모델링의 전체 시뮬레이션 결과이다. 위쪽 그래프가 정특성, 아래 그래프가 과도특성을 나타낸다.

4. 결 론

본 논문에서 연료전지의 정특성과 과도특성을 전기화학적 방정식과 RC 시상수로 표현한 후, Matlab Simulink를 이용하여 구현하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 NEXA system 실험결과와 비교하여 검증하였다. PCS 설계 시 DC 전원을 입력전원으로 하였을 때와 달리 연료전지가 입력전원일 경우, 출력 전압 비선형성에 의해, 제어 불안정성이나 시스템 손상의 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 연료전지 모델은 PCS 최적 설계 시 적용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. C. Amphlett, E. H. de Oliveria, R. F. Mann, P. F. Roberge, A. Rodrigues, J. P. Salvador, "Dynamic interaction of a proton exchange membrane fuel cell and a lead-acid battery," J. Power Sources, vol. 65, pp. 173-178, 1997.
- [2] W. Friede, S. Rael, B. Davat, "Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, pp. 1234-1241, 2004.
- [3] L. Y. Chiu, B. Diong, R. S. Gemmen, "An improved small-signal model of the dynamic behavior of a PEM fuel cells," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, pp. 970-977, 2004.
- [4] G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci, "An Automatic Test System for the Dynamic Characterization of PEM Fuel Cells," IMTC, 2004.