

Fuel Cell Stack Dynamics Modeling Considering Load Variation

高 廷 旻* · 金 鍾 秀* · 崔 奎 英* · 康 鉉 受* · 李 秉 國†

(Jeong-Min Ko · Jong-Soo Kim · Gyu-Yeong Choe · Hyun-Soo Kang · Byoung-Kuk Lee)

Abstract - In this paper, transient voltage response of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) stack is analyzed and voltage dynamic characteristic is modeled for optimal design of power conditioning system (PCS). According that the load is changed, the corresponding operating voltage of fuel cell stack is also varied with a certain deep and rising time due to the chemical and mechanical responses. This transient behavior can affect on the operation with respect of PI gain in controller, duty ratio, capacitor of capacitor and so on. So in this paper the detailed theoretical analysis of transient voltage dynamics is explained and the methodology of dynamic modeling is introduced. In addition, the validity and feasibility of the proposed dynamic model is verified by experimental results under various load conditions.

Key Words : PEM Fuel Cell, Fuel Cell Dynamics, Modeling and Simulation, PCS for Fuel Cell, Optimal Design

1. 서 론

화석에너지의 사용급증으로 인해 환경오염이나 유가상승 등의 문제점이 발생함에 따라 태양광이나 연료전지, 풍력 등의 신재생에너지에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 이 중에서도 연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 장치로 효율이 높고, 반응의 결과로 나오는 폐열을 이용할 수도 있으며, 태양광이나 풍력 등 다른 신재생에너지에 비해 자연환경의 영향을 적게 받아 출력의 신뢰성이 높다는 장점으로 주목받고 있다. 연료전지를 효율적으로 운영하기 위해서는 전원의 출력전압을 소비자가 원하는 형태로 변환해주는 PCS (Power Conditioning System)와 반응기체의 압력과 량을 적절히 조절하여 연료전지 스택에 공급하는 가스 공급 시스템과 출력을 보조할 수 있는 커패시터를 포함하는 BOP (Balance of Plant)를 필요로 한다. 이 시스템의 효과적인 설계를 위해서는 연료전지의 출력 특성에 대한 이해가 필수적이다. 연료전지 출력은 정특성뿐만 아니라 부하의 급격한 변화에 따른 동특성도 나타낸다. 이러한 동특성이 PCS 및 BOP에 미치는 대한 영향을 알아보기 위해서는 동특성을 포함한 연료전지 모델이 필요하다. 이러한 이유로 지금까지 여러 가지 방식의 연료전지 모델링이 수행되어 왔다.

연료전지의 정특성과 동특성을 셀 전체의 전기적 임피던스 모델로 구성된 모델링이 수행되었다. 이 연구에서는 연

료극과 산소극을 각각 전달저항과 Warburg 임피던스, double layer 커패시터로 구성하였고 전해질은 전해질 막 저항으로 표현하였다 [1]. 다른 한편, 전달과정에서 일어나는 물리적 현상을 채널과 확산층, 전극, 전해질에서 이론적으로 정리하고 이를 식으로 표현한 수학적 모델링이 수행되었다. 채널에서는 각 기체의 분압을 변수로 하는 식으로 나타내었고, 확산층에서는 서로 다른 종류의 기체들 사이에서 일어나는 충돌을 스테판-맥스웰 방정식으로, 전극에서는 전압강하와 전류의 밀도의 관계를 허크의 방정식으로 그리고 전해질에서는 다양한 계수를 이용하여 물과 전자의 전달밀도를 질량 평형 방정식으로 나타내었다 [2]. 그 외에 반응물의 농도를 동특성의 변수로 고려하고, 특정 작동 점에서 작은 입력 변수 맥동을 이용하여 소신호적으로 접근하는 연구도 수행되었다 [3].

위의 논문들은 연료전지의 정상상태 및 Charge double layer에 의한 동특성은 잘 반영하고 있지만, 부하가 순간적으로 증가할 때 발생하는 전압의 급격한 강하현상과 회복시간은 고려하지 않았다. 이러한 과도 특성은 PCS의 하드웨어 용량설계, 제어기 성능, 에너지 보상장치 용량 등에 영향을 미치고 특히, 부하 급변이 빈번한 자동차등의 시스템에서는 구성요소에 유효한 영향을 줄 수 있다. 그러므로 이러한 과도현상의 영향을 수치적으로 표현하고 비교, 분석하기 위해서는 부하변화에 따른 연료전지의 출력 특성을 반영하는 시뮬레이션 모델이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 연료전지의 과도응답특성을 분석하여 이론적으로 설명하고, 실험 결과를 해석하여 얻어진 파라미터를 이용하여 부하변화에 따른 전압강하 현상 및 회복현상을 포함하는 동특성 모델링을 수행하였다. 동특성은 연료전지 종류, 용량, 물리적 특성, 온도, 압력 등에 따라 일정한 규칙으로 수치화 할 수 없으므로 본 논문에서는 파라미

* 準 會 員 : 成均館大學校 情報通信工學部 碩士課程

† 교신저자, 正會員 : 成均館大學校 情報通信工學部 助教授 · 工博

E-mail : bklee@skku.edu

接受日字 : 2008年 8月 20日

最終完了 : 2008年 12月 2日

터 튜닝을 통한 동특성 모의가 가능하도록 가변 파라미터를 포함한 연료전지 동특성 모델을 개발하였다. 이를 위해, Ballard 사의 1.2kW Nexa 고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)에 전류밀도 영역에 따른 부하를 인가하는 실험을 수행하여 전압 강하 및 회복시간을 측정하였다. 그리고 실험결과를 분석하여 파라미터를 추출하고 개발된 동특성 모델에 적용하여 정특성과 함께 동특성도 포함하는 연료전지 모델을 구현하였다.

2. 연료전지 모델링

2.1 연료전지 시스템

연료전지 시스템은 산소와 수소의 전기화학 반응을 통해 전기와 물 그리고 폐열을 발생시키는 연료전지 스택 (Stack)과 출력전력을 사용자가 원하는 크기와 주파수를 가진 전력으로 변환한 후 부하와 BOP에 공급하는 역할을 하는 PCS, 그리고 연료전지에 연료인 수소와 산소를 공급하고 연료전지 스택이 효율적으로 운전하도록 최적의 상태를 유지하는 BOP 시스템으로 구성되어 있다. 이 BOP 시스템에는 LNG, LPG, 메탄올, 가솔린 등의 물질로부터 수소를 만들어내는 연료개질기와 스택으로 공급되는 수소, 산소의 불순물을 제거하는 필터, 전해질 막의 이온 전도성을 유지하기 위해 스택에 공급되는 기체에 적절한 수분을 제공하는 가습기, 기체의 압력을 조절해주기 위한 공기압축기와 유체 제어기, 기체를 스택으로 밀어 넣어주는 블로워 (Blower) 그리고 에너지 저장 및 보상을 위한 배터리 등으로 이루어져 있다 [4]-[6]. 그림 1은 연료전지 구동 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸다.

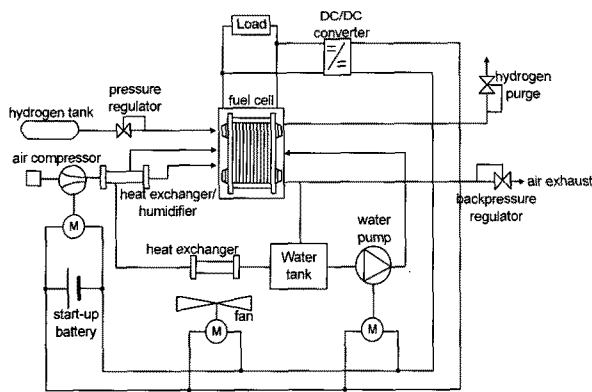


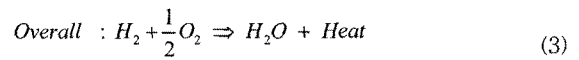
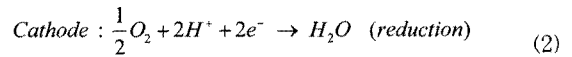
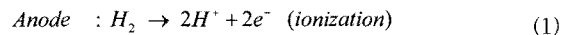
그림 1 연료전지 시스템 블록 다이어그램

Fig. 1 Block diagram of fuel cell system

본 논문에서는 다양한 종류의 연료전지 중에서도 상온에서 동작이 가능하고 출력 밀도가 높으며 부하변화에 빠른 응답특성을 가지고 시동시간이 짧은 장점을 갖고 있어서 자동차나 휴대기기용 전원으로 많이 사용되고 있는 PEMFC 스택을 모델링하였다.

2.2 PEMFC 정특성 모델링 [7],[8]

PEMFC는 고분자 전해질 막, 산소가 공급되는 공기극, 수소가 공급되는 연료극, 집전체인 분리판으로 구성되어 있다. 그리고 물질 전달을 고르게 하기 위해 분리판과 전극사이 기체 확산 층을 삽입한다. 전해질 막은 공기극과 연료극 사이에 존재하며 PEMFC의 경우에서 전해질 막으로 고분자 중합체를 사용한다. 이 막은 사용 온도가 100°C 이하로 제한적이기 때문에 반응을 활성화시키기 위해서 열 대신 백금 촉매를 사용한다. 연료극에서는 산화반응이 일어나 수소가 수소이온과 전자로 분리된다. 수소이온은 전해질을 통해 산소극으로 공급되며 전자는 외부회로를 통해 산소극으로 공급되고 이러한 전자의 이동으로 인해 전류가 발생하고 전력이 생성된다. 산소극에서는 수소극으로부터 공급받은 수소이온, 전자, 그리고 산소극으로 공급되는 산소가 반응하여 물과 열이 생성되는 환원반응이 일어난다. 이를 화학방정식으로 나타내면 식 (1)-(3)과 같다.



연료전지는 화학에너지가 전기에너지로 변환하는 반응으로 출력전압을 깁스자유에너지 이론을 이용하여 표현할 수 있다. 임의의 온도와 압력에서의 깁스자유에너지 변화량을 나타내는 공식으로부터 반응물인 수소, 산소의 온도와 분압, 연료전지 작동온도와 압력을 통해 네른스트 식을 얻을 수 있고 식 (4)와 같다. 이 식을 통해 계산한 이론적인 연료전지의 한계 전위 (OCV, Open Circuit Voltage)는 1.229V 이다.

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \quad (7)$$

여기서, E^0 는 평형전극전위, R 은 가스상수 (8.3144 J/mol K), T 는 절대온도 (K), F 는 페러데이 상수 (96,485 C/mol), P 는 분압을 나타낸다.

그러나 실제 연료전지 출력전압은 분극 (Polarization)현상에 의해 손실이 발생되기 때문에 네른스트 전압보다 항상 낮게 출력되며, 이러한 분극 현상에는 활성화분극, 농도분극, 저항분극 등이 있다.

첫째, 활성화 분극 (Activation Polarization)은 전극표면에서 수소나 산소의 반응속도가 느린 경우 발생하는 손실이다. 수소와 산소가 반응하기 위해서는 일정 밀도이상의 기체가 필요하고 최소의 반응 가능한 기체밀도가 모이는 과정에서 수소이온과 전자가 전해질 막의 양 표면에 머물러 있게 된다. 이 수소이온과 전자에 의해 전해질 막 양단에 전위차가 생기게 되고 이 전압이 연료전지에서의 손실이 되며 식 (5)와 같다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (5)$$

여기서, α 는 전이계수, n 은 반응에 참여한 전자의 개수, i_0 는 교환전류밀도, i 는 전류밀도를 나타낸다.

교환전류밀도는 평형 상태에서 정반응에 의한 전류밀도로 정의된다. 평형상태는 겉으로 보기에 반응이 없으나 실제로는 전자 교환의 정반응과 역반응이 동일한 속도로 일어나고 있는 상태이다. 활성화 분극에 의한 손실은 반응속도나 교환전류밀도를 증가시키면 감소하게 된다. 교환전류밀도는 전극의 활성화와 관련된 값으로 전극 재료에 따라 차이가 나며 전극의 활성화를 높여 교환전류밀도를 높이기 위해 촉매를 사용하고, 다공성 전극을 구성하기도 한다.

둘째로, 저항 분극 (Ohmic Polarization)은 이온의 흐름에 의해 전해질에서 생기는 저항이나 전자의 흐름에 의한 회로와 전극에서의 저항, 전극이나 분리판에서의 기계적 접촉 저항 등 연료전지에서 출력전압을 만드는 과정에서 발생하는 모든 저항성분에 의한 손실이며, 식 (6)과 같이 옴의 법칙을 이용하여 나타낼 수 있다.

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

여기서, $R_T(\Omega/m^2)$ 는 반응과정에서 생성되는 모든 저항의 합이다.

셋째로, 농도 분극 (Concentration Polarization)이 있다. 농도 분극은 전류의 급격한 증가에 의해 반응물이 빠르게 소모되면서 전극주변에서 반응물의 압력이 낮아지고 이에 따라 네른스트 모델 식 (4)에 의해 전압도 낮아지면서 생기는 손실이다. 기체상에서의 확산속도, 반응물과 생성물의 전해질 사이의 용해 또는 배출 속도, 반응물과 생성물이 전해질 막과 공기극 사이에서 확산하는 속도 등이 원인이 된다. 반응물이 전극표면에 전달되는 속도는 획크의 확산법칙에 의해 식 (7)과 같이 표현된다.

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\xi} \quad (7)$$

여기서, D 는 반응물의 확산계수, C_B 는 전해질 내부의 반응물 농도, C_S 는 전극표면에서의 반응물 농도이고, ξ 는 확산층의 두께이다.

특히, C_S 가 0인 경우는 반응물이 전극에 공급되는 속도가 최대가 되며 이때의 전류밀도를 제한전류밀도(i_L)라고 한다. 이로부터 농도 분극에 관한 식을 유도하면 식 (8)과 같다.

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (8)$$

연료전지의 출력전압은 네른스트 모델에 의해 유도된 OCV전압에서 활성화분극, 저항분극, 농도분극 등의 손실을 뺀 값으로 식 (9)와 같다

$$V = E - (i + i_n)r - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) + B \left(1 - \frac{i + i_n}{i_L} \right) \quad (9)$$

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

정특성 모델은 위의 전기화학방정식을 이용하여 Matlab Simulink로 그림 2와 같이 구현하였다.

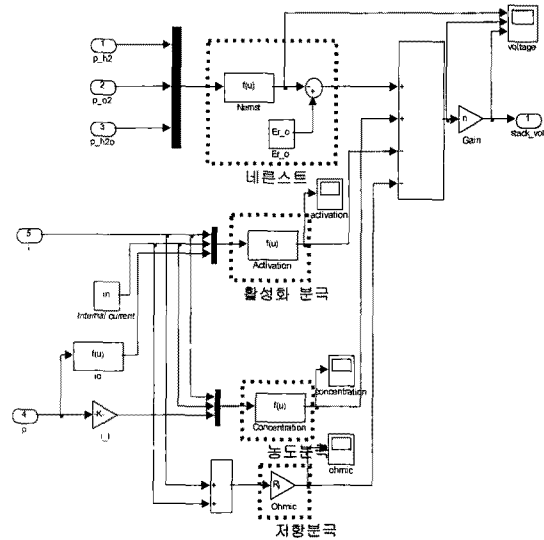


그림 2 연료전지 정특성 모델 시뮬레이션 블록도
Fig. 2 Block diagram of fuel cell steady state model

2.3 연료전지 과도특성 모델링

그림 3은 1.2kW Ballard NEXA PEMFC를 이용하여 부하를 무부하에서 200W로 급격하게 변화시켰을 때의 실험결과 곡형으로, 연료전지 출력과도특성을 나타낸다. 정상상태 특성과는 다르게 부하가 증가할 때, 전압이 정상상태에 바로 수렴하지 않고 급격하게 감소하였다가 시간이 지남에 따라 정상상태로 회복된다. 이런 과도특성은 연료전지 단위 셀의 구조에 따른 Charge double layer현상과 BOP 시스템의 개질기, 가습기, 연료 및 공기 공급 모듈 등에서 생기는 물리적 지연으로 설명할 수 있다.

부하가 증가하면 더 많은 전류를 필요로 하게 되고, 더 많은 전류가 흐르기 위해서는 더 높은 농도의 기체밀도가 필요하게 된다. 만약 부하의 증가가 충분한 시간을 갖고 이루어지거나 기체 공급 속도가 빨라서 부하의 증가에 따라 함께 증가한 기체 수요량을 충분히 공급할 수 있으면 동특성 현상은 일어나지 않거나 미미하다. 하지만, 부하가 단 시간 내에 증가되거나 기체의 공급 속도가 느리다면 전류의 생성량이 부하 증가량에 따라가지 못하고 전압이 급격히 감소하는 현상이 일어난다. 기체의 공급 속도가 느려지는 주요 이유로 BOP 시스템의 기체 공급 시스템인 블로워, 밸브, 펌프 등의 장치들에서 기체 흐름에 대한 마찰에 의해서 물리적 지연이 생겨 기체의 공급 속도를 지연시키는 것을 들 수 있다 [9].

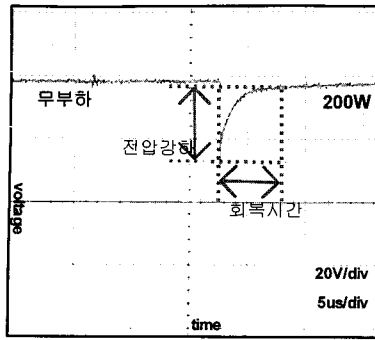


그림 3 부하의 스텝변화에 따른 1.2kW Nexa PEMFC 출력 전압 동특성 (0W → 200W)

Fig. 3 Voltage dynamic characteristic of 1.2kW Nexa PEMFC according to step change of load (0W → 200W)

시간이 지나면 전압이 정상상태로 수렴하면서 지수함수 형태의 파형이 나타나는 이유는 Charge Double Layer 현상으로 설명할 수 있다. Charge Double Layer 현상이란 반응이 일어날 수 있는 최소한의 기체 밀도를 모으는 과정에서 전해질 막 양 면에 수소이온과 전자가 모이게 되어 전위차가 발생하는 현상을 말한다. 그리고 이때 발생하는 전압을 Activation Overvoltage라고 한다. 필요한 전류가 증가하면 더 많은 전자를 필요로 하게 됨으로 더 많은 전자가 전해질 막에 모이게 되고 Activation Overvoltage의 크기는 더 커진다. 이 현상은 전자와 에너지를 저장하는 것과 같은 상태가 되므로 이를 그림 4(a)와 같이 커패시터로 표현할 수 있고, 식 (10)과 같이 표현할 수 있다. 이 모델에서 오믹 저항 (R_r)과 활성화저항 (R_a)을 고려하여 등가회로로 표현하면 그림 4(b), 식 (11)과 같다.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (10)$$

$$y = k(1 - e^{-t/\tau}) \quad (11)$$

여기서, ϵ 은 유전율, A 는 면적, d 는 전해질의 두께, τ 는 시상수로 $\tau=RC$ 이다.

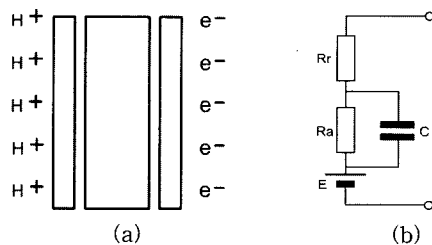


그림 4 Charge double layer (a) 등가모델 (b) 등가회로
Fig. 4 Charge double layer (a) Equivalent model (b) Equivalent circuit

동특성은 연료전지의 종류, BOP 특성 및 물리적 조건 (기체공급시스템의 기능, 길이, 폭 등), 개질형 또는 수소직입형 등 연료공급 방법 및 부하변화량 등에 따라 일정한 규칙 없이 전압강하의 크기나 회복시간이 달라진다. 그러므로

모델링의 대상이 되는 연료전지의 출력특성을 표현하기 위해서는 실험을 통해 얻은 정보로 파라미터를 조정할 수 있도록 하는 것이 가장 합리적이다. 따라서 식 (11)을 바탕으로 하여 가변 파라미터를 포함하는 동특성 시뮬레이션 모델을 구성하면 그림 5와 같다.

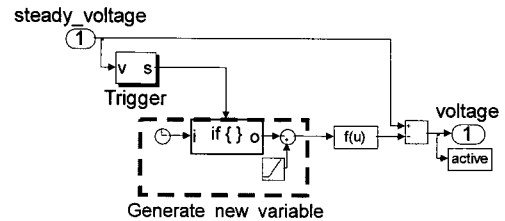


그림 5 연료전지 동특성 구현을 위한 변수튜닝 모듈
Fig. 5 Variable tuning module for fuel cell dynamic model

동특성 모델을 구현할 때 추가적인 프로그램 없이 부하를 증가하는 시점을 센싱하여 그 시점에서 동특성을 부가할 수도 있다. 하지만 이렇게 구현할 경우 동특성이 부가되는 시점의 변수가 시뮬레이션 시간에 따라 증가하므로 부하가 여러 번 변화할 경우 문제가 발생한다. 예를 들어 부하가 시간 t_1 에서 증가하고 t_2 시간이 지난 후 다시 증가 할 경우, 동특성을 구현하는 변수가 첫번째 부하 증가 시점에서는 t_1 값부터 선형적으로 증가하고, t_2 시간 후의 부하 증가 시점에서는 $t_1 + t_2$ 값부터 증가한다. 그러므로 그림 6(a)와 같이 전압 강하량이 부하의 변화량보다는 전체 시뮬레이션 시간에 대한 부하 증가시점에 의해 계산됨으로써 동특성을 독립적으로 제어할 수 없게 된다.

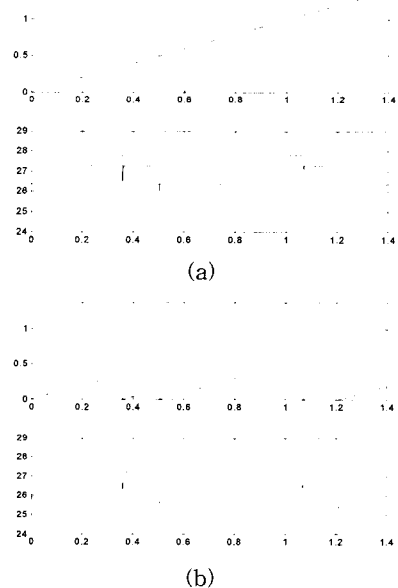


그림 6 변수에 따른 시뮬레이션 파형 결과 (a) 'ramp 함수'를 이용한 동특성 파형 (b) 제안된 변수를 이용한 동특성 파형

Fig. 6 Simulation results by using variable (a) Simulation results by using 'ramp function' (b) Simulation results by using proposed variable

이러한 문제를 해결하기 위해 시뮬레이션 시간의 영향을 받지 않는 변수를 생성하였다. 부하의 변화를 센싱하여 부하가 증가하는 경우 pulse 신호를 발생시키고 이 신호를 트리거로 사용하여 신호가 1이 될 때 변수가 0으로 초기화 되고 다음 신호가 1이 될 때 까지 즉, 부하가 다시 증가하기 전까지는 선형적으로 증가하도록 하는 프로그램을 구성하였다. 이 변수를 이용하여 동특성 모델을 표현하면 그림 6(b)에서 볼 수 있는 것처럼 부하가 감소할 때마다 전압강하량과 회복 시간을 독립적으로 조절할 수 있는 시뮬레이션 모델의 구현이 가능하다. 개발된 과도특성 시뮬레이션 모델에 연료전지의 부하를 증가시키는 실험을 통해 얻은 파라미터를 적용하였고, 실험에 사용한 연료전지의 사양은 표 1과 같다.

표 1 1.2kW Nexa PEMFC 사양

Table 1 Specification of 1.2kW Nexa PEMFC

연료전지	용량	전류	전압
Ballard Nexa PEMFC	1.2kW	46A	22V-50V

3. 시뮬레이션 및 실험결과

전기화학반응식으로 모델링한 결과를 MATLAB Simulink를 이용하여 동특성 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 제안된 PEMFC 동특성 시뮬레이션 모델의 타당성 검증에 위하여 연료전지의 성능지표에 따른 다양한 시뮬레이션을 수행하였으며, 실험은 다음과 같은 과정에 의해 수행되었다. 연료전지와 부하를 Magnet Connector (MC)를 이용하여 연결하고 MC가 꺼진 상태에서 연료전지를 가동하여 무부하 전압을 측정 한 후, MC를 이용하여 부하를 짧은 시간 내에 인가함으로써 과도현상을 발생시켜 전압강하의 크기와 회복 시간을 측정하였다. 이러한 방법으로 무부하에서 100W, 200W, 300W로 스텝 부하를 인가하면서 실험하였고, 측정 결과는 표 2와 같다.

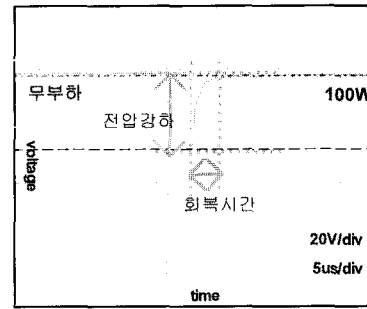
표 2에서 부하용량이 증가함에 따라 전압강하는 작아지고 회복시간은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 전압 강하량과 회복시간의 측정결과를 분석하여 파라미터를 추출하여 개발된 연료전지 모델에 대입하였다. 동특성의 형태를 확인하기 위해 결과파형 중에서 부하가 급격하게 변하는 부분을 중심으로 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였으며 파형은 그림 7-9와 같다.

표 2 부하변화에 따른 출력전압의 전압강하크기와 시상수 측정 결과

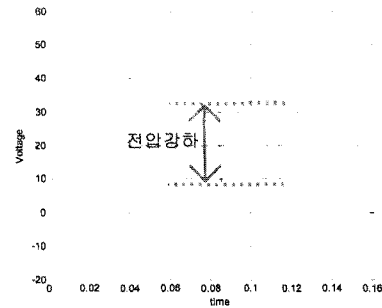
Table 2 Measuring results of voltage deep and time constant considering variation of load

전력	무부대전압	부대전압	부하	전압강하	시상수
100W	38.2V	33.3V	9.6Ω	26.6V	4.4us
200W	37.9V	31.6V	5.6Ω	24.2V	7.0us
300W	38.8V	29.1V	2.6Ω	22.2V	10.0us

그림 7(a)는 무부하에서 100W로 부하를 급격하게 인가시켰을 때의 실험파형이고 추출한 파라미터를 대입한 시뮬레이션 결과는 그림 7(b)에 나타내었다.



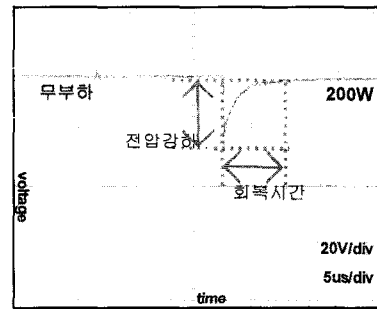
(a)



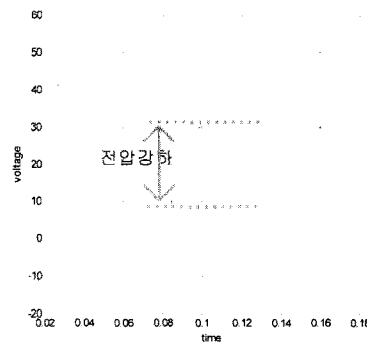
(b)

그림 7 PEMFC 출력전압 동특성(0W → 100W) (a) 실험결과 (b) 시뮬레이션 결과

Fig. 7 Voltage dynamic characteristic of PEMFC(0W → 100W) (a) Experimental result (b) Simulation result



(a)



(b)

그림 8 PEMFC 출력전압 동특성(0W → 200W) (a) 실험결과 (b) 시뮬레이션 결과

Fig. 8 Voltage dynamic characteristic of PEMFC(0W → 200W) (a) Experimental result (b) Simulation result

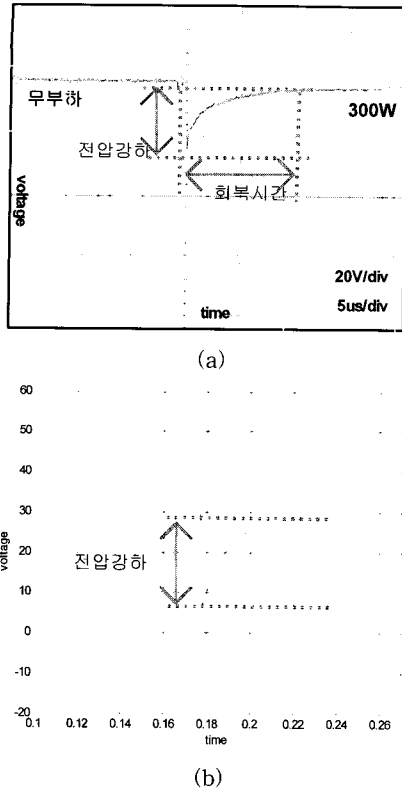


그림 9 PEMFC 출력전압 동특성(0W → 300W) (a)실험결과 (b) 시뮬레이션 결과
 Fig. 9 Voltage dynamic characteristic of PEMFC(0W → 300W) (a) Experimental result (b) Simulation result

이 결과들을 통해 시뮬레이션 결과 파형은 실험결과의 파형과 동일한 형태의 전압강하와 회복시간을 보임을 확인할 수 있다. 그림 8, 9는 각각 무부하에서 200W, 300W로 부하를 인가시켰을 때의 실험결과와 시뮬레이션 결과이다.

실험에 사용된 1.2 kW PEMFC는 수소직입형으로 회복시간이 매우 빠르므로 일반적인 DC/DC 컨버터의 입력 커패시터로도 충분히 보상이 가능하여 PCS의 설계에 유효한 영향을 미치지 않는다. 하지만 수소 공급 방법이 수소 직입형이 아닌 연료 개질기형인 연료전지를 사용할 경우 필요한 양의 연료를 개질하는데 걸리는 시간에 의해 회복시간이 길어진다. 그리고 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)나 고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 등의 고온형 연료전지를 사용한 경우에도 회복시간이 길어지게 된다. 한 예로 250kW MCFC의 경우 전압강하 후 정상상태까지 회복시간은 500W당 1분 정도로 매우 크다. 이 경우 PCS의 입력 커패시터로는 전압강하량을 보상할 수 없으므로 PCS에 미치는 동특성의 영향을 무시할 수 없다. 본 논문에서 제안된 모델은 PCS나 BOP의 최적 설계를 위한 시뮬레이션 전원으로 사용하기 위해 구현한 것이므로 연료전지 시스템에 영향을 미칠 수 있는 범위의 전압강하와 회복시간의 경향과 형태를 표현하는 기능적인 면에 중점을 두었다. 그림 7-9의 시뮬레이션은 이러한 목적에 상응하는 연료전지 출력전압의 과도특성을 표현하고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 연료전지의 전압강하와 회복시간을 중심으로 과도응답 특성을 해석하고 새로운 변수를 생성하여 부하 변화에 따라 독립적으로 파라미터 조정이 가능한 과도특성 모델을 개발하였다. 실험결과를 분석하여 파라미터를 추출하고 개발된 모델에 적용하여 과도특성 모델을 구성하였고 전기화학방정식에 의해 구현된 정특성 모델과 결합하여 연료전지 모델을 완성하였다. 실험파형과 제안된 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하여 연료전지 과도특성의 전압강하와 회복시간의 경향을 반영함을 확인하여 모델의 타당성을 검증하였다. 제안된 모델은 PCS 최적설계 시 연료전지 동특성이 PCS의 소자의 정격, 제어기 및 보상의 PI값 또는 duty ratio, 커패시터 용량, 수명 등에 미치는 영향을 예상해볼 수 있는 시뮬레이션의 모의 전원으로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Garnier, M. Pera, D. Hissell, F. Harel, D. candusso, N. glandut, J. Diard, A. D. Bernardinis, J. Kauffmann, G. Coquery, "Dynamic PEM Fuel Cell Modeling for automotive application," *Vehicular Technology Conference*, vol. 5, pp. 3284-3288, 2003
- [2] W. Friede, S. Rael, B. Davat, J. Clerk Maxwell, "Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell," *JIEEE 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," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, pp. 970-977, 2004.
- [4] 김서영, 이대영, "PEM 연료전지의 운전장치 (BOP)," *설비저널*, 제34권, 제11호, 2005
- [5] 이용복, "연료전지 BOP : 공기공급시스템," *설비저널*, 제34권, 제11호, 2005
- [6] 민경덕, 김한상, 강상규, 하태훈, 김보경, "연료전지 운전 장치 개발 현황 및 소개," *유체기계저널*, 제9권, 제2호, 2006
- [7] James Larminie, Andrew Dicks, "Fuel Cell Systems Explained," 2nd ed., Wiley, 2003
- [8] G. Y. Choe, J. S. Kim, H. S. Kang, B. K. Lee, W. Y. Lee, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Medeling for High Efficiency Fuel Cell Balance of Plant (BOP)," *International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS)*, pp. 271-276, October, 2007
- [9] G. Bucci, F. Ciancetta E. Fiorucci, "An automatic test system for the dynamic Characterization of PEM fuel cells," *International Multimedia Telecommunication Consortium (IMTC)*, 2004

저 자 소 개



고 정 민 (高廷旻)

1983년 8월 8일생. 2008년 성균관대학교 전자전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 석사과정.

Tel : 031-299-4638

E-mail : infireat@hanmail.net



김 종 수 (金鍾秀)

1975년 3월 5일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정. 2000년 2월-2004년 7월 SEMIKRON Solution Centre Asia Application Engineer.

Tel : 031-299-4638

E-mail : sniper75@skku.edu



최 규 영 (崔奎英)

1980년 4월 11일생. 2006년 건양대학교 정보제어공학과 졸업. 2008년 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정.

Tel : 031-299-4638

E-mail : lovesagaji@skku.edu



강 현 수 (康鉉受)

1971년 9월 23일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1996년 3월-1999년 11월 LG 산전 중앙연구소 주임 연구원. 2000년 11월-현재 (주)에이디티 책임연구원. 2006년 8월-현재 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정.

Tel : 031-299-4638

E-mail : ceny71@skku.edu



이 병 국 (李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2001년 Texas A&M University 전기공학과 졸업 (공학). 2002년 1월-2003년 1월 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년 4월-2005년 9월 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자그룹 선임연구원(팀장). 2006년 3월-현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수, ICEMS2007 및 Intelec2009 General Secretary, IEEE Senior Member. 현재 당 학회 영문지 Editor, 학술 및 편집위원, B부문 편집 부위원장.

Tel : 031-299-4581

Fax : 031-299-4639

E-mail : bkleeskku@skku.edu