

과도 응답 특성을 고려한 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 모델링

장예지*, 김나영*, 한경희*, 백수현*
 동국대 전기공학과*

Proton exchange membrane fuel cell stack modeling considering dynamic response characteristics

Y.J. Jang*, N.Y. Kim*, K.H. Han*, S.H. Baek*
 Dongguk University
 Electric Dept*.

Abstract - 본 논문에서는 과도 응답 특성에 따른 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)를 모델링하였다. 연료전지에 이러한 과도특성이 일어나는 것에 원인에 대하여 분석해보고, 실제 실험을 통해 과도특성이 일어나는 것을 확인하였다. 실험결과 파형을 분석하여 Matlab & Simulink를 이용하여 PEMFC의 과도 응답 특성을 모델링하였다.

의 이론값은 1.21V이다.

$$E_{OC} = N(E_n - A \ln(i_o)) \quad (1)$$

깁스 자유에너지는 반응물질의 압력과 농도에 따라 변화하며, 반응물질과 생성물질의 활성도에 따라 반응시의 깁스 자유에너지의 변화량이 달라진다. 이를 기본으로 네른스트(Nernst) 식을 유도할 수 있으며, 식 (2)는 네른스트 전압을 나타낸다.

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

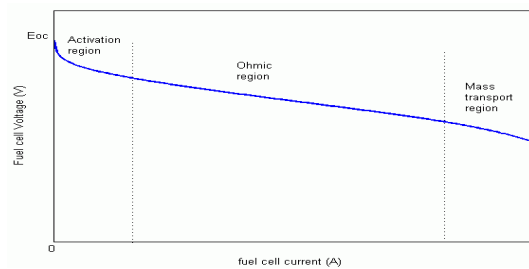
1. 서 론

연료전지 시스템은 연료전지 스택(stack), PCS, 그리고 BOP(balance-of-plant)로 구성되어 있다. 연료전지 스택은 수소가 전기화학적으로 산소와 반응하여 전기와 물, 그리고 폐열을 만들어내고, PCS는 출력전력을 사용자가 원하는 크기와 주파수를 가진 전력으로 변환한 후 부하와 BOP에 공급하는 역할을 한다. BOP는 연료전지의 연료인 수소와 산소를 공급하고, 연료전지 스택이 효율적으로 운전하도록 최적의 상태를 유지해주는 시스템으로 4개의 하위 시스템으로 구성되어 있다. 연료 공급 시스템은 수소 저장을 위해 탱크(Hydrogen Tank)로 구성하는 반면, 산소는 기체의 압력을 조절해주기 위한 압축기(Compressor)로 공급된다. 수소와 산소는 셀에 적절한 습도 유지를 위해 가습장치(Humidifier)를 통해 공급된다. 연료전지 스택에서 발생된 열은 냉열회로에 의해 냉각되고, 이 냉열회로는 열교환기, 펌프, 컨덴서, 저장탱크를 포함한다. 이러한 연료전지 시스템의 효과적인 설계를 위해서는 연료전지의 출력 특성에 대한 이해가 필수적이다. 연료전지 출력은 정특성뿐만 아니라 부하가 순간적으로 증가할 때 발생하는 전압의 급격한 강하현상인 과도특성도 나타낸다.

연료전지의 출력전압은 일반적으로 이론값보다 작다. 이는 연료전지 시스템에서 발생하는 손실에 의한 것으로 첫째로 화학반응이 늦어지며 생기는 활성화손실과 둘째로 연료가 이온화되지 않은 채 전해질을 통과해버림으로써 발생하는 연료교차나 내부 전류에 의한 손실, 셋째로 이온의 흐름에 대한 저항과 전자의 흐름에 대한 직접적인 저항으로 발생하는 저항손실, 넷째로 화학반응에 의해 연료가 소비될 때 전극표면에서 반응물질의 농도가 변화하기 때문에 발생하는 물질수송손실이 있다. 식 (3)은 이러한 손실을 포함한 연료전지의 동작전압을 나타낸 식이다.

$$V = E - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{act} - \Delta V_{conc}$$

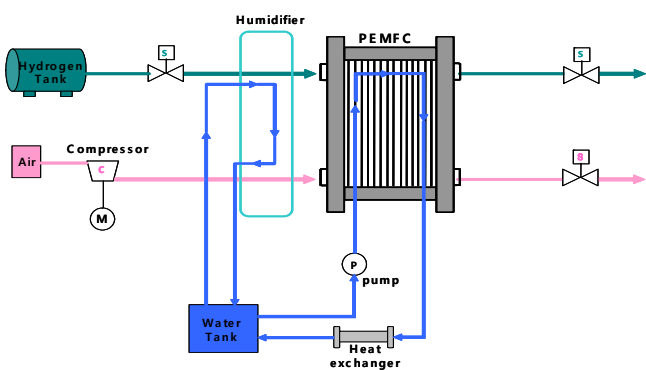
$$V = E - i r - A \ln\left(\frac{i + i_o}{i_o}\right) - m \exp(ni) \quad (3)$$



<그림2> PEM fuel cell V-I 특성곡선

<그림 2>는 PEM fuel cell의 V-I 특성곡선을 나타내며, 각 구간마다 발생하는 손실에 의해 점점 전압이 감소함을 볼 수 있다. 또 고전류로 갈수록 연료전지 전압이 급감하는 것을 볼 수 있다.

본 논문은 상온 동작이 가능하고, 출력 밀도가 높으며, 부하변화에 빠른 응답특성을 가지는 PEMFC를 사용하였으며, 실험을 통하여 급격한 부하변동에 따른 연료전지의 출력 특성을 살펴보고, 이에 대한 연구를 Matlab & Simulink를 이용하여 구현하였다. <그림 1>은 간략화 된 PEM fuel cell 시스템이다.



<그림 1> PEM fuel cell 시스템

2. 본 론

2.1 Characteristic of PEM fuel cell

연료전지의 특성은 깁스(Gibbs) 자유에너지로 표현된다. 이 깁스 자유에너지를 통해 연료전지의 무 손실 전압 값을 알 수 있으며, 이를 개회로전압(OCV, Open Circuit Voltage)이라 한다. 아래 식 (1)은 개회로전압 식을 나타내며, PEMFC의 개회로전압

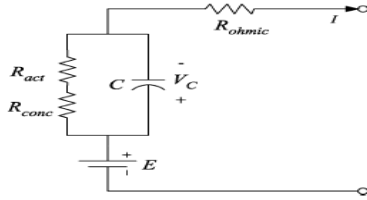
2.2 Dynamic response characteristics

연료전지 발전 시스템에서 발전량을 증가시키면 수소와 산소가 많이 주입되어야 한다. 그러나 Fuel Consumption은 부하변동에 따른 Air Flow의 Step 변화와는 달리 그 증가율은 서서히 변화가 생기게 되고, 앞서 설명한 손실과는 또 다른 손실을 발생하게 된다. 이러한 손실로 인하여 부하가 순간적으로 증가할 때 전압은 일시적으로 급격한 강하현상이 발생하게 된다.

2.2.1 Double-layer charging effect

전하이중층(Double-layer charging effect)은 부분적으로 확산효과에 의해, 또 전극의 전자와 전해질의 이온과의 사이의 반응과 전압인가로

인해 전하이중층이 형성된다. 전자는 전극의 표면에 모이고 H^+ 이온은 전해질 표면으로 끌여당겨진다. 이 전자와 이온은 공기극에 공급되는 산소와 함께 공기극의 반응에 참가한다. 그러나 전극 및 전해질의 경계면에 전자나 H^+ 이온과 같은 전하가 축적되면 전압이 발생한다. 전류가 커지면 더 많은 전하가 필요하게 되므로 과전압이 커진다. <그림 3>은 Double-layer charging effect 등가회로를 나타낸 그림이다. 전극-전해질의 경계면 상 또는 그 부근의 전하층은 전기적 에너지 저장장치와 같은 효과로 동작하고, 캐패시터로 표현한다.



<그림 3> Double-layer charging effect 등가회로

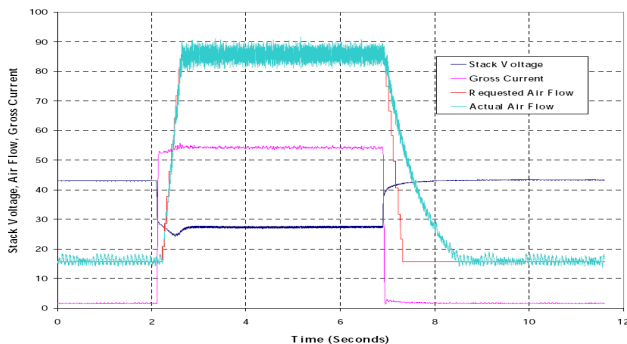
2.3 Simulation and Analysis

시뮬레이션 모델링에서 사용된 Software는 Matlab&Simulink이며, 시뮬레이션에 적용된 시스템 사양은 <표 1>과 같다.

Nominal Output Voltage	24V
Output Voltage Range	22V-30V
Accuracy of Output Voltage	2%
Nominal Output Current	50A
Maximum Output Current	55A
Maximum Output Power	1200W
Maximum Output Current Ripple	2%
Maximum Input Voltage	50V
Operating Input Voltage	26VDC-48VDC
Power consumption standby	2W
Ambient temperature	0~40°C
Efficiency	96%(24V)
Thermal Protection	Internal 80°C

<표 1> Specification of PEM Fuel Cell Power Transformation System DC-DC Buck Converter

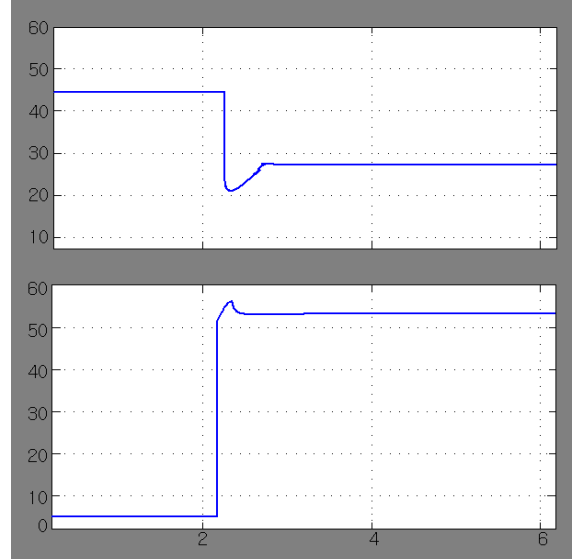
PEM Fuel Cell의 내부는 연료전지 스택의 등가회로를 기본으로 설계하였다. 연료전지에 DC-DC 컨버터를 연결하여 제조사로부터 제공받은 스택 테스트 시트의 스펙과 실제 실험에서 사용하였던 조건을 사용하여 시뮬레이션을 하였다.



<그림 4> PEM Fuel Cell 과도 응답 특성

위의 <그림 4>는 Nexa 스택을 이용한 PEM Fuel Cell 전력변환 시스템의 과도 응답 특성을 나타낸다. 이 그래프는 무부하에서 Full 부하로 운전시의 Step change 에 따른 시스템의 응답이다. 연료전지 스택은 부하 Step change를 유지하기 위하여 전류를 즉각적으로 공급한다. 필요한 수소량은 조절장치가 자동적으로 공급하고, 공급된 연료의 압력은 일정하게 유지된다. <그림 4>는 출력전압,

스택전류 그리고 부하에 Step change를 수반하는 Air Flow의 변화를 나타낸다. 정지 상태에서 산소의 Air Flow rate는 약 16 slpm에서 요구하는 값에 근접하여 추정한다. 부하전류 54A에 이른 후에 Air Flow의 비율은 85 slpm까지 급격히 증가한다. 이때 출력 전압이 정상상태가 되기 짧은 순간에 Undershoot(0.5초 미만, 2.5초 미만)인 과도특성이 발생한다. 또한 Air Compressor로부터 증가한 기생전력 유입으로 인해, 이 과도상태안의 Stack 전류가 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다.



<그림5> 시뮬레이션 출력 전압/전류

<그림 5>는 앞에서 설명한 식을 바탕으로 시뮬레이션 된 연료전지 스택의 과도 응답 특성을 나타낸다. <그림 4>와 <그림 5>로부터 실험에 사용된 스펙을 시뮬레이션에 적용하고 실험 데이터와 비교한 결과 전류에서 약간의 불일치가 있지만 전압은 어느 정도 일치함을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 갑작스런 부하 변동으로 발생하는 PEM fuel cell의 과도응답특성이 발생하는 원인을 파악하고, 그에 대한 실험을 바탕으로 고분자 전해질 연료전지의 과도응답특성에 대하여 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과 이상적인 조건을 가정하고, 시뮬레이션 하여 전류에 약간의 불일치가 발생하였으나 전압은 유사하게 시뮬레이션 된을 확인하였다.

향후, 불일치가 발생한 전류에 대하여 좀 더 정확한 시뮬레이션 보완과 함께 연료전지 과도특성 개선을 위한 Boost 컨버터 제어기 연구가 수반되어야 할 것으로 보여진다.

[참 고 문 헌]

- [1] 백수현, 김희준, 김영석, 홍순찬, "전력전자공학", p355~362, 1996
- [2] K. P. Adzakpa, K. Agbossou, "PEM Fuel Cells Modeling and Analysis Through Current and Voltage Transient Behaviors", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.23, NO.2, JUNE, 2008.
- [3] A. J. Forsyth, S. V. Molloy, "Modeling and control of DC-DC converters," Power Engineering Journal, vol. 12, Issue 5, pp. 229-236, Oct. 1998.
- [4] Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir, "Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel cell Using Electrical Circuits", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.20, NO.2, JUNE, 2005.
- [5] J. B. Jia, Y. Wang, Y. T. Cham, Frank Lewis, "The Electrical Dynamic Response Study of PEMFC as a Backup Power Study", IEEE International Conference on Control and Automation Guangzhou, pp1156-1161, JUNE 1, 2007.