

연료전지 동특성 모델링 비교 분석

고정민, 김종수, 최규영, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Comparative study of fuel cell dynamic modeling

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

Abstract - 본 논문에서는 Charge double layer 현상과 전압강하/회복 현상을 구현한 연료전지의 동특성 모델링을 수행하고 실험결과와 비교 분석하였다. Charge double layer 현상의 이론을 분석하고 수식을 통해 구현한 모델링과 물리적 지연 현상을 실험을 통해 확인하여 특성을 전압강하와 회복현상을 표현하는 모델링을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션 결과를 각각 실험결과와 비교 분석하여 실제 연료전지를 구현할 때에는 제안한 모델에서의 전압강하와 회복현상을 고려해야 함을 검증하였다.

1. 서 론

최근 몇 년간 친환경에너지에 대한 관심이 높아지면서 연료전지에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 연료전지는 효율이 높고 친환경적인 에너지원이며 그 중에서도 고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 저온 (100°C이하)에서 동작이 가능하고 출력밀도가 높으며 반응성이 빠르고 시동시간이 짧은 장점을 가지고 있으므로 자동차나 휴대기기용 전원으로 적용하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 연료전지는 화학적인 반응으로 일반적인 직류 전원과 달리 비선형 출력 특성을 나타낸다. 화학에너지를 별도의 중간 과정 없이 바로 전기에너지로 변환하기 때문에 집스의 자유 에너지를 이용하여 출력전력을 전기화학방정식으로 나타낼 수 있고, 수학적으로 모델링할 수 있다 [1]. 연료전지에는 비선형 특성 외에도 charge double layer 현상에 의한 동특성을 갖는다. 이러한 현상은 연료전지용 PCS와 시스템에 영향을 주기 때문에 연료전지를 효과적으로 이용하기 위해서는 동특성을 고려하여 설계해야 한다. 그러므로 동특성을 구현하기 위한 모델링이 수행되었다. Charge double layer 현상은 연료전지 스택내의 전해질에서 발생하며 개념을 이해하고 등가회로를 구성하여 전기적인 식을 유도함으로써 구현할 수 있다 [2]. 연료전지를 구동하기 위해서는 연료인 수소와 산소를 공급하고 연료전지 스택이 효율적으로 운전하도록 최적의 상태를 유지하는 연료전지 시스템이 필요하다. 시스템은 압축기나 블로워, 가습기 등의 기계적 요소들로 구성되어 있다. 물리적인 장치에서 기체의 공급 속도는 연료전지 스택의 전기 화학적 반응에 따라가지 못하여 충분한 수소와 산소를 제공해 주지 못함으로써 출력 전압의 강하와 회복시간이라는 동특성이 나타난다. 물리적인 지연도 동특성의 요인으로 설계에 중요한 고려사항이므로 이에 대한 이해와 분석이 필수적이다.

본 논문에서는 위에서 언급한 동특성 모델링을 비교 분석하기 위해 charge double layer 현상을 등가모델을 통해 이해한 후 전기화학방정식을 이용하여 모델링을 수행하고 실험을 통해 물리적인 지연 현상을 확인하고 이를 고려한 연료전지 시스템 모델링을 구현하였다. 각 동특성 모델을 PSIM으로 구현한 부하를 연동시켜 부하의

변화에 따른 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다. 그리고 1.2kW Ballard NEXA PEMFC를 이용한 실험결과와 비교하여 모델링의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 Charge double layer 모델링

Charge double layer 현상은 연료전지 내의 전해질 막에서 전자와 기체의 정체에 의해 발생한다. 연료전지에서 전력을 발생하기 위해 필요한 최소한의 기체 밀도와 압력을 모으는 과정에서 전해질 양극에 전자와 수소이온, 산소분자가 머물러 있게 되고 그 결과로 전압이 전해질에 인가되어 연료전지출력의 동특성으로 나타난다. Charge double layer에 의한 전력 손실량은 부하가 클수록 커진다. 부하가 커지면 더 많은 전류를 필요로 하게 되고 더 많은 반응 가능한 최소 기체량이 필요하게 되므로 전해질 막 양단에 걸리는 전압은 커지게 된다. Charge double layer는 전하를 전해질 양극에 저장하는 것으로 간주할 수 있으므로 1(a)의 모델처럼 커패시터와 같이 생각할 수 있다. 그리고 커패시터에 활성화분극 저항과 농도분극 저항을 고려하면 1(b)와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다. 모델링에서 사용한 파라미터와 그 값은 표 1에 나타내었다.

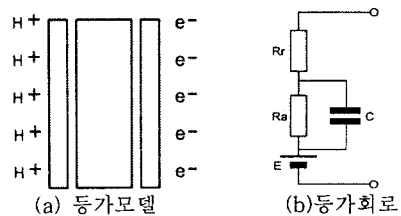


그림 1. Charge double layer

연료전지의 출력전압 E_{Nernst} 은 각 반응물의 분압을 고려하여 네른스트 공식으로 식(1)과 같이 계산할 수 있고 1.229V이다. 하지만 실제 출력 전압은 각 분극 현상에 의한 손실성분을 고려해야 한다. 저항분극 V_{ohmic} 은 반응과정에서 전극과 전해질 사이, 전극과 분리판 사이 등에서 발생하는 저항 성분을 고려하여 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{Nernst} = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \quad (1)$$

$$V_{ohmic} = iR_T \quad (2)$$

여기서, E° 는 표준 압력 상태에서의 평형전압, i 는 연료전지 전류 (mA/cm²)이다.

표 1 모델링에 사용된 파라미터

변수 (단위)	값
R 기체 상수 (J/mol K)	8.1344
T 온도 (K : Kelvin)	353.15
F 패러데이 상수 (C/mol)	96486.7
P_{H_2O} 물의 압력 (atm)	1
P_{O_2} 산소 분압 (atm)	1
R_T 반응 과정에서 생기는 모든 저항 성분 (Ω)	0.1
C Charge double layer 커패시턴스 (F)	0.6

Charge double layer는 1(b)의 등가 회로를 이용하여 표현할 수 있다. 커패시터와 병렬로 연결된 저항 R_a 는 식 (3)과 같이 활성화분극 저항과 농도분극 저항의 합과 같고 직렬저항은 저항분극 저항으로 나타난다. Charge double layer에 의한 손실 전압 v_c 와 시상수 τ 는 (4), (5)와 같다. 연료전지의 실제 출력 전압은 손실성분을 고려하여 E_{Nernst} 에서 저항 분극현상과 Charge double layer에 의한 손실을 고려하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. (1)-(6)을 통해 정상상태 모델과 동특성 모델이 Matlab Simulink에서 그림 2와 같이 구현되었다.

$$R_a = R_{act} + R_{con} \quad (3)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{v_c}{\tau} \quad (4)$$

$$\tau = CR_a = \frac{C(V_{act} + V_{con})}{i} \quad (5)$$

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{ohmic} - v_c \quad (6)$$

여기서, R_{con} 은 활성화 분극 저항, R_{act} 는 농도분극저항, τ 는 시상수, V_{act} 는 활성화 분극, V_{con} 는 농도분극을 나타낸다.

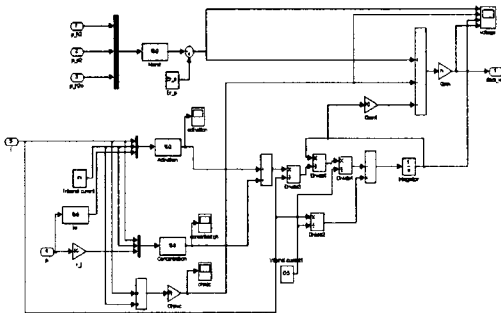


그림 2. Charge double layer 연료전지 모델

그림 2의 모델은 Simcoupler block을 이용하여 PSIM과 연동하여 시뮬레이션을 수행하였고 PSIM의 저항 부하는 160 Ω 에서 0.1초 후에 80 Ω 이 되고 다시 0.1초 간격으로 40 Ω , 80 Ω , 160 Ω 으로 가변되도록 하였다. 저항이 80 Ω 으로 감소하였을 때 전압은 47.51V에서 47.37V로 급격히 떨어졌다가 47.17V로 수렴하고, 40 Ω 에서 47.87V로 감소하였다가 시간이 지나면서 36.65V로 수렴한다. 0.3초에서 저항부하가 80 Ω 으로 증가하면 전압은 46.46V에서 46.89V

로 증가한 후 47.18V로 수렴하고 0.4초에서는 47.18V로 증가한 후 47.51V로 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉, 부하의 감소와 증가에 따른 전압의 파형의 RC 시상수에 따른 지수함수의 형태를 나타내고 있다. 그리고 전압의 변화는 전류의 변화보다 0.006초 정도 뒤져서 나타나는 것을 확인할 수 있다.

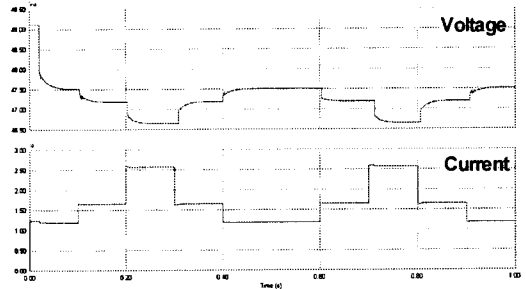


그림 3. Charge double layer모델링의 시뮬레이션 결과

2.2 전압강하 및 회복 현상 [3]

물리적 지연 현상도 연료전지의 동특성의 요인 중 하나이다. 연료전지가 동작하기 위해서는 그림 4와 같이 LNG, LPG, 메탄올, 가솔린 등의 연료로부터 수소를 개질하는 개질기나 스택에 기체를 공급해주는 블로워, 기체의 압력을 조절해주기 위한 공기압축기와 유체 제어기, 기체에 적절한 수분을 제공하는 가습기 등의 연료전지 시스템이 필요하다 [4], [5]. 연료전지의 동특성은 이와 같은 시스템의 물리적 구조에 의해 발생하게 된다.

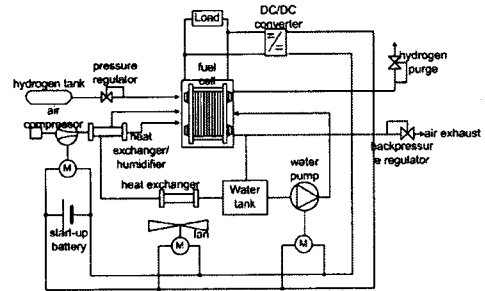


그림 4. 전체 연료전지 시스템

시스템의 동특성은 Charge double layer와 마찬가지로 부하의 급격한 변화가 있을 때 생기지만 스택 내부의 전기화학적 지연 현상이 아닌 시스템의 밸브, 펌프 등과 기체의 흐름 사이에서 발생하는 물리적인 마찰에 의한 지연현상으로 생긴다 [6]. 부하가 증가할 때, 필요한 기체를 신속하게 공급하지 못하여 전압이 수직적으로 감소하였다가 시간이 지나면서 정상상태로 수렴하는 형태를 보인다 [7], [8]. 물리적 지연의 현상은 시스템의 기계적인 상태나 시스템의 구조, 모양 등에 따라 변화하여 수치적으로 정량화 할 수 없으므로 시스템마다 다른 특성을 표현할 수 있도록 전압의 강하 정도나 회복 시간을 변화시킬 수 있도록 해야 한다.

조정 가능한 변수를 포함한 모델링은 그림 5와 같이 구현할 수 있다. 부하가 감소하고 증가할 때 트리거 신호를 발생시켜 부하가 변화하는 시간을 저장하여 그 시점마다 리셋되어 0에서 증가하는 함수가 형성되도록 프로그래밍 하였다. 이 과정은 시뮬레이션 시간과 동특성 계산식의 시간변수를 분리시키기 위해 수행되었다. 모델링의 파라미터는 임의적으로 바꿀 수 있으며, 여기서는 Charge double layer 모델링의 결과와 비교할 수 있도록 같은 시상수를 갖도록 조정하였다.

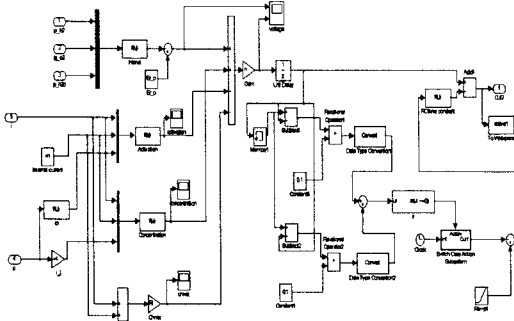


그림 5. 전압강화와 회복시간을 가지는 모델링

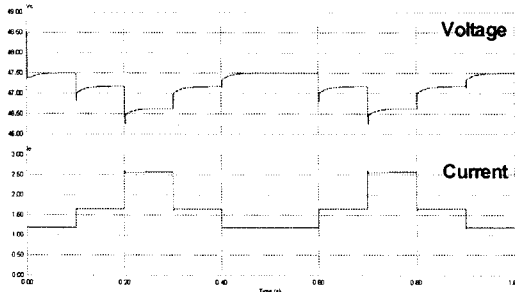


그림 6. 연료전지 시스템 모델의 시뮬레이션 결과

그림 5의 모델도 Simcoupler block을 이용하여 PSIM과 연동시켜 시뮬레이션을 수행하였고 PSIM의 저항 부하 변화도 Charge double layer 모델링과 동일하게 설정하였다. 그림 6은 시뮬레이션 결과로 저항이 80Ω로 감소할 때, 0.1초에서 전압은 47.50V에서 47.00V로 감소하였다가 47.17V로 수렴하고, 0.2초에서 46.50V로 감소한 후, 36.63V로 수렴한다. 그리고 저항이 80Ω로 증가하면 전압은 46.63V에서 47.02V로 증가한 후 47.18V로 수렴하고 0.4초에서는 47.34V로 증가한 후 47.50V로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

2.3 실험결과 및 시뮬레이션 비교

모델링을 검증하기 위한 실험은 1.2kW Ballard NEXA PEMFC를 이용하였다. 무부하 상태에서 MC를 이용하여 부하를 100W, 200W, 300W로 증가시키고 다시 200W, 100W로 감소시키면 전압의 파형은 그림 7과 같이 Charge double layer 시뮬레이션의 결과와 유사한 파형을 보인다.

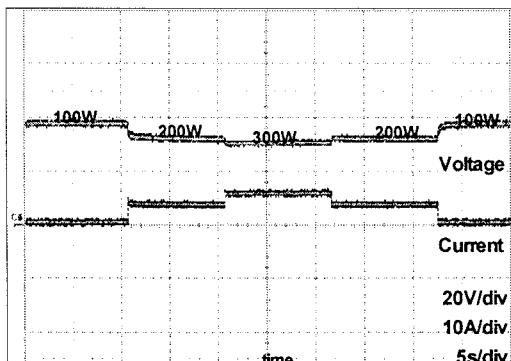


그림 7. Charge double layer 실험결과

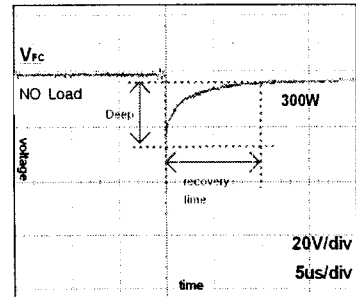


그림 8. 연료전지 시스템 실험결과

그림 8의 파형은 물리적 지연 현상이 두드러지게 나타난 파형으로 연료전지 시스템 모델링의 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 나타낸다. 이 파형은 time scale이 다르기 때문에 그림 7과 다른 형태를 보인다. 이 실험은 1.2kW 수소 직입형 PEMFC로 실험을 하였기 때문에 반응시간이 빠르고 용량이 작아 회복시간이 us 단위로 PCS와 연료전지 시스템의 설계에 큰 영향을 미치지 않지만, 고체 산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)와 같은 반응이 느린 연료전지나 용량이 큰 연료전지의 경우 회복시간이 길고 전압강하 값이 커지므로 PCS와 연료전지 시스템의 설계에 반드시 고려되어야 한다.

3. 결론

본 논문에서는 charge double layer와 물리적인 구조에 의한 연료전지 출력 특성의 비교 분석을 위해 등가 모델과 실험 자료를 바탕으로 두 가지 연료전지 동특성 모델을 구현하였다. 두 모델을 PSIM과 연동시켜 부하의 변화를 인가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 시뮬레이션의 결과와 실험결과의 비교를 통해 연료전지 스택을 포함한 개질기, 블로워, 펌프 등 전체 시스템의 물리적인 특성도 고려해야 함을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] G. Y. Choe, J. S. Kim, H. S. Kang, B. K. Lee and W. Y. Lee, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Modeling for High Efficiency Fuel Cell Balance of Plant (BOP)," International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp 271-276, October, 2007
- [2] J. Jia, Q. Li, Y. Wang, Y. T. Cham and M. Han, "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 283-291, March 2009
- [3] 고정민, 김종수, 최규영, 강현수, 이병국, "부하의 변화를 고려한 연료전지 스택 동특성 모델링," 대한전기학회논문지, vol. 57, no. 9, pp. 1563-1571, 2008
- [4] 김서영, 이대영, "PEM 연료전지의 운전장치 (BOP)," 설비저널, 제34권, 제11호, 2005
- [5] 민경덕, 김한상, 강상규, 하태훈, 김보령, "연료전지 운전 장치 개발 현황 및 소개," 유체기계저널, 제9권, 제2호, 2006
- [6] G. Bucci, F. Ciancetta and E. Fiorucci, "An automatic test system for the dynamic characterization of PEM fuel cells," International Multimedia Telecommunication Consortium (IMTC), 2004
- [7] F. Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T.K. Beso and A. Laperriere, "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack," *Fuel Cells Journal*, vol 1, no. 1, pp. 66-71, 2001
- [8] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulos and J. peng, "Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System," Proc. American Control Conference, pp. 3117-3122, May 2002