

# 연료전지 전원 시스템의 설계 및 분석을 위한 PEMFC의 회로 모델

이수호, 이현우, 권순걸  
경남대학교

## A Circuit Model of PEMFC for Design and Analyze Fuel Cell Power System

S. H. LEE, H. W. LEE, S. K. Kwon  
Kyungnam University

### ABSTRACT

The Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) are being used in a variety of applications including portable power generation, transportation and back-up power systems. In this paper presents a novel circuit model for a PEMFC that can be used to design and analyze fuel-cell power system. The Pspice-based model uses BJTs, L and C elements available in the Pspice library with some modification. The model includes the phenomena like activation polarization, ohmic polarization, and mass transport effect present in a PEM fuel cell. Simulated characteristics of the fuel cell were compared with the experimental results obtained on a commercial fuel cell.

### 1. 서론

연료전지(Fuel Cell)는 연료(수소, 메탄올 등) 및 공기의 화학 에너지를 전기화학적 반응에 의해 전기 및 열로 직접 변환시키는 장치로 기존의 발전기술과는 달리 연소 과정이나 구동 장치가 없으므로 효율이 높을 뿐만 아니라 환경문제를 유발하지 않는 새로운 개념의 발전기술이다. 그중 고분자 전해질형 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cells)는 전해질로 액체가 아닌 고체 고분자 중합체를 사용하여 다른 연료전지와 구별된다. 다른 연료전지에 비해 저온에서 동작되며, 출력 밀도가 높고, 시동시간이 짧은 동시에 부하변화에 대한 응답 특성이 빠르고 부피와 무게도 작동 원리가 같은 인산형 연료전지에 비해 작아서 자동차용 및 휴대용 전원으로서의 활용 가능성이 높다.<sup>[1]</sup> 연료전지를 이용한 전력 변환 장치의 설계 및 분석을 위한 회로 시뮬레이션을 위해 PEMFC의 특성 분석이 우선적으로 요구된다. PEMFC에 대한 대부분의 특성분석은 수학적 방정식에 기초하여 시뮬레이션되어 왔다.<sup>[2-5]</sup>

본 논문에서는 PEMFC를 이용한 전력 변환 장치의 설계 및 분석을 위해 다이오드와 BJT를 이용한 Pspice모델링 회로를 제안하고 제안한 모델링 회로의 V-I 특성곡선을 상용 연료전지인 Ballard사의 Nexa(310-0027) PEMFC의 V-I 특성곡선과 비교하고 또한, 스텝응답 특성을 비교 하여 모델링 회로의 유효성을 입증 하고자 한다.

### 2. PEMFC의 분극 특성

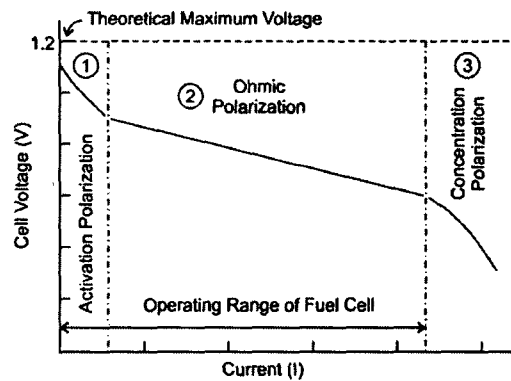


그림 1 이상적인 단일셀 연료전지 전압-전류 특성  
Fig. 1 Ideal Voltage-Current Characteristic of a single Fuel Cell

그림 1은 이상적인 단일셀 연료전지의 전류에 대한 전압 곡선을 나타내고 있다. 연료전지의 성능은 분극 곡선(Polarization Curve) 또는 성능 곡선(Performance Curve)이라고도 하는 전류에 대한 전압 특성 곡선의 분석을 통해서 이루어진다. 전압 변화에 대한 전류밀도의 거동을 조사함으로써 연료전지 시스템의 구성 및 운전조건을 최적화 하기 위한 정보들을 얻을 수 있다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이, 곡선은 일반적으로 활성화 분극 영역, 저항 분극 영역, 농도 분극 영역이라고 하는 세 부분으로 나눌 수 있다. 전류가 증가함에 따라 초기에 전압이 급격히 감소한 후 서서히 감소하다가 전류가 어느 이상으로 커지면 전압이 다시 급격히 감소함을 보여준다. 연료전지에서 전압 손실은 분극, 과전압, 비가역, 전압 강하 또는 과전위라고도 불리는데 주원인으로는 활성화 분극(Activation polarization), 오믹분극(Ohmic polarization), 농도 분극(Concentration polarization)등을 들수 있다.

#### 가. 활성화 분극 (Activation polarization)

활성화 분극은 전극 표면과 전해질이 이루는 계면에서 일어나는 전기화학반응의 비가역성에 기인한다. 전기화학 반응에도 일반 화학 반응처럼 활성화장벽이 존재한다. 따라서 전기화학 반응이 진행되려면, 전극 전위의 일부분은 반응 물질들이 활성화 장벽을 극복하도록 하는데 소비되어야 한다. 이 때의 전위 손실을 활성화 과전압(activation over-voltage)  $V_a$ 라

하며, 다음과 같은 간략화된 타펠식으로 나타낼수 있다.

$$V_a = A \times \ln \frac{i}{i_0} \quad (1)$$

여기서, A는 상수,  
 $i_0$ 는 평형 상태의 전극 표면에서의 교환 전류밀도,  
 $i$ 는 전지에 흐르는 전류밀도,  
 $V_a$ 는 활성화 과전압(activation over-voltage)

활성화 과전압을 줄이려면 연료전지의 작동 온도를 높이고, 전극의 활성면적을 증가시키고, 적절한 전기화학적 촉매를 사용하여 전극의 활성을 높여  $i_0$ 를 크게하여 줄일수 있다.

#### 나. 옴릭 분극 (Ohmic polarization)

옴릭 분극은 연료전지의 전해질 내의 이온의 이동에 대한 저항과 전극을지나는 전자의 흐름에 대한 저항 손실로부터 기인한다. 연료전지의 전기흐름은 전해질 속에서의 이온의 흐름 및 전극과 극판 등에서는 전자의 흐름으로 구성된다. 연료전지의 전기 저항 손실은 전해질과 전지의 구성 재료 및 각 구성부품간의 접촉 저항 등에서 발생한다. 이 모든 저항은 Ohm의 법칙을 따르므로, 저항 과전압(ohmic over-voltage)  $V_\Omega$ 은 다음과 같은 식으로 나타낼수 있다.

$$V_\Omega = iR \quad (2)$$

여기서,  $i$ 는 전지에 흐르는 전류밀도,  
 $R$ 는 전해질의 저항과 전지 구성 재료의 저항,  
 $V_\Omega$ 는 저항 과전압(ohmic over-voltage)

전해질의 두께를 얇게 하고 이온 전도도를 향상시킴으로써 전해질에서 발생하는 옴릭 분극을 감소 시킬수 있다.

#### 다. 농도 분극(Concentration polarization)

농도 분극(Concentration polarization)은 반응 물질들이 전극 표면과 전해질이 형성하는 전기화학 반응 활성 계면으로 전달 될 때의 물질 전달 속도의 한계에서 발생한다. 즉, 농도 과전압(concentration over-voltage)  $V_{con}$ 은 반응물과 생성물이 환산하는 속도가 가장 주요한 원인이 된다. Nernst 식을 이용하면 다음과 같은 식으로 나타낼수 있다.

$$V_{con} = -B \times \ln \left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (3)$$

여기서, B는 상수,  
 $i$ 는 전지에 흐르는 전류밀도,  
 $i_L$ 은 한계전류 밀도,  
 $V_{con}$ 은 농도 과전압

### 3. PEMFC의 회로 모델

그림 2는 제안한 Pspice 연료전지모델링 회로이다. 다이오드는 활성화 분극 영역을 그리고 두 개의 BJT는 농도 분극 영역을 모델링 하기 위하여 사용되었고 옴릭 분극영역은 다이오드의 기생저항으로 모델링 하였다.

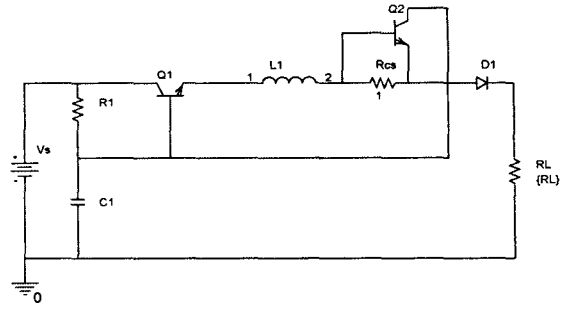


그림 2 제안한 Pspice 연료전지 모델링 회로  
 Fig. 2 Proposed Pspice modeling circuit of PEMFC

활성화 분극을 위해 사용된 다이오드를 살펴보면, p-n 접합으로 이루어진 다이오드는 공핍층에 의해 전위장벽이 존재하게 되며 다이오드에 걸리는 전압은 다음과 같은 식으로 나타낼수 있으며 이는 활성화 과전압 식(1)과 유사함을 알수 있다.

$$V_{diode} = nV_{Th} \times \ln \frac{i_D}{i_S}, \quad V_{Th} = \frac{kT}{q} \quad (4)$$

여기서,  $n$ 는 발산계수,  $V_{Th}$ 는 열전압,  $i_S$ 는 포화전류  
 $i_D$ 는 다이오드 전류,  $k$ 는 볼츠만 상수,  
 $T$ 는 켈빈온도,  $q$ 는 전자전하,  
 $V_{diode}$ 는 다이오드 양단에 걸리는 전압

Pspice에서 다음과 같은 파라미터를 적절히 선택하여 연료전지 전압-전류특성과 일치하는 다이오드를 모델링 할수 있다. 모델링에 사용된 파라미터는 다음과 같다. IS (Saturation current), RS (Parasitic resistance), N (Emission Coefficient),

옴릭 분극은 다이오드의 기생저항 RS를 사용하여 모델링 하였다. IS는 0.02mA, N=80 그리고 RS는 0.01옴을 사용하였다.

농도 분극은 전류제한 회로를 사용하여 모델링 하였다. 전류제한 회로는 그림 2에서 알수 있듯이 두 개의 BJTs Q1, Q2와 전류센싱 저항 Rcs로 구성 하였다. Rcs를 통해 과전류가 흐르면 Q2가 도통하여 Q1의 베이스전압을 감소 하게 하여 식 (2)와 유사하게 지수적으로 Q1의 에미터 전압이 감소 하게 된다.

전극과 전해질 계면의 이중층에 의해 커패시터 C1이 병렬로 연결되며, 커패시터 성분 때문에 전류가 순간적으로 변했을때 전압은 서서히 변화한다. 그리고 인덕터L1은 연료전지 시스템에서 공기압축기를 모델링 한 것이다.

C1과 L1은 각각 1F과 10mH를 사용하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

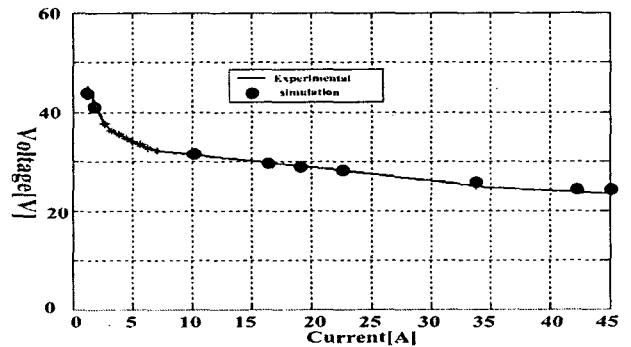


그림 3 PEMFC의 전압-전류 특성곡선  
 Fig. 3 V-I characteristics of the PEMFC

그림 3은 Ballard사의Nexa(310-0027) PEMFC를 사용하여 실험한 데이터로 나타낸V-I 특성곡선과 Pspice 모델링 회로의 V-I 특성 곡선을 나타낸 것으로서 두 특성이 거의 일치함을 알수 있다.

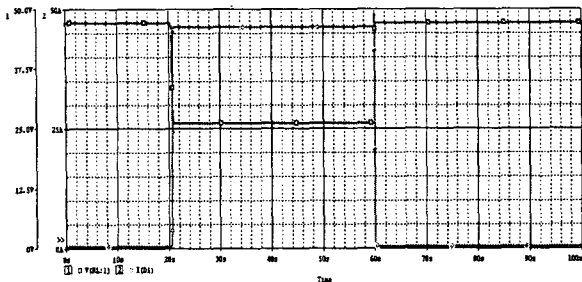


그림 4 시뮬레이션 스텝부하 응답 전압, 전류 파형  
Fig. 4 Step response voltage, current waveforms of simulation

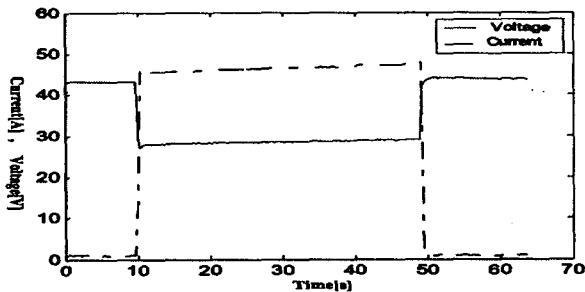


그림 5 실험 스텝부하 응답 전압, 전류 파형  
Fig. 5 Step response voltage, current waveforms of experiment

그림 4와 그림 5는 부하 저항이 106 Ω에서 0.5 Ω 으로 바뀌었을때의 각각 시뮬레이션및 실험 스텝부하 응답 전압, 전류 파형을 나타낸 것으로서 일치하고 있다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축사업으로 수행된 논문입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] James Larminie and Andrew Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [2] A.Kazim, H.T.Liu, and P. Forges, "Modeling of performance of PEM fuel cells with conventional and interdigitated flow fields," Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 29, pp. 1409-1416, 1999.
- [3] K. Dannenberg, P. Ekdunge, and G. Lindbergh, "Mathematical model of the PEMFC," Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 30, pp.1377-1387, 2000.
- [4] J.B. van der Merwe, C. Turpin, T. Meynard, and B. Lafage, "The installation, modeling and utilisation of a 200 W PEM fuel cell source for converter based applications, " Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 2002, pp. 333 -338.