

계통연계형 연료전지 모델링에 관한 연구

이종수\*, 윤석무\*\*, 신명철\*  
 성균관대학교\*, 대덕대학\*\*

A Study of Fuel Cell Modeling for Interconnected Power Systems

Jong-Su Lee\*, Suk-Moo Youn\*\* Myong-Chul Shin  
 SungKyunKwan University\*, DaeDuk University\*\*

**Abstract** - The modelling of PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell) has been studied in many kinds of methods. But there are some limitations in application of the developed models to analysis transient phenomena of power systems. The PSCAD/EMTDC is very popular simulation tool in power system areas. To analysis power systems interconnected to PEMFCs, the PSCAD/EMTDC model of the PEMFCs is needed. In this paper, we developed a PSCAD/EMTDC model of PEMFC based on electro-chemical characteristic equations of PEMFC. Also, we performed simulations using the developed model in the PSCAD/EMTDC program and tested appropriateness of the proposed the models. The simulations showed good results.

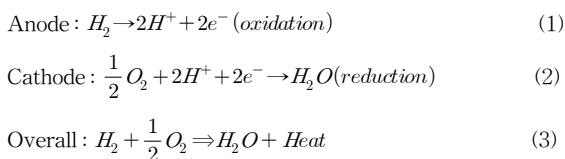
1. 서 론

최근 석유 및 천연가스등의 화석연료 매장량의 한계로 인하여 다양한 신재생에너지원의 필요성이 크게 대두되고 있으며, 상용화를 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. 태양광 발전, 풍력발전, 연료전지 발전 등의 다양한 신재생에너지원 중에서 장소 및 환경의 영향을 적게 받는 연료전지 발전 같은 경우 고효율의 출력과 대형 발전소에서부터 자동차등의 휴대용에 이르기까지 적용범위가 넓고 무공해라는 점에서 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 이러한 다양한 연료전지 중에서도 고분자전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)의 경우 다른 연료전지에 비해 저온에서 구동이 가능하며 내구성이 우수하고 출력밀도가 높아 자동차용 전원 및 소 용량 발전설비로 많이 사용되고 있다[1]. 이러한 분산전원의 한 종류인 PEMFC를 계통에 연계하는 경우 계통에서의 해석을 하려면 일반적으로 전력계통의 과도특성 해석에는 PSCAD /EMTDC 프로그램이 많이 활용되고 있는데, PEMFC가 있는 계통의 과도특성 해석을 위해서는 PEMFC의 PSCAD /EMTDC 모델을 이용하는 것이 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 전력계통의 과도특성 해석에 용이하도록 PEMFC의 PSCAD/EMTDC 모델을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 PEMFC의 구조 및 동작원리

PEMFC는 중앙에 고분자전해질 막(Membrane)을 중심으로 막의 양쪽에 다공질의 연료극(Anode)과 공기극(Cathode)이 부착되어 있는 형태로 되어있다. 막과 전극은 일반적으로 일체형으로 제작되고 막과 전극 집합체(Membranr Electrolyte Assembly, MEA)라고 한다. 연료극에서는 연료인 수소의 전기화학적 산화반응인 수소이온(H+)과 전자(e-)로 분리되고, 공기극에서는 산화제인 산소(O2)의 전기화학적 환원반응이 일어나며 이때 발생하는 전자의 이동으로 인해 전기에너지가 발생된다.각 전극에서의 반응식과 총 반응식은 다음의 식(1)~식(3)과 같다.



2.2 PEMFC 모델링

PEMFC의 동작전압은 많은 다양한 물리적 현상에 관계된 많은 변수들의 계산을 통하여 얻어진다. 그러나 일반적으로 평형 전압으로 표현되는 Nernst 전압  $E_0$  값에 온도, 반응 압력 등의 값으로 구해지는 활성화 손실, 연료교차와 내부전류에 의한 손실, 저항 손실, 물질수송 또는 농도손실에 의하여 전압 강하가 이루어진다. 이들 값을 고려하여 연료전지의 출력 전압은 다음과 같은 식 (4)로 표현할 수 있다[2].

$$E_{Cell} = n(E_0 - \eta_{act} - \eta_{conc} - \eta_{ohm}) \tag{4}$$

식 (4)에서의 n은 PEMFC 스택의 개수이고  $E_0$ 는 Nernst 전압, 각의 손실 값 및 평형 전압의 값은 다음과 같다[3].

PEMFC는 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 장치이며, 화학에너지는 Gibbs 자유 에너지로 표현된다. Nernst 모델은 Gibbs 자유에너지 변화량에서 기체분압과 전압 등을 고려하여 유도되며 다음 식 (5)와 같다.

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \tag{5}$$

여기서,  $E_0$ 는 평형전극 전위, R은 가스 상수(8.3144J/molK), T는 절대온도 (K), F는 패러데이 상수(96,495C/mol), P는 부분 압력을 나타내며 이때의 PEMFC의 동작 온도는 80(°C), 화학반응에 의해 생성되는 물의 상태는 액체일 때 이다.

연료전지의 출력전압은 OCV보다 항상 낮게 출력되는데 이것은 분극현상이라고 부르는 손실현상에 의해 나타나며 이 손실 값은 식 (4)에 나타난 것처럼 세 부분으로 구성된다[2].

활성화 손실은 전극 표면에서 수소나 산소의 반응속도가 느린 경우 발생하며 이에 의해 PEMFC에서의 전압강하는 매우 비선형적이다. 활성화 손실에 의한 연료전지 전압의 감소 값은 다음의 식 (6)과 같이 Tafel 방정식의 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} \tag{6}$$

여기서  $\alpha$ 는 전이계수, n은 반응에 참여한 전자의 개수,  $i_0$ 는 교환 전류밀도, i는 전류밀도를 나타낸다.

저항 손실은 이온의 이동에 대한 전해질 내의 저항과 전극을 지나는 전자의 흐름에 대한 저항과 분리판/집적판과 전극사이의 접촉저항 때문에 발생하며 이때의 손실은 일반적인 옴의 법칙에 의하여 전압강하는 전류 밀도에 비례하고 선형이므로 저항 손실이라고 부르며 다음 식 (7)과 같다.

$$\eta_{ohmic} = IR_T \tag{7}$$

농도 손실은 화학반응에 의해 연료가 소비될 때 전극표면인 산소극과 연료 극에서의 반응물질의 반응 속도 차이에 의한 연료전지 내부의 농도차이, 반응물과 생성물의 확산속도 차이 등에 의해 발생하며 Fick의 확산 법칙과 반응물이 전극에 공급되는 최대한의 전류밀도인 제한 전류밀도를 고려하면 다음 식 (8)과 같이 유도된다.

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

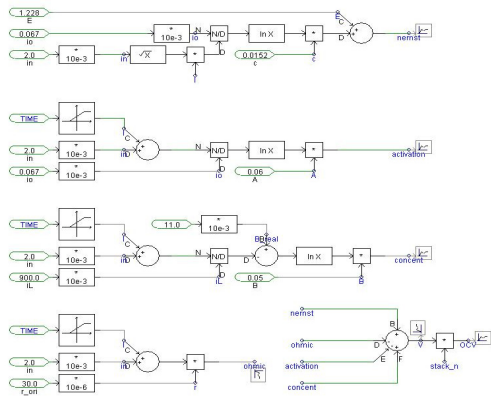
이와 같이 PEMFC의 출력전압은 Nernst 모델로 구한 연료전지의 OCV 값에서 세 개의 손실 값 모델링에 의해 구해진 손실 값을 빼줌으로써 다음과 같은 식 (9)로 표현할 수 있다.

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

여기서 A와 B의 값은 Tafel 방정식에 의해 상수 값으로 취급되며 외부 입력 값인 가스 상수, 절대온도, 페러데이 상수 등이 다.

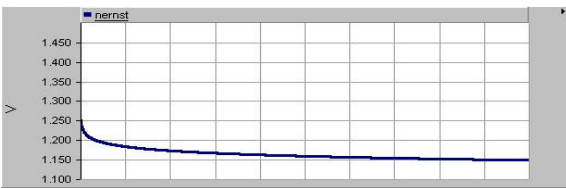
### 2.3 PSCAD/EMTDC 모델링 및 결과

PSCAD/EMTDC를 사용하여 구성한 PEMFC의 전체적인 블록 다이어그램은 다음 그림 1과 같다. 그림 1에서 구성한 모델은 단위 스택당 PEMFC의 전압-전류 특성을 고려하여 실제 계통에 연계 가능한 모델로 사용하기 위하여 식 (4)의 n의 값을 사용자가 직접 조정 가능하도록 PSCAD/EMTDC의 컨트롤 패널을 사용하여 구성하였고 시간의 변화에 대하여 전류 i의 값이 선형적으로 증가하도록 모델을 구성하였다.



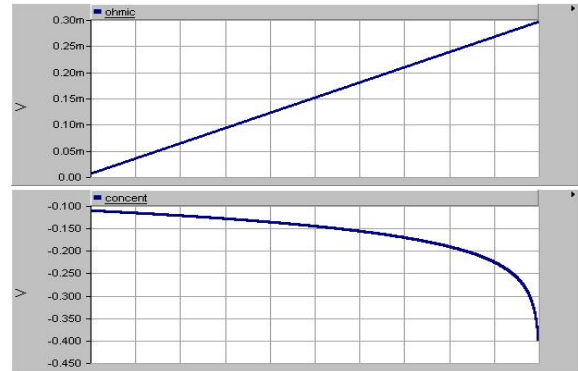
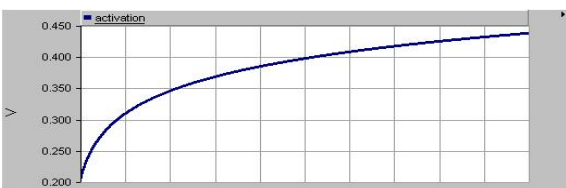
〈그림 1〉 PEMFC 블록 다이어그램

개발한 PSCAD/EMTDC 모델을 사용하여 각각의 손실영역에서의 출력 값과 PEMFC 스택의 전압-전류 출력 값을 시뮬레이션을 수행하여 기존의 이론적인 PEMFC의 출력 값과 비교하여 타당성을 검토하였다.



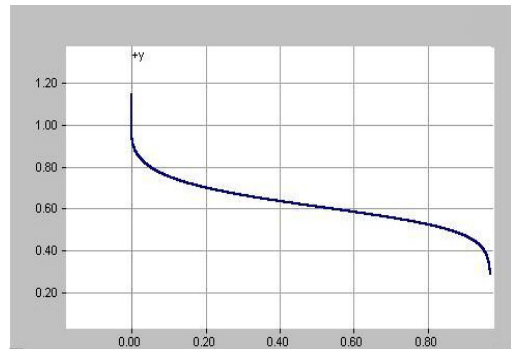
〈그림 2〉 Nernst 출력전압

Nernst 출력전압은 그림 2와 같이 출력결과가 나타나어지고 이때의 출력 값은 식 (5)번의 Nernst 방정식에 의해 계산된 결과와 동일함을 확인하였다. 각각의 손실영역에서의 식 (6), (7), (8)을 PSCAD/EMTDC를 사용한 시뮬레이션 결과 값은 다음 그림 3에 표시하였다.



〈그림 3〉 PEMFC의 손실전압

그림 2에서 얻은 출력 전압에 그림 3의 출력 결과를 통합하여 그림 4와 같은 PEMFC의 V-I 특성곡선을 구할 수 있었다.



〈그림 4〉 PEMFC의 시뮬레이션 결과 V-I 특성곡선

### 3. 결 론

기존의 PEMFC 모델들은 계통에 연계하여 분산전원으로 동작 시에 PEMFC는 PSipce나 Matlab/Simulink 등과 같은 프로그램을 사용하여 시뮬레이션되고 그 결과 값을 계통연계 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 사용하였기 때문에 계통에서의 분산전원에 대한 실시간 분석 및 선형적인 분석이 어려운 점이 해결과제로 남아있었다. 본 논문에서는 실제 계통의 과도 특성을 시뮬레이션하는데 널리 이용되는 PSCAD/EMTDC를 사용하여 전기화학식에 근거하여 PEMFC의 모델을 구현하였으며, 이를 이용하여 시뮬레이션을 통하여 제시한 모델의 타당성을 입증하였다. 본 논문에서 제안한 PEMFC의 PSCAD/EMTDC 모델은 계통연계 시의 PEMFC의 정확한 동작특성이 구현이 가능하며, 추후 PEMFC의 계통 연계운전에 대한 다양한 계통 과도특성해석에 제안한 PEMFC의 PSCAD/EMTDC 모델의 많은 활용이 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] James Larminie, Andrew Dicks "Fuel Cell Systems Explained" JOHN WILEY & SONS. LTD, 2003
- [2] Gyu-Yeong Choe, Jong-Soo Kim, Hyun-Soo Kang, Byoung-Kuk Lee "Proton Exchange Membrane Fuel Cell(PEMFC) modeling for High Efficiency Fuel Cell Balance of Plant(BOP)", Proceeding of International Conference on EMS pp. 271-276, 2007
- [3] Mann R.F., Amphlett J.C., Hooper M.A.I., "Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", Journal of Power Sources, Vol. 86, pp. 172-180, 2000
- [4] Jeferson M. Correa, Felix A. Farret, Vladimir A. Popov, Marcelo G. Simoes "Sensitivity Analysis of the Modeling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", IEEE Transactions on Energy conversion, Vol. 20, No.1, March 2005