

연료전지 모델링 및 부스트 컨버터 출력 특성

Fuel Cell Modeling with Output Characteristics of Boost Converter

박봉희* · 최주엽*† · 최익** · 이상철*** · 이동하***

Park Bong-Hee*, Choi Ju-Yeop*† ,

Choy Ick**, Lee Sang-Cheol*** and Lee Dong-Ha***

(Submit date : 2013. 12. 1., Judgment date : 2013. 12. 9., Publication decide date : 2014. 2. 18.)

Abstract : This paper proposes a modeling of fuel cell which replaces dc source during simulation. Fuel cells are electrochemical devices that convert chemical energy in fuels into electrical energy. This system has high efficiency and heat, no environmental chemical pollutions and noise. Proton exchange membrane fuel cells(PEMFC) are commonly used as a residential generator. These fuel cells have different electrical characteristics such as a low voltage and high current compared with solar cells. And there are different behaviors in the V-I curve in the temperature and pressure. Therefore, the modeling of fuel cell should consider wide voltage range and slow current response and the resulting electrical model is applied to boost converter with fuel cell as an input source.

Key Words : 연료전지(Fuel cell), 모델링(Modeling), 전압-전류 곡선(V-I curve), 부스트 컨버터(Boost Converter)

기 호 설 명

Δg_f^0	: gibbs의 자유에너지(J)	P_{H_2}	: 수소의 압력(atm)
F	: 패러데이 상수 96,487 (C/mol)	P_{O_2}	: 산소의 압력(atm)
R	: 기체상수 8.3144 (J/mol)	P_{H_2O}	: 수증기의 압력(atm)
T_{fc}	: 연료전지 온도(°C)	I_{st}	: 스택전류(A)
		A_{fc}	: 셀 당 면적(cm^2)

**† 최주엽(교신저자) : 광운대학교 전기공학과
E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5146

*박봉희 : 광운대학교 전기공학과

**최 익 : 광운대학교 로봇학부

***이상철 : 대구경북과학기술원

***이동하 : 대구경북과학기술원

*† Choi Ju-Yeop(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.

E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 02-940-5146

*Park Bong-Hee : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.

**Choy Ick : Department of Robot Engineering, Kwangwoon University

***Lee Sang-Cheol : DGIST

***Lee Dong-Ha : DGIST

v_o	: 영전류 밀도 일 때의 전압강하(V)
v_a	: 산소압력 관련 상수
c_1	: 온도에 관련된 상수
c_2	: 온도에 관련된 상수
c_3	: 분압에 관련된 상수
R_{ohm}	: 내부저항($\Omega \cdot cm^2$)
i_{max}	: 최대 전류밀도
i_0	: 반응교환 전류밀도 ($0.1mA/cm^2$)
i	: 전류밀도

1. 서론

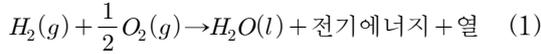
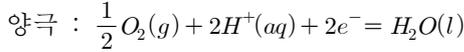
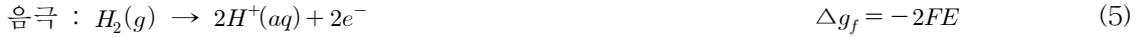
연료전지는 미래의 에너지원으로 자리 잡고 있다. 동력 공급을 위한 화석연료의 사용으로 많은 부정적 결과들이 야기되었다는 사실로부터 과거 십여 년에 걸쳐 연료전지에 대한 관심이 꾸준히 증대하여 왔다. 화석 연료에 대한 부정적인 결과들로서는 심각한 오염, 지구자원의 무분별한 채취, 그리고 자원이 풍부한 국가들의 정치적 우월권과 통제를 들 수 있다. 이에 따라 에너지 효율이 좋고 오염물질 배출이 적으며 연료의 무제한적인 공급이 가능한 새로운 동력원이 요구되고 있다. 오늘날 연료전지는 상용화에 더욱 가까워졌으며 효율성과 환경에 대한 기대를 만족시키면서 지구상의 동력 수요를 충족시킬 수 있는 가능성이 있다. 연료전지는 다양한 구성을 가지고 있으며 그 중에서 연료전지 기술 개발 수준이 가장 높으며, 상용화가 기대되는 기술이 고분자 전해질 막(Polymer electrolyte membrane, PEM) 연료전지이다. 또한, PEM 연료전지는 시동 특성이 가장 빠르며 가장 보편적인 형태의 연료전지로서 수소를 연료로 사용하고 있다. PEM 연료전지는 또한 수소로부터 에탄올 및 생체물질에서 추출된 연료에 이르기까지 많은 다른 연료들을 사용할 수 있다. 이러한 연료들은 연료전지에 직접 주입하거나 혹은 재생기

로 보낸 다음 순수한 수소를 추출하여 연료전지로 공급하기도 한다. 이러한 PEM연료전지 기술은 기존 운전온도가 $60\sim 80^\circ C$ 이었다면 현재는 $120\sim 180^\circ$ 에서 운전함으로써 이론적으로 발전효율 및 열 활용 측면에서 유리하게 변화하고 있다. 이러한 연료전지는 전기화학적 특성으로 인하여 연료전지 발전 시스템에서 출력 전압¹⁾의 강하가 다른 전압원에 비하여 심하며 이를 계통에 연계하는 PCS사양에 대한 기본적인 특성의 해석이 필요하며, 전기적으로 절연 및 저전압 대전류의 특성 때문에 변압기가 필수적으로 사용되며 이 점은 시스템 및 인버터의 전체 효율을 낮추게 하는 원인이 있다. 이러한 연료전지 발전 시스템의 특성을 이해 및 해석하려면 우선적으로 연료전지의 특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 연료전지 모델링이 필요하다고 생각한다. 이러한 특성에 맞춰 인버터가 고려해야 할 부분이 어디인지 확인 및 해석하여 모델링 하도록 중점을 두도록 하였다.

2. 연료전지의 특성

연료전지의 기본원리는 음전하를 띤 전극(음극), 양전하로 대전된 전극(양극), 그리고 전해질 막으로 구성된다. 수소는 음극에서 산화되며 산소는 양극에서 환원된다. 양자는 전해질 막을 통하여 음극으로부터 양극으로 이동하며 전자는 외부 회로를 통하여 양극으로 전달된다. 양극에서는 산소가 양자 및 전자와 반응하여 물과 열을 생성하며, 이 반응식은 식 (1)로 단순하게 나타낼 수 있다.

1) 참고문헌 : Optimal integration and operating evaluation of main components for high temperature PEMFC



2.1 전원의 특성

연료전지는 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키므로 열역학 방정식들을 이용하여 얻을 수 있는 예측은 연료전지 성능의 이해와 모델링에 필수적이다. 다만, 기본적인 열역학적 개념들인 온도, 압력, 부피 등과 같은 기본적인 값들을 고려하여야 한다. 식(1)의 화학식에서 H_2 와 O_2 의 에너지와 반응하여 생성된 H_2O 와 전기 및 열에너지는 같으며 이 화학적 에너지는 식(2)의 Δg_f 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta g_f &= (g_f)H_2O - (g_f)H_2 - (g_f)O_2 \\ &= g_f(\text{product}) - g_f(\text{reactant}) \end{aligned} \quad (2)$$

화학적 에너지는 일정한 압력과 온도를 유지하는 조건에서 기브스 자유 에너지(Gibbs free energy)에 따라 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 전기적 에너지는 전하와 전압의 곱인 식(4)로 나타낼 수 있다.

chemical energy :

$$\Delta g_f = \Delta g_f^0 - RT_{fc} \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right] \quad (3)$$

electrical energy :

$$-2FE \text{ joules} \quad (4)$$

역으로, 화학적 에너지를 전기적 에너지로 바꾼다고 하면 두 에너지 같기 때문에 식(5)로 정리할 수 있다.

이 식을 전기적 에너지에 대한 식으로 유도하면, Δg_f^0 는 gibbs의 자유에너지, F 는 패러데이 상수(96,487 C/mol), R 은 기체상수(8.3144 J/mol), T_{fc} 는 연료전지 온도, $P_{H_2}, P_{O_2}, P_{H_2O}$ 는 수소, 산소, 수증기의 압력이다. 이 식은 정리하면 식(6)으로 전개되며, 이 전압은 비가역 손실이 없는 손실이 없는 전압, Open Circuit Voltage(OCV)가 된다. 전류밀도(i)는 병렬로 구성되었기 때문에 스택전류 I_{st} 와 같고, A_{fc} 는 셀 당 면적(cm^2)으로 반비례하며 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= \frac{-\Delta g_f}{2F} \\ &= \frac{-\Delta g_f^0}{2F} + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right] \\ &= 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) \\ &\quad + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$i = \frac{I_{st}}{A_{fc}} \quad (7)$$

2.2 전압강하의 원인

연료전지로부터 전기에너지를 발생시키는 경우 비가역적인 손실로 인하여 실제 전압의 전압은 이론전압보다 낮아지며, OCV 전압의 50%의 값까지 떨어진다. 이때의 전압 v_{ohm} 강하는 크게 활성화 분극화(v_{act}), 저항분극화(), 농도 분극화(v_{con})등 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 활성화 분극화 손실의 경우 전극표면에서의 화학작용이 원인이 되며, 전류가 $i > i_0$ 경우에는 식(8)에서 위에 식을 적용할 수 있으며, 이때 연료전지가 PEM연료전지인 경우에 i_0 은

0.1mA/cm²을 가진다.

$$\begin{cases} v_{act} = a \ln(\frac{i}{i_o}), & i > i_o \\ v_{act} = v_o + v_a(1 - e^{-c_1 i}) \end{cases} \quad (8)$$

여기서, a 는 이상기체상수와 온도범위, 전자의 개수의 곱을 전달계수와 Faraday상수로 나눈 상수 값이며, i 는 식(7)에서의 전류밀도, i_0 는 반응교환 전류 밀도, v_o 은 영전류밀도 일때의 전압강하, v_a, c_1 도 은 산소 압력 및 온도에 관련된 상수이다.

$$v_{ohm} = R_{ohm} \times i \quad (9)$$

저항분극화 손실은 연료전지 스택내의 내부 저항 손실로, R_{ohm} 은 전지저항 값으로 전자 저항과 전이온 저항을 포함하며 $\Omega \cdot cm^2$ 의 단위를 가진다. 이 전지저항 값은 전해질 막의 두께를 전해질 막의 전도도로 나눈 값으로 계산할 수 있다.

$$v_{con} = i(c_2 \frac{i}{i_{max}})^{c_3} \quad (10)$$

농도 분극화 손실은 연료전지가 사용되는 반응물의 농도의 변화에 의하여 발생되며, c_2, c_3 는 온도와 분압에 관련된 상수이며, i_{max} 는 최대 전류밀도이다.

2.3 실제 전원 특성

연료전지에서 전기적인 에너지는 식(6)으로 나타낼 수 있고, 그 때의 총 손실 (8), (9), (10)을 모두 합하면, 실제 셀의 전압은 식(11)로 나타낼 수 있다. 스택의 전압은 셀 전압(v_{fc})에 셀의 개수를 곱한 값이다.

$$\begin{aligned} v_{fc} &= E - v_{act} - v_{ohm} - v_{con} \\ &= E - [v_o + v_a(1 - e^{-c_1 i})] - [iR_{ohm}] - [i(c_2 \frac{i}{i_{max}})^{c_3}] \\ &\quad - [i \times R_{ohm}] - [i(c_2 \frac{i}{i_{max}})^{c_3}] \end{aligned} \quad (11)$$

연료전지 손실에서 위의 내용을 전류에 대한 특성으로 나타내면 아래의 그래프로 나타낼 수 있으며 각각의 손실은 아래 그림의 순서대로 그림 (a)-(c)와 같으며, (a)는 초기에 급격히 손실이 발생하며, (b)는 선형적으로 발생하며, (c)는 마지막 구간에 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 모든 것을 중첩하여 총 손실을 반영한 실제 연료전지의 전압-전류 곡선은 그림(d)와 같다.

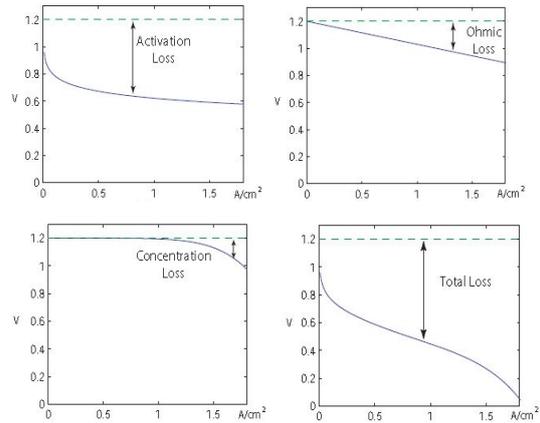


Fig.1 V-I curves in various losses
(a) Activation loss (b) Ohmic loss
(c) Concentration loss (d) Total loss

이러한 전압강하 특성은 전기적 등가 회로 모델로 다시 나타낼 수 있는데 활성화 분극 손실 식(8)과 농도분극화 손실의 식(10)을 옴의 법칙을 이용하여 전류로 나눠주면 저항으로 표현한 식(12), (13)이 된다. 이 때 순수 저항이 아닌 R_{conc} , R_{act} 의 경우는 기생 캐패시턴스 성분을 고려하여 식(14)를 이용하여 전류

를 구할 수 있다. 이로써 손실을 고려한 연료 전지에서 실제 전압을 식(15)로 나타낼 수 있고, 식(12)-(15)의 수식을 반영하여 전기적 등가회로를 전원과 저항, 캐패시터로 구성된 회로로 나타낼 수 있다.

$$R_{act} = \frac{1}{i} [v_o + v_a (1 - e^{-\alpha i})] \quad (12)$$

$$R_{conc} = i \left(c_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{c_3} \quad (13)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c - v_o}{R_{act} + R_{conc}} = i \quad (14)$$

$$v_{fc} = E - v_c - i \times R_{ohm} \quad (15)$$

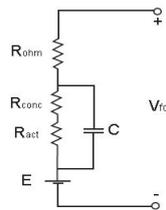


Fig.2 Equivalent circuit of Fuel Cell

2.4 시뮬레이션 구성

Table 1. Fuel Cell Specification

Rated Power	200W
Rated Voltage	28V
Rated Current	7.2A
DC Voltage range	26-46V
Efficiency	≥40%
Pure hydrogen	≥99.99%
Pressure	0.4-0.45bar
Hydrogen consumption	2.81 L/min (rated power)

Table.1의 연료전지 모델은 Horizon社의 H-200 모델이다. 제조사에서 제공되는 Fig.3의 V-I 및 P-I 곡선과 시뮬레이션으로 구현된 Fig.4의 모델링 결과 값이 같은 것을 확인 할

수 있었다. 이 제품의 연료전지 출력 특성을 고려하여 PSIM 및 MATLAB을 이용하여 Fig.5와 같이 모델링된 연료전지와 부스트 컨버터를 연계하였다.

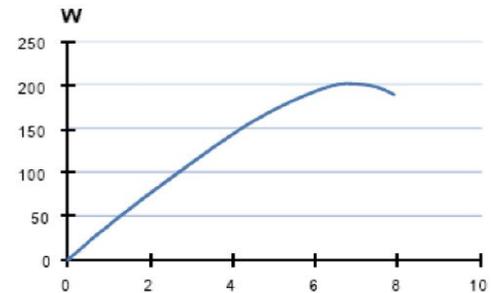
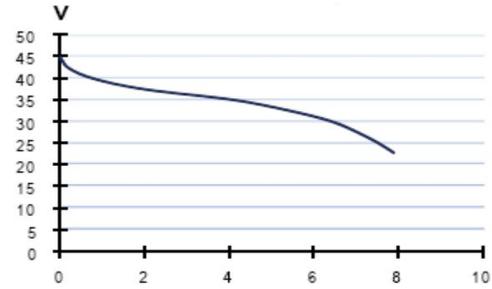


Fig.3 Given V-I, P-I curve data about H-200

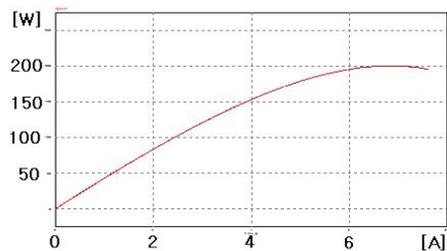


Fig.4 Simulation result of the V-I, P-I curve about H-200 modeling

이 때 1A 일 때의 전압은 0A일 때의 전압의 95%를 가지도록 하였으며, 주어진 정격이외에 최대출력전류(Iend)는 8A, 최소출력전압(Vend) 값은 26V로 하였다. 이러한 조건들을 반영한 결과 연료전지의 출력에서 Fig.6와 같이 시간에 따라 전압이 천천히 떨어지며, 동시에 전류가 천천히 올라가는 것을 확인하였다. 이때 각각의 구간에서 실제 전원의 특성인 활성분극화 손실, 저항분극화손실, 농도분극화 손실이 나타나는 것을 보여주었다.

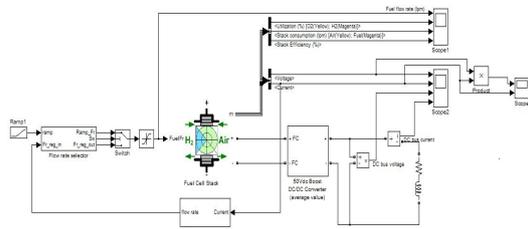


Fig.5 Fuel Cell Modeling with Boost Converter

이러한 연료전지의 출력 전압이 떨어지는 것을 반영하여 정전압을 내는 출력 50V의 부스트컨버터를 연결함으로써 연료전지 출력전압의 강하에 대해서도 Fig.7과 같이 50V의 출력을 내는 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

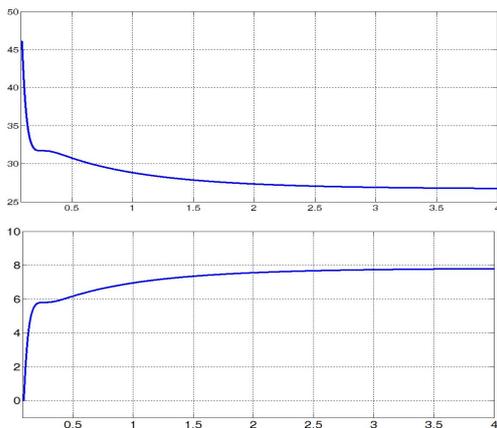


Fig. 6 Simulation result of the voltage(up) and current(down) output about fuel cell Modeling

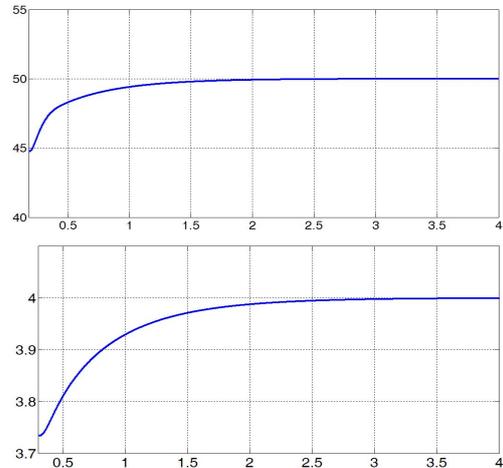


Fig. 7 Simulation result of the voltage(up) and current(down) output about boost converter

3. 결 론

본 논문에서는 연료전지 발전 시스템에서의 특성에 대하여 설명하였다. 연료전지에서 화학적인 에너지가 어떻게 전기적인 에너지로 바뀌는지 이때 연료전지의 V-I의 곡선의 특성을 갖게 하는 화학, 전기적인 전압 강하의 원인을 찾아서 계산하였고 연료전지 모델링 결과를 토대로 부스트컨버터와 연동하였다. 연료전지의 전압 및 전류 출력 특성과 부스트 컨버터의 출력 특성을 시뮬레이션을 통하여 해석 할 수 있었으며 출력의 전압강하에 대하여 부스트 컨버터가 제대로 제어되는지 확인하였다. 실제 연료전지의 특성과 시뮬레이션 결과를 종합적으로 고려하였을 때, 연료전지의 동 특성상 실제 운전 에 있어서 생각보다 긴 대기 시간이 필요함을 알게 되었고, 이러한 동특성의 단점을 보완하기 위하여 배터리 같이 초기운전 상태를 보완할 수 있는 보조전원의 필요성도 알게 되었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 대구경북과학기술원 일반사업(14-BD-01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Collen spiegel, "PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab", Elsevier, 2008.
2. Sang-Cheol LEE, et al, "Fuel cell simulation : steady-state and dynamic case", International Conference on Computer Science&Education (ICCES), 2012.
3. Jong-Soo Kim, et al., "Matlab-PSIM Co-Simulation Technique for Analysis of Characteristics of Fuel Cell System", The Korean Institute of Electrical Engineerings, 2008
4. Andrea, E, et al, "A simplified electrical model of small PEM fuel cell", IPEC, 2010
5. Mark C. Williams, et al, "Fuel Cell Handbook", EG&G Technical Services, Inc. 2004.