

연료전지 전력 시스템의 모델링

한경희*, 이화진*, 이나영*, 장혜영*, 이병승**, 백수현*
 *동국대학교 전기공학과, **한국철도기술연구원 전기신호 연구본부

The Modeling of Power System with PEM fuel cell

K.H.HAN*, H.J.LEE*, N.Y.LEE*, H.Y.JANG*, B.Y.LEE**, S.H.BAEK*
 *Dongguk Univ. Electric Dept., **KRRI Signaling & Electrical Engineering Research Dept.

Abstract - A powered system with fuel cell is regarded as a high current and low voltage source. Effects of the loads on the electrical power source are important to optimize the integrated power system. The design parameters of the system should be chosen by taking into account the characteristics of the fuel cell, so the costs of the power system at given operating conditions can be reduced. Furthermore, the dynamics characteristic of the system is crucial to acquire performance in applications, particularly interactions between loads and the fuel cell system. Currently, no integrated simulation has been approached to analyze interrelated effects. Therefore, the dynamic models of power conversion system with a PEM fuel cell that includes the PEM fuel cell stack, DC/DC converter and associated controls is developed. Electric loads for the system are derived by using a power theory that separates a load current into active, reactive, distortion or a mixed current component. Dependency of the DC capacitor on the loads are analyzed.

연료전지 시스템을 설계하는데 있어 상당히 중요한 요소이다. 시스템의 요소에 있어서 전기적 부하의 역할은 요소의 적절한 선택과 적절한 크기를 결정하기 위해 필수적으로 고려되어야 할 사항이다.

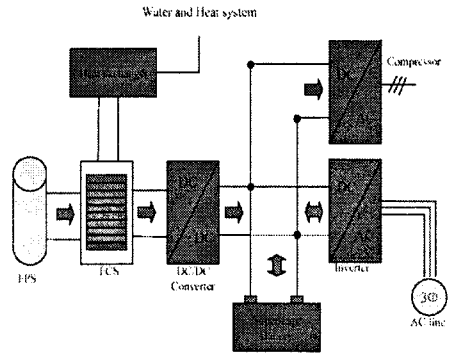


그림 1. PEM fuel cell 전력 시스템의 구조

1. 서 론

PEM fuel cell은 양극판, 가스 확산층, 전해질, 그리고 멤브레인 등으로 구성된 각기 다른 층을 가지고 구성된다. 수소와 산소가 전해층에서 반응할 때, DC 전력이 발전되고 열과 수분이 부산물로 발생된다. 단일 셀은 1.2V를 발전한다. 그러나 부하 전류가 증가할 때, 출력 전압은 급속하게 감소하는데, 이는 전극과 멤브레인에서의 과전압(overpotentials) 때문이다. 그래서 연료전지는 전압원으로 분류한다.

BOP(balance-of-plant)은 연료공급과 부산물 제거를 위해 요구되는 부분이다. BOP는 4개의 하위 시스템으로 나눌 수 있는데 이는 발열 방지와 함께 연료와 수분 공급을 위한 것이다. 연료 공급시스템은 수소 저장용 위한 탱크를 구성하는 반면, 산소는 압축기를 통한 산소에 의해 공급되거나, 셀에 적절하게 습도를 유지하기 위한 가습기를 통해 공급된다. 발생된 열은 냉열회로에 의해 냉각되는데 이 냉각회로는 라디에이터, 펌프, 컨덴서와 저장탱크를 포함한다. 더욱이, 연료전지 시스템은 요구사항에 맞춰 적절하게 반응할 수 있어야 하는데, 이에 의하여, 스택의 효율을 고려하여야 한다. 그래서 4가지 큰 관리시스템이 연료전지가 전력공급 시스템으로서 신뢰성 있는 동작을 하도록 관리하는 것이 필수적이다.

그 4가지 시스템은 각기 서로 유기적으로 결합되어 있으며, 비선형성을 가지는 동적 시스템으로 나타낼 수 있다. 특히 동특성은 궁극적으로 전력을 발생시켜야 하는

스택의 화학적 동작과 BOP의 비선형적 특성에 의해 야기되는 시스템의 복잡성 때문에, 계산 방식은 동작환경에 있어 전체적인 동특성 이해를 돕는 것이 유일한 길이라 할 수 있다.

부산물로 발생하는 열은 연료전지의 안정적인 동작을 위해서 제거되어야 한다. 그러나, 열은 가정이나 빌딩에서 물이나 공기를 가열하는데 다시 사용될 수 있다. 이를 Combined Heat and Power Generation(CHPG)라고 부른다. 하나의 장점은 자칫 낭비될 수도 있는 부산물을 사용함으로써 효율을 극대화 할 수 있다는 것이며, 이는 상업화할 수 있는 가능성에 근접하고 있음을 의미한다. 일반적인 CHPG의 구조를 그림 1에 나타냈는데, 여기에는 개질기를 비롯한 연료전지 전력공급시스템, DC/DC 컨버터와 DC/AC 컨버터와 함께 저장장치가 포함되어 있다. 연료전지 발전 시스템이 동작하게 되면 부하는 단상 혹은 3상 이 될 수 있다. 무엇보다도 연료전지의 출력 특성은 대전류/저전압을 발생하는 전압원으로 볼 수 있다. 그러므로 연료전지의 출력 전압은 주어진 전압의 최대치와는 최소한 같도록 DC bus voltage 까지 승압해야 한다. 전압의 승압은 컨버터에 의해서 수행된다. 컨버터는 스위치가 on 되었을 때에는 우선 에너지를 인덕터에 저장하고, 스위치가 off 되었을 때 캐패시터에 인덕터 에너지를 다시 충전한다. 일단 스위칭 주기가 적절하게 조절되면, 캐패시터의 전압은 변동하는 부하에서 일정하게 유지될 수 있다. 반면, DC bus에 병렬로 연결된 DC 링크 캐패시터는 야기되는 전

력의 요동을 필터링함으로써 AC 부하를 연료전지와 분리시킨다. 이는 연료전지 시스템이 에너지를 저장할 수 없음을 의미한다. 그러나 캐패시터는 적용하고자 하는 시스템이나 전력요구사항에 따라서 배터리나 슈퍼 캐패시터로 대체될 수 있다.

2. 본 론

2.1 DC/DC Converter model

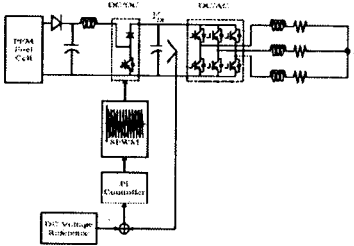


그림 2. fuel cell 전력시스템

DC/DC 컨버터 연료전지 전원시스템의 대표적인 기계 구성을 그림 2에서 보여준다. 다이오드 D_1 이 스택으로 역류하는 전류를 막는 동안, 스위칭 기간 동안 발생하는 동작 중에 어떠한 급작스런 전류의 공급을 완충하는 역할을 캐패시터(C_{in})가 담당한다. 연료전지의 출력 전압을 승압하는 DC/DC 컨버터와 함께 DC/AC 컨버터가 요구되는 전류를 제공하게 되는 것이다. 운전이 전력 변환 중에 손실이 없는 것과 인덕터에서의 전류가 연속적이라는 가정 하에 컨버터의 동작이 컨덕션 모드로 제한되는 경우, DC/DC 컨버터는 두 개의 식 (1)과 (2)에 묘사되어진다.

$$\frac{dv_{iDC}}{dt} = \frac{1}{C} i_{cap} = \frac{1}{C} (1-D) i_{FC} - \frac{v_{iDC}}{CR_{load}} \quad (1)$$

$$\frac{di_{FC}}{dt} = \frac{1}{L} (v_{FC} - (1-D) v_{iDC}) = \frac{1}{L} (v_{FC} - v_1) \quad (2)$$

v_1 은 PWM 기간 중 평균 전압을, D 는 스위치 on duty, v_{FC} 는 연료전지시스템의 출력전압, 그리고 v_{DC} 는 컨버터의 출력전압을 나타낸다.

컨버터에 손실이 없다고 하면, 입력 전력, $P_{FC} = i_{FC} v_{FC}$ 는 컨버터의 출력전력, $P_{con} = i_{com} v_{DC}$ 와 같다. 그러면, 출력에서의 전류와 캐패시터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{con} = \frac{P_{FC}}{v_{DC}} = \frac{v_{FC} i_{FC}}{v_{DC}} \quad (3)$$

$$i_{cap} = i_{con} - i_{load} \quad (4)$$

$$i_{con} = \frac{v_{FC} i_{FC}}{v_{DC}} - i_{load} \quad (5)$$

이 식들은 2개의 상태변수, 즉 DC 링크 전압과 연료전지 전류 i_{FC} 를 가지는 2차 선형 시스템 다른 선형 시스템을 나타낸다.

2.2 Control of DC/DC Converter

그림 3는 DC/DC 컨버터의 컨트롤 block diagram을 나타낸다. 전압제어 루프에는 전압의 변동에 있어서 동특성 제어를 증가하기 위해 feed forward 제어기가 도입

되었다. 이는 reference voltage를 변조를 위한 reference로 직접 전달한다.

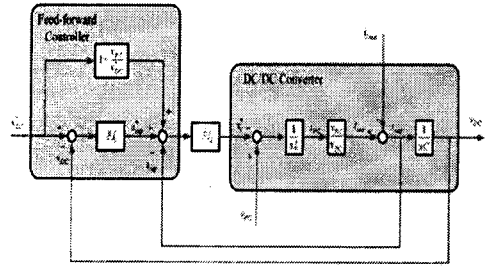


그림 3. DC/DC converter 제어 블록 다이어그램

전류 loop에는 PI 제어가 사용된다. 특히, 이 loop의 제어 변수는 캐패시터의 전류이다. 이는 궁극적으로 DC 전압의 제어를 완벽하게 제어한다. 그러므로 캐패시터 전류가 출력전류와 부하단 전류의 사이에서 다른 값을 갖는 경우, 부하 전류의 동특성을 고려할 필요성이 있다. 그러므로 그림 3에서 보이는 바와 같이 부하 전류가 추가된다. 이 제어에 대한 수식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_1^* = - \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) (i_{cap}^* - i_{cap}) + v_{FC} \quad (6)$$

$$i_{cap}^* = \left(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) (v_{DC}^* - v_{DC}) \quad (7)$$

특히, 전류 loop의 이득은 부하의 변화에 대한 동적응답이 가능하도록 충분히 높게 하여, 페루프 대역폭이 증가하도록 설계되었다.

반대로 전압 loop의 이득은 전원으로서 연료전지의 느린 동특성을 고려하여 설계되었다.

$$G(s)_{closed\ loop} = \frac{v_{DC}}{v_{DC}^*} \Big|_{i_{load}=0} = \frac{G_1 + G_2}{\Delta} \quad (8)$$

$$\Delta = LCs^4 + K_{p2}C(1-D)s^3 + (K_{p1}K_{p2} + K_{i2}C)(1-D) + (K_{p1}K_{i2} + K_{p2}K_{i1})(1-D)s + K_{i1}K_{i2}(1-D),$$

$$G_1 = K_{p2}K_{p2}(1-D)s^2 + (1-D)(K_{p1}K_{i2} + K_{p2}K_{i1} + K_{i1}K_{i2}(1-D)),$$

$$G_2 = D(1-D)K_{p2}s^2 + D(1-D)K_{i2}s.$$

2.3 Simulation and Analysis

다음은 본 논문에서 수행한 연료전지 시스템 DC/DC 컨버터의 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

TABLE I: SIMULATION PARAMETERS

DC/DC CONVERTER			
PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
Switching frequency	20 KHz	V_{DC}	400 V
C_{in}	350 μ F	C	1500 μ F
L	240 μ H	R_{load}	50 Ω
IGBT forward voltage	1 V	IGBT turn off current tail time	$4*10^{-6}$ sec
IGBT ON resistance	0.017 Ω	Diode ON resistance	0.013 Ω
Diode forward voltage	0.8 V	Calculation step size	$1*10^{-6}$ sec

연료전지 시스템은 전압우언 제어 블록에 연결되어 있으며 이때 인덕터의 전류는 연료전지 스택의 reference 전류로 설정된다. 따라서 출력 전압은 이전에 설명된 바와 같이 동작한다.

그림 4는 컨버터 입력으로 사용되는 PEM fuel cell의 출력 전압을 나타내며, 그림 5는 컨버터의 출력 전압과 출력 전류를 나타낸다.

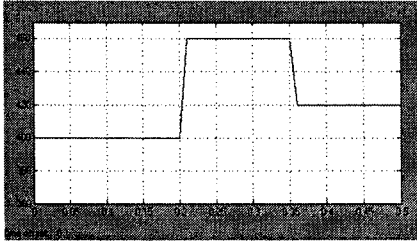


그림 4. PEM fuel cell의 출력 전압 (DC/DC converter 입력 전압)



그림 5. DC/DC converter 출력 전압/전류

3. 결 론

본 논문은 부하 변동 등으로 발생하는 PEM fuel cell의 불안정한 전압에 대한 전력 시스템의 DC/DC 컨버터와 제어회로를 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 스위치를 가지는 PWM DC/DC 컨버터를 개발하였다. 전류 loop에 사용된 PI 제어 변수는 캐패시터의 전류이다. 캐패시터 전류가 출력전류와 부하단 전류의 사이에서 다른 값을 갖는 경우, 부하 전류의 동특성을 고려할 필요성에 의해 보이는 바와 같이 부하 전류가 추가된다. 결국, DC 전압의 제어를 완벽하게 제어함을 보였다.

향후, 연료전지의 비선형적 해석과 함께 시스템의 각 구성 요소가 집적된 통합 시스템의 모델링이 수반되어야 할 것으로 보여진다.

[참 고 문 헌]

[1] P. Moraal and I. Kolmanovsky, "Turbocharger Modeling for Automotive control Applications," SAE Paper 1990-01-0908.
 [2] A.J. Forsyth, S. V. Mollov, "Modeling and control of DC-DC converters," Power Engineering Journal, vol. 12, Issue 5, pp. 229-236, Oct. 1998.

[3] B. Baha, "Modeling of resonant switched-mode converters using SIMULINK," IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 145, No. 3, pp. 159-164, May 1998.
 [4] D. Logue, P. T. Krein., "Simulation of electric machinery and power electronics interfacing using MATLAB/SIMULINK," The 7th Workshop on Computers in Power Electronics, pp. 34-39, July 2000.
 [5] Laurencelle, F., Chahine, R., Hamelin, J., Agbossou, K., Fournier, M., Bose, T. K., Laperriere, A., "characterization of a Ballard MK5-E proton exchange membrane fuel cell stack," Fuel Cell Journal, 1(1), pp. 66-71, 2001.