

연료전지 동특성 개선을 위한 Boost 컨버터 제어기 모델링

이화진\*, 한경희\* 김나영\* 백수현\*  
 동국대 전기공학과\*

The Modeling of Boost Converter Controller for Dynamic Characteristics of PEM FC

H.G Lee\*, K.H Han\*, N.Y.Kim\*, S.H Baek\*  
 Dongguk University Electric Dept\*

**Abstract** - 본 논문에서는 연료전지 동특성 개선을 위한 Boost컨버터 제어기를 모델링하였다. 전류형 DC/DC컨버터 회로에 PI제어기를 채용하여 전류 loop의 이득과 부하의 변화에 대한 동적응답이 가능하도록 충분히 높게 하여, 페루프 대역폭이 증가하도록 설계하였으며, 전압 loop의 이득은 전원으로로서 연료전지의 느린 동특성을 고려하여 설계되었다.

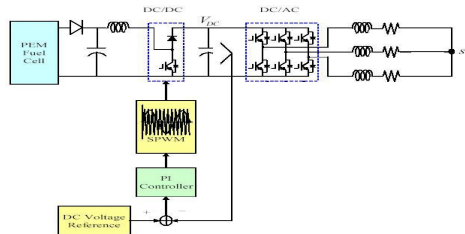
1. 서 론

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(over-potentials) 때문이다. 그래서 연료전지는 전압원으로 분류한다.

일반적인 Combined Heat and Power Generation(CHPG)는 개질기를 비롯한 연료전지 전력공급시스템, DC/DC 컨버터와 DC/AC 컨버터와 함께 저장장치가 포함되어 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 전력의 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 system



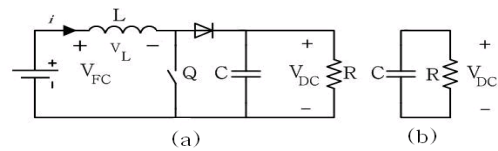
<그림 1> Fuel cell 전력시스템

DC/DC 컨버터 연료전지 전원시스템의 대표적인 기계구성을 그림 1에서 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 인덕터의 전류가 연속적이라는 가정하에 컨버터의 동작이 컨덕션 모드로 제한되는 경우, Boost를 사용한 DC/DC 컨버터는 두 개의 식 (1)과 (2)에 묘사되어진다.

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

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

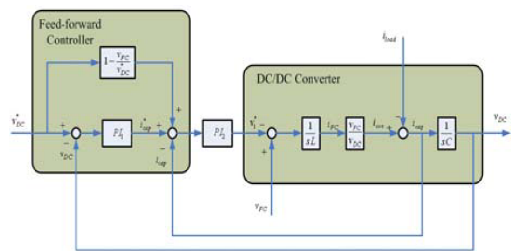
현재 모델에서 사용하고 있는 Boost컨버터회로를 그림 2 (a)에 간략하게 나타내 보았다.



<그림 2> Boost 컨버터의 회로

DC-DC컨버터는 출력전류가 아주 작은 경우, 인덕터의 값이 충분하지 못할 경우, 시비율 D가 매우 작을 경우에 인덕터의 전류가 불연속 파형으로 나타나는 전류 불연속 모드가 존재하게 된다. 본 모델에서 시비율 D가 불안정하므로 전류불연속모드 특성 해석에 상태 공간 평균화법을 적용하기로 한다. 위의 Boost 컨버터의 전류불연속모드 등가회로그림 2의 (b)는 전류 불연속 기간, 즉 주 스위치 및 환류 다이오드가 모두 차단인 회로 상태를 나타낸다. 이 구간의 위의 식 (1),(2)에서 나타내어지는 1-D 구간에 해당된다.

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

$$v_1^* = -(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s})(i_{cap}^* - i_{cap}) + v_{FC} \quad (3)$$

$$i_{cap} = (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s})(v_{DC}^* - v_{DC}) \quad (4)$$

특히, 전류 loop의 이득은 부하의 변화에 대한 동적응답이 가능

하도록 충분히 높게 하여, 페루프 대역폭이 증가하도록 설계되었다. 반대로 전압 loop의 이득은 전원으로 연료전지의 느린 동특성을 고려하여 설계되었다.

power source :

$$G(s)_{closed\ loop} = \frac{v_{DC}}{v_{DC}} \Big|_{v_{ind}=0} = \frac{G_1 + G_2}{\Delta} \quad (5)$$

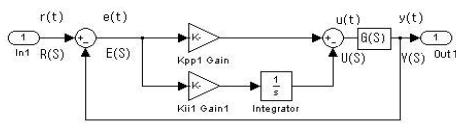
,where

$$\Delta = LCs^4 + K_{p2}C(1-D)s^3 + (K_{p1}K_{p2} + K_{i2}C)(1-D)s^2 + (K_{p1}K_{i2} + K_{p2}K_{i1})(1-D)s + K_{i1}K_{i2}(1-D),$$

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

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

## 2.2 Decision of PI gain



<그림 4> PI block diagram

그림 4는 DC/DC 컨버터의 제어를 도와주는 PI컨트롤 block diagram을 나타냈다. 식 (4)에서 보여주는 전류 loop에는 PI 제어기가 사용되었다. 비례분제어(PI)란, 오차신호를 적분하여 제어신호를 만들어내는 적분제어를 비례제어에 병렬로 연결하여 사용하는 제어기법을 말한다.

오차신호와 제어신호 사이의 전달함수로 표시되는 PI제어기의 전달함수는 다음과 같은 꼴로 나타난다.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p(s + K_i/K_p)}{s} \quad (7)$$

여기서  $K_p$ 는 비례계수  $K_i$ 는 적분계수라 한다. PI의 제어신호는 다음과 같다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (8)$$

위의 그림에서 제어대상 플랜트의 전달함수가 2차시스템으로 주어졌다고 하면,

$$2차\ 시스템\ G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n} \quad (9)$$

$\zeta\omega_n$ 은 상수로서  $K_p=1$ ,  $K_i=0$  일 때, 페루프 시스템의 감쇠비와 고유진동수가 된다. 2차 시스템을 제어대상으로 하여, PI 제어기로 구성된 페루프 제어시스템의 개루프 함수는 다음과 같다.

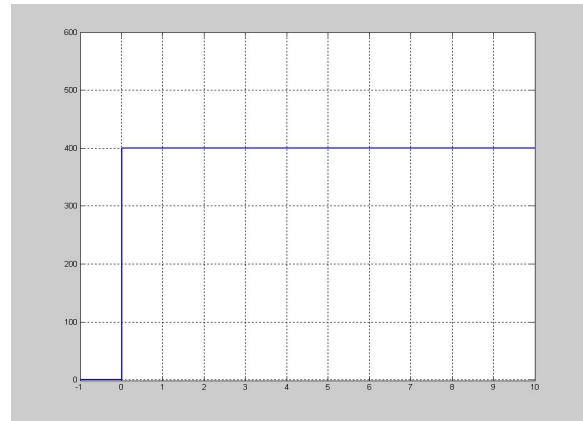
$$L(s) = G(s)C(s) = \frac{\omega_n^2(K_p s + K_i)}{s^2(s + 2\zeta\omega_n)} = \frac{\omega_n^2 K_p (s + K_i/K_p)}{s^2(s + 2\zeta\omega_n)} \quad (10)$$

개루프 전달함수에서 볼 수 있듯이, PI제어기  $C(s)$ 는 플랜트 함수  $G(s)$ 에 영점  $s = -z = -K_i/K_p$ 과 원점  $s=0$ 에 극점을 하나씩 첨가하는 역할을 한다. PI제어에 적분제어가 들어있으므로써 시스템의 정상상태 오차가 한 차수만큼 개선된다. 즉, 정상사에 오차가 상수인 경우의 시스템을 적분제어는 정상상태 오차를 0으로 만든다.

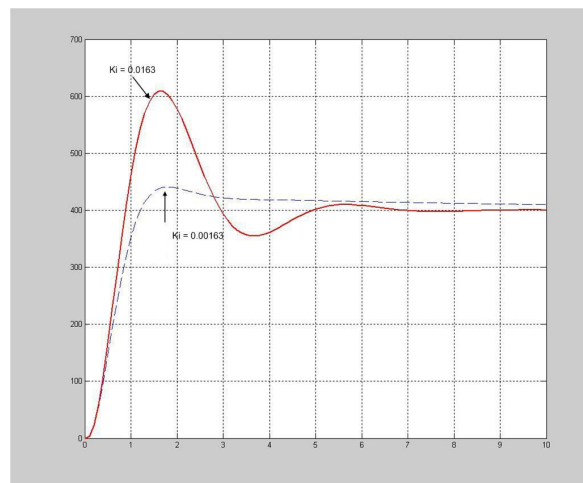
## 2.3 Simulation and Analysis

그림 4의 PI제어기중 gain값 중 전압 loop를 개선하여 PI제어기의 적분이득  $K_i$ 값을 임의 값으로 바꾸어가며 실행시켰다. 그림 5은 PI제어를 조절하기 위한 입력으로 사용되는 파형 그래프이다. 그림 6은 적분이득  $K_i$ 값을  $z = K_i/K_p = 0.1$ 의 영점을 고정시킨 상태로 변화시켰을 때의 그래프이다.  $K_i=0.0163$ 일 때 게인 값의 변동이 커 출력 값이 불안정함을 보였다. 반면  $K_i=0.00163$ 일 때 오버슈트도 낮고 입력 값과 큰 차이가 없음을 보였다. 즉. 그림6의 그래프는 기존의 전압 값은  $K_i$ 가 작을수록 초과는 줄어들지만

응답속도와 정착시간이 느려지며, 이 계수가 커질수록 응답속도는 빨라지나 초과가 커지게 된다는 것을 보여준다.



<그림 5> PI제어를 조절하기 위한 입력 파형



<그림 6> 적분이득  $K_i$  값을 변화시킨 후의 PI제어의 출력

## 3. 결 론

본 논문은 부하 변동 등으로 발생하는 PEM fuel cell의 불안정한 전압에 대한 전력 시스템의 DC/DC 컨버터와 PI제어회로를 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 전류 loop에 사용된 PI 제어변수는 캐패시터의 전류이다. PI제어기를 써서 캐패시터 전류가 출력전류와 부하단 전류의 사이에서 다른 값을 갖는 경우, 부하전류의 동특성을 고려할 필요성에 의해 보이는 바와 같이 부하전류가 추가된다. 결국 부분적인  $K_i$ 적분 이득 값 제어에는 성공하였지만 향후, 연료전지의 비선형적 해석과 함께 시스템의 각 구성 요소가 집적된 통합 시스템의 모델링이 수반되어야 할 것으로 보여 진다.

### [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. Molloy, "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] Laurence, 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.