

연료전지 시뮬레이터를 이용한 PCS 하드웨어 설계 기법

김종수, 최규영, 강현수, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Design Methodology for Power Conditioning System using Fuel Cell Simulator

Jong-Soo Kim, Gyu-Yeong Choe, Hyun-Soo Kang, Byoung-Kuk Lee
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는, 연료전지 시뮬레이터를 이용한 연료전지용 전력변환기 하드웨어 최적설계기법에 대하여 기술한다. 이를 위해 고분자 전해질 연료전지 모델링을 수행하여 시뮬레이터를 구성하고, 이상적인 직류 전압원과 연료전지 전원 인가에 따른 부스트 컨버터의 동작을 이론적으로 해석하고 시뮬레이션을 통해 이론의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

연료전지 발전시스템은 지구 온난화 문제, 제한된 화석연료 문제 그리고 최근 급격한 국제유가상승의 대안 중 하나로 이에 대한 연구개발이 꾸준히 수행되고 있다. 특히 국내에서도 수소·연료전지 산업화를 위해 정부 주도하의 가정용 연료전지 모니터링 사업이 활발히 진행되면서 다양한 시스템 운전 데이터가 구축되고 있다 [1]. 모니터링 사업을 통해 수집된 다양한 고장의 이유 중 PCS에 의한 고장도 발생되고 있으나 고장의 원인은 명확히 분석되지 못하고 있다.

연료전지는 스택 내부의 전기화학반응과 주변장치 (Balance of Plant, BOP)의 특성으로 인해 고유의 비선형성과 동특성을 갖는다. 때문에 신뢰성 높은 연료전지용 PCS 설계를 위해서는 이에 대한 정확한 이해와 전원 특성 모델링이 요구된다. 또한 이를 기반으로 기존의 이상적인 dc 전압원 대신 PCS의 입력조건으로 활용할 수 있는 연료전지 시뮬레이터 개발이 반드시 필요하다. 따라서 현재까지 PCS 설계를 위한 연료전지 전원 특성 모델링에 대한 다양한 연구가 수행되었다. Ballard Mark V, SR-12 Modular 고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC) 및 고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)의 동특성에 대한 모델링이 수행되었다 [2],[3]. 이러한 연구 결과는 각 연료전지의 특성은 잘 나타내 주지만, PCS 설계 측면에서 고려해야 할 사항에 대해서는 분석하지 않았다.

따라서 본 논문에서는, 상온동작이 가능하고 가정용, 운송용 및 휴대용 전원으로 주로 사용되는 PEMFC의 전원특성을 분석하여 Matlab Simulink로 시뮬레이터를 구성하였다. 또한 이상적인 직류 전압원과 PEMFC 전원 차이에 따른 부스트 컨버터의 하드웨어의 설계 기법 차이에 대하여 이론적 분석을 수행하였고, 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 이론적으로 분석된 연료전지용 부스트 컨버터 하드웨어 설계 기법의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 PEMFC 특성 분석

PEMFC의 반응물과 생성물의 화학에너지는 깁스 자유에너지로 설명할 수 있으며 고열가 (Higher Heating Value, HHV)를 기준으로 한 이론적 한계전압은 25°C에서 1.229V이다. 또한 비표준상태에서 연료전지의 동작조건에 따른 이론적인 전압은 네른스트 (Nernst) 방정식에 의해 설명 가능하다. 그러나 실제의 경우 전압 손실이 존재하기 때문에 네른스트 방정식에 의한 전압보다 낮고 비선형적인 전압이 출력되며, 이러한 손실은 크게 네 가지로 구분된다. 첫째는 연료손실이며 수소가 이온화되지 못하고 전해질 막을 직접 통과해 발생되고, 이로 인해 이론적인 적극전위보다 항상 낮은 전압이 출력된다. 둘째는 반응을 위해 일정한 에너지가 소모되어 발생하는 활성화 분극, 셋째는 전해질의 이온 이동저항과 전자 이동 저항에 의해 발생하는 저항분극이 존재한다. 마지막으로 전류밀도가 급격히 증가할 경우 반응물과 생성물의 확산 속도차이에 기인한 농도분극이 발생된다. 식 (1)은 단위 셀의 운전전압을 나타낸다 [4].

$$V_{cell} = E - (i + i_n)r - \frac{RT}{\alpha nF} \ln\left(\frac{i + i_n}{i_o}\right) + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i + i_n}{i_L}\right) \quad (1)$$

여기서, i_n 은 내부전류, R 은 가스상수 (8.3144 J/mokK), T 는 절대온도 (K), α 는 전이계수, n 은 반응에 참여한 물 수, F 는 페라데이 상수 (96.485 C/mol), i_o 는 교환전류밀도, i_L 은 제한전류밀도를 나타낸다.

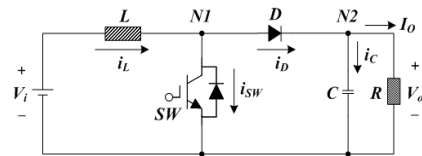
또한 연료전지는 급격한 전류밀도 변화에 따라 출력전압이 급격히 감소 후 지수함수적으로 정상상태까지 회복되는 동특성을 갖는다. 순간적

인 전압강하의 크기는 연료전지 특성 및 전류밀도변화량에 따라 다르지만, 수소직입형 Ballard NEXA 1.2kW PEMFC의 경우 300W 부하의 스텝 변화 시 약 15V의 순간적인 전압강하가 발생된다. 이러한 동특성은 일반적으로 '전하 이중층 (Charge Double Layer)' 현상으로 설명되며 식 (2)와 같이 RC 시상수로 표현가능하다 [2].

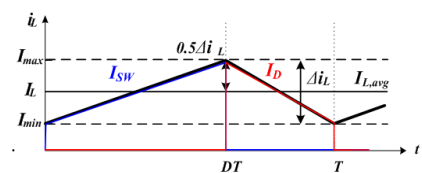
$$\tau = \frac{V_{act} + V_{con}}{i_{FC}} \quad (2)$$

2.2 일반적인 부스트 컨버터의 하드웨어 설계 기법

그림 1은 부스트 컨버터 회로도를 나타내고, 그림 2는 일반적인 직류 전압원이 인가된 경우의 부스트 컨버터의 인덕터 전류 파형을 나타낸다.



〈그림 1〉 부스트 컨버터 회로도



〈그림 2〉 일반적인 부스트 컨버터의 인덕터 전류파형

인덕터 전류 (i_L)의 상승 기울기 및 하강 기울기는 식 (3)과 같다.

$$\frac{di_{L,R}}{dt} = \frac{V_i}{L}, \quad \frac{di_{L,F}}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (3)$$

N1에서 KCL을 적용하면, 스위치 전류 (i_{SW})는 인덕터 전류 상승구간과 동일하고 다이오드 전류 (i_D)는 인덕터 전류 하강구간과 동일하며, 스위치 및 다이오드 양단에는 출력전압 (V_o)이 인가된다.

N2에서 KCL을 적용하면, Capacitor Charge Balance에 의해 다이오드 전류의 교류성분만 커패시터로 흐르게 되며 이 전류의 실효값은 식 (4)와 같다 [5].

$$i_{c,rms} = I_{o,max} \sqrt{\frac{D_{max}}{D_{min}}} \quad (4)$$

2.3 연료전지 특성을 고려한 부스트 컨버터 하드웨어 설계 기법

일반적인 직류 전압원 대신 연료전지 전원이 인가되면 동일한 부하변화에 대해서 전압이 감소하기 때문에 듀티비가 증가한다. 정격전력에서의 연료전지 전압을 $V_{f,c,r}$ 이라 하면 듀티비는 식 (5)로 결정된다.

$$D = 1 - \frac{V_{f,c,r} - V_{dd}}{V_o} = D \cdot \frac{V_o - V_{f,c,r} - V_{dd}}{V_o - V_i} \quad (5)$$

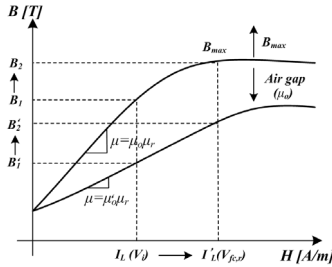
여기서, V_{dd} 는 연료전지 동특성으로 인한 순간적 전압강하를 나타낸다. 정격부하조건에서 인덕터의 상승 기울기는 감소되고 하강 기울기는 증가되어 식 (6)과 같이, 전류 변화량 (리플)은 감소된다.

$$\frac{di_{L,R}}{dt} = \frac{V_{f,c,r} - V_{dd}}{L}, \quad \frac{di_{L,F}}{dt} = \frac{(V_{f,c,r} - V_{dd}) - V_o}{L} \quad (6)$$

즉, 연료전지용 부스트 컨버터의 인덕턴스는 일반 부스트 컨버터와 동일하게 사용해도 무관하다. 그러나 연료전지의 경우 식 (5)와 같이 듀티비가 증가하기 때문에, 손실을 무시하면, 인덕터의 평균전류는 식 (7)과 같이 증가하게 된다.

$$I_{L,avg} = \frac{1}{1-D} I_o \quad (7)$$

때문에 그림 3과 같이 인덕터의 평균전류 증가를 고려하여 자속 포화가 발생되지 않도록 최대자속밀도가 큰 코어를 사용하거나 갭을 넣어 투자율을 조정해야한다. 갭이 너무 크면 누설자속 증가와 권선증가로 인한 동손이 증가하며 너무 작으면 포화되기 쉬우므로 상호절충이 필요하다.



〈그림 3〉 인덕터 B-H 곡선

스위치 전류는 인덕터 전류 상승구간과 동일하며 식 (8)과 같다.

$$I_{sw} = \frac{I_o}{D} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (8)$$

전압강하 및 동특성에 의한 전류상승을 고려하여, 반도체 스위치의 손실에 의한 접합부 온도가 125°C가 넘지 않도록 소자를 선정하고 방열설계를 해야 한다. 특히, 전류 변화량 증가에 따라 접합부의 온도 변동율이 커지면 접합부 열화로 인해 스위치 수명이 감소될 수 있으므로 충분한 마진을 고려해야 한다.

스위치 전압은 식 (9)와 같고, 스위칭 온-오프 속도가 동일할 경우, 스위치 전류의 기울기 증가를 고려하여 RBSOA (Reverse Bias Safety Operation Area)를 넘지 않도록 전압정격 마진을 충분히 확보해야 한다.

$$V_{DS} = V_o + L_s \frac{di_L}{dt} \quad (9)$$

다이오드 전류는 인덕터 전류 하강구간과 동일하며 식 (10)과 같고, 스위치와 동일하게 연료전지의 비선형성 및 동특성을 고려하여 전압, 전류 정격을 설계해야 한다.

$$i_D = \frac{I_o}{(1-D)} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (10)$$

식 (10)의 다이오드 전류의 교류성분은 커패시터로 충·방전되는 리플 전류가 된다. 즉 일반적인 직류전압원이 인가된 경우와 달리 연료전지 특성으로 인해 커패시터의 리플전류도 식(11)과 같이 증가한다.

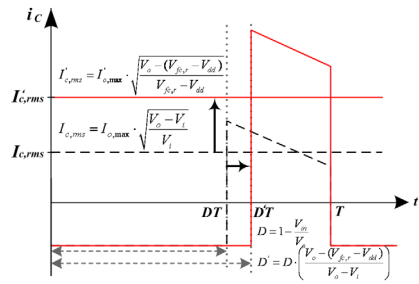
$$I_{c,s} = I_{o,max} \sqrt{\frac{V_o - (V_{f,c,r} - V_{dd})}{V_{f,c,r} - V_{dd}}} \quad (11)$$

그림 4는 커패시터 리플전류 변화를 나타내며, 커패시터의 손실은 리플전류 실효값의 제곱에 비례하여 증가되고 이에 따른 온도상승으로 인해 기대수명이 급격히 감소된다. 일반적으로 전력변환시스템에서 커패시터의 수명이 가장 짧기 때문에 시스템의 신뢰성 향상을 위하여 정확한 손실 분석을 통한 기대수명 산출로 커패시터를 설계해야 한다.

2.4 시뮬레이션

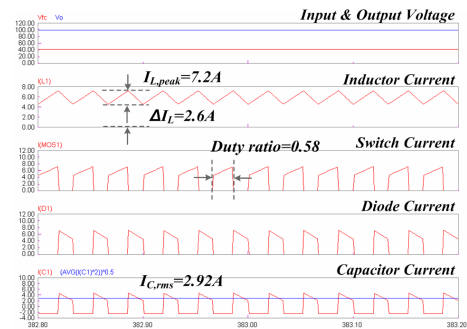
연료전지 비선형 및 동특성에 적합한 부스트 컨버터 하드웨어 설계의 이론 전개에 대한 타당성 검증을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Matlab Simulink를 이용하여 연료전지 시뮬레이터를, PSIM을 이용하여 dc-dc 컨버터를 구현 후 SimCoupler 모듈을 통해 연동 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 정격전력 250W, 이상적인 직류 입력전압 42V, 정격운전 시 연료전지 전압 26V, 출력전압 100V, 스위칭 주파수 30kHz 이다.

그림 5는 이상적인 직류 전압원 입력 시 각 부 전류 파형을 보여준다. 듀티비는 0.58이고 인덕터 전류 첨두값은 7.2A, 리플전류는 2.6A이다. 커패시터에 흐르는 리플전류의 실효값은 2.92A이다.

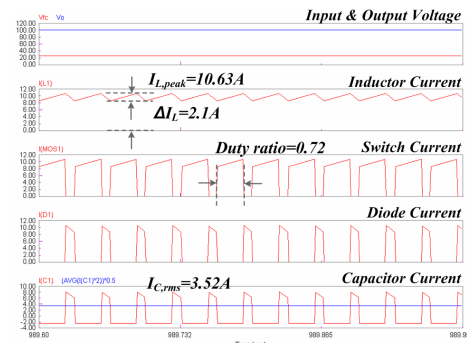


〈그림 4〉 커패시터 리플전류 변화

그림 6은 PEMFC 시뮬레이터를 적용한 시뮬레이션 파형이다. 듀티비는 0.72, 인덕터 전류 첨두값은 10.63A로 증가하였고 인덕터 리플전류는 턴-온 기울기 감소로 인해 2.1A로 감소되었다. 스위치 및 다이오드 전류는 7.2A_{peak}에서 10.63A_{peak}로 148% 증가하였고 실효값도 증가하였다. 이에 따라 전류정격을 결정해야 하며, 전류변화량 증가에 따른 스위치 열화특성을 고려하여 이 보다 큰 전류 정격을 갖는 스위치와 다이오드를 선정해야 한다. 또한 커패시터 리플 전류 실효값은 2.92A에서 3.52A로 120% 증가하였기 때문에 커패시터 내부 손실을 약 150% 이상 증가할 것으로 예측되므로 커패시터 선정에 유의해야 한다.



〈그림 5〉 이상적인 직류 전압원 입력 시 각부 파형



〈그림 6〉 연료전지 전원 입력 시 각부 파형

3. 결 론

본 논문에서는, 연료전지용 PCS의 최적 설계를 위해 PEMFC 출력특성을 모델링하고 시뮬레이터를 구성하였고, 이상적인 직류 전압원과 PEMFC 전원이 부스트 컨버터에 입력되었을 경우 하드웨어 측면에서의 특성 변화를 이론적으로 해석하고 시뮬레이션을 통해 해석의 타당성을 검증하였다. 분석결과는 연료전지의 출력 특성에 따른 컨버터 하드웨어의 최적 설계에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] <http://www.cleanfc.co.kr>
- [2] Jeferson M. Correa, Felix A. Farret, Luciane N. Canha, Marcelo G. Simoes, "An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 51, No. 5, pp. 1103-1112, 2004.
- [3] J. Padullas, G. W. Ault, J. R. McDonald, "An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation," Journal of Power Sources, vol. 86, Issue 1-2, pp. 495-500, 2000.
- [4] James Larminie, Andrew Diks, "Fuel cell system explained, 2nd ed.," JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002.
- [5] 김희준, "스위치모드 파워서플라이," 성안당, 2005.