

연료전지 시뮬레이션 모델을 이용한 FC-PCS 최적 설계기법

신승민, 김종수, 최규영, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Optimal Design Methodology of FC-PCS using Fuel Cell Simulation Model

Seung-Min Shin, Jong-Soo Kim, Gyu-Yeong Choe, Byoung-Kuk Lee
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는, 비선형 출력 특성을 가지는 연료전지를 시뮬레이터로 구성하고 이를 이용한 최적의 연료전지용 전력변환기(PCS) 설계기법을 기술한다. 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)를 모델링하여 시뮬레이터를 구성하고 이상적인 DC 전압원과 연료전지 전원 인가에 따른 특징을 이론적으로 해석한 후 시뮬레이션을 통해 이론적 타당성을 검증한다.

은 평형전위에서 각 분극으로 인한 손실을 뺀 전압으로 표현되고, 연료 및 산소의 압력과 여러 화학적 특성에 영향을 받아 결정된다. PEMFC 단위 셀의 비선형 출력 전압 방정식은 식(1)과 같다.

$$V_{cell} = E - (i + i_n)r - \frac{RT}{\alpha nF} \ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right) + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i + i_n}{i_L}\right) \quad (1)$$

1. 서 론

화석연료의 고갈, 대기 오염, 그리고 지구 온난화 문제들의 해결책중 하나로 연료전지가 부각되면서 이에 대한 연구 개발이 꾸준히 수행되고 있다. 연료전지는 전기화학반응으로 인한 발전 특성 때문에 고유의 비선형성 및 동특성을 갖는 직류 전압이 출력되기 때문에, 효율적으로 운영하기 위해서는 전원의 출력전압을 소비자가 원하는 형태로 변환해주는 PCS의 사용이 필요하다. 이 시스템을 효과적으로 설계하기 위해서는 연료전지의 출력 특성에 대한 정확한 이해와 전원 특성 모델링이 요구된다.

이러한 연료전지와 PCS의 상호 영향을 분석하기 위해서 실 제품 제작 전 각 시스템의 정확한 모델링에 기반을 둔 시뮬레이션 수행이 반드시 필요하다. 따라서 현재까지 연료전지 전원 특성 모델링에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 하지만 연료전지에 대한 비선형성 및 동특성에 대한 모델링 결과는 많지만, 이러한 연료전지 고유 특성이 PCS에 미치는 영향에 대한 연구는 많지 않다 [1][2].

따라서, 본 논문에서는 연료전지의 비선형성 및 동특성 출력특성으로 인한 전력변환 시스템의 특성해석을 위해 Ballard Nexa 1.2kW PEMFC를 모델링하고, Matlab Simulink로 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 이를 통한 전원과 이상적인 직류 전압원에 따른 부스터 컨버터의 스위치와 다이오드 설계 차이에 대한 이론적 분석을 수행하고, 시뮬레이션을 통해 이론적으로 분석된 연료전지용 부스터 컨버터 스위치와 다이오드 설계 기법의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 PEMFC 비선형성 및 동특성 분석

PEMFC는 화학에너지가 전기에너지로 변환하는 반응으로 출력전압을 깁스자유에너지 이론을 이용하여 표현할 수 있다. 이론적 한계 전위는 (Open Circuit Voltage, OCV)는 1.229V이고, 임의의 온도 압력에서 이론적 전극 전압은 반응물인 수소, 산소의 온도와 분압, 연료전지 작동 온도와 압력을 통해 결정되는 네른스트 식으로 설명 가능하다. 그러나 실제 연료전지 출력전압은 분극 현상에 의해 손실이 발생되기 때문에 네른스트 전압보다 항상 낮게 출력되며, 이러한 분극 현상에는 활성화분극, 농도분극, 저항분극 등이 있다. 즉, PEMFC 스택의 운전전압

여기서,

- i_n : 내부전류, R : 가스상수 (8.3144 J/mokK)
- T : 절대온도 (K), α : 전이계수
- n : 반응에 참여한 몰 수, i_0 : 교환전류밀도
- F : 페러데이 상수 (96,485 C/mol)

연료전지는 정상상태 특성과는 다르게 부하가 증가할 때 전압이 정상상태에 바로 수렴하지 않고 급격하게 감소하였다가 시간이 지남에 따라 정상상태로 회복된다. 이러한 동특성은 연료전지 단위 셀의 구조에 따른 전하 이중층 (Charge Double Layer) 현상과 BOP 시스템의 개질기, 가습기, 연료 및 공기 공급 모듈 등에서 생기는 물리적 지연으로 설명할 수 있고, 식(2)와 같이 RC 시상수로 표현가능하다 [3].

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

2.2 부스터 컨버터 스위치, 다이오드 설계

연료전지용 부스터 컨버터에 일반적으로 사용하는 이상적인 직류 전압원 대신에 비선형성과 동특성을 가지는 연료전원 전원이 인가되면 동일한 부하변화에 대해 입출력 전압비와 변화량이 커지므로 듀티비는 증가한다. 특히 부하의 변화량이 클 경우 그차는 더욱 심해진다. 듀티비를 나타내는 식은 식(3)과 같다.

$$D = 1 - \frac{V_{fc} - V_{dd}}{V_o} = D \cdot \frac{V_o - V_{fc} - V_{dd}}{V_o - V_i} \quad (3)$$

여기서,

- V_{fc} : 정격전력에서의 연료전지 전압
- V_{dd} : 연료전지 동특성으로 인한 순간적 전압 강하

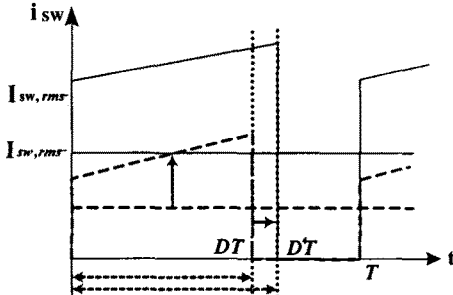
따라서 연료전지용 부스터 컨버터의 인덕터는 듀티비가 증가하기 때문에 흐르는 평균전류는 증가하게 된다 [4].

스위치에 흐르는 전류는 인덕터의 전류 상승 구간과 동일하며, 듀티비 변화에 따른 스위치에 흐르는 최대 전류는 식(4)와 같다.

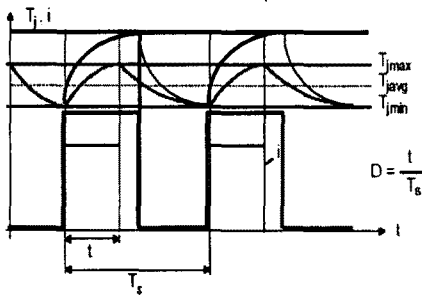
$$I_{sw,max} = \frac{I_{o,max}}{D_{min}} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (4)$$

그림 1은 인덕터의 전류 상승 구간의 듀티비 변화에 따른 스위치에 흐르는 전류 변화를 나타낸다.

반도체 스위치는 열적 임피던스가 동일하더라도 전류 변화량에 의해 열 스트레스가 증가한다. 즉, 연료전지의 비선형성 및 동특성에 의해 스위치에 흐르는 전류의 변화량이 증가하면 접합부 온도 변화량이 커지게 된다. 따라서 스위치를 설계 할 때 전류정격 및 접합부 온도 변화량을 고려해야 한다. 그림 2는 듀티비 변화에 따른 전류와 온도 변화량을 나타낸다.



<그림1> 스위치 전류 변화



<그림2> 전류 및 온도 변화량

스위치 전압은 스위치 특성, 게이트 전압 및 저항, 부유 인덕턴스 등일 동일한 조건에서 전류 기울기 증가로 변화량이 커지게 된다. 때문에 식(5)와 같이 회로내의 stray 인덕턴스와 전류 변화량에 의한 전압 오버슈트가 RBSOA (Reverse Bias Safety Operation Area)를 넘지 않도록 충분한 전압 마진을 고려해야 한다.

$$V_{DS} = V_o + L_s \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

다이오드에 흐르는 전류는 인덕터 전류 하강구간과 동일하며, 식(6)는 듀티비 변화에 따른 다이오드에 흐르는 최대 전류를 나타낸다.

$$I_{D,max} = \frac{I_{o,max}}{1 - D_{min}} + \frac{\Delta i}{2} \quad (6)$$

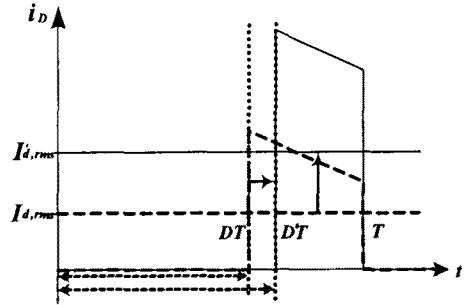
그림 3은 인덕터 전류 하강 구간의 듀티비 변화에 따른 다이오드에 흐르는 전류 변화를 나타낸다.

따라서 다이오드 또한 스위치와 같이 전류정격 및 접합부 온도 변화량을 고려해야 한다.

2.3 시뮬레이션

부스트 컨버터의 스위치와 다이오드 설계의 이론적 타당성 검증에 위해 시뮬레이션을 수행하였다. Matlab Simulink를 이용하여 비선형성 및 동특성을 가진 연료전지 시뮬레이터를, PSIM을 이용하여 풀브리지 컨버터를

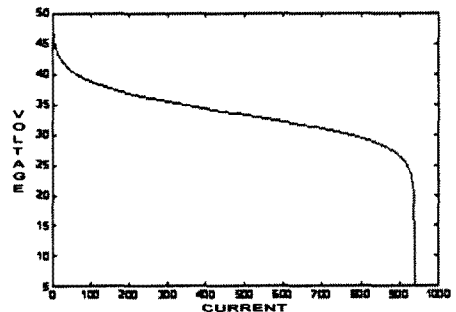
구현한 후 SimCoupler 모듈을 이용하여 연동 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 조건은 정격전력 1200W, 이상



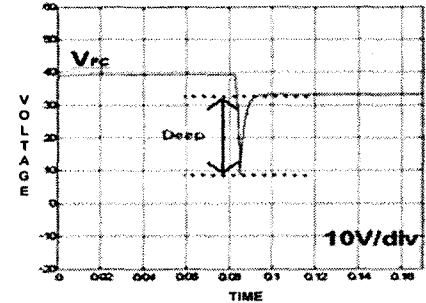
<그림3> 다이오드 전류 변화

적인 직류 입력전압 42V, 정격운전 시 연료전지 전압 34V, 출력전압 380V, 스위칭 주파수 60kHz 이다.

그림 4는 Matlab Simulink로 구성된 PEMFC모델의 비선형성 및 동특성을 나타낸다.



(a) 비선형성



(b) 동특성

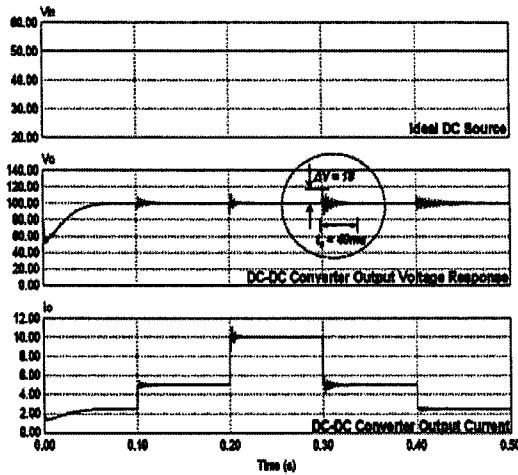
<그림4> PEMFC 특성

그림 5는 입력 전압원의 특성 차이가 존재할 경우, 부하가변에 따라 DC 링크 전압 응답 특성이 달라짐을 나타낸다. 이상적인 직류 전압원의 경우와 비교하여 연료전지의 비선형 전압원이 인가될 경우 Percent Overshoot 및 Settling time이 큰 차이를 보임을 나타낸다.

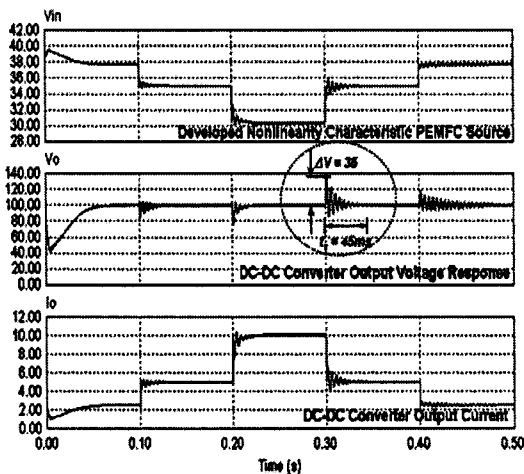
그림 6는 연동 시뮬레이션을 위해 PISM으로 구성된 전압형 풀브리지 컨버터와 단상 SPWM 인버터를 나타낸다.

그림 7은 이상적인 직류 전압원과 모델링된 PEMFC 시뮬레이터를 전원으로 인가시의 차이점을 보여준다. (a)는 이상적인 직류 전압원 입력 시 스위치 양단에 걸리는 전압 파형을 나타낸다. Overshoot 전압은 80V, $\Delta V = 35V$, 변동율은 77%가 나타난다. (b)는 모델링된 PEMFC 시뮬레이터를 적용했을 때 스위치 양단에 걸리는 전압 파형을 나타낸다. Overshoot 전압은 95V, ΔV

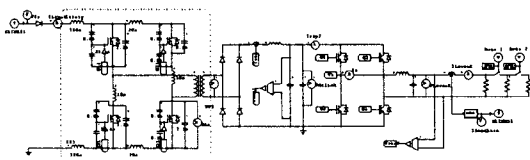
= 50V, 변동율은 111%로 나타난다. 또한 이상적 전압을 적용한 것에 비해 스위치 양단에 걸리는 Voltage Stress가 약 120%로 증가하였기 때문에 스위치 선정에 유의해야 한다.



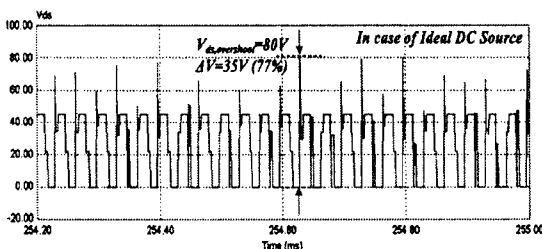
(a) 이상적 직류 전압원 적용시



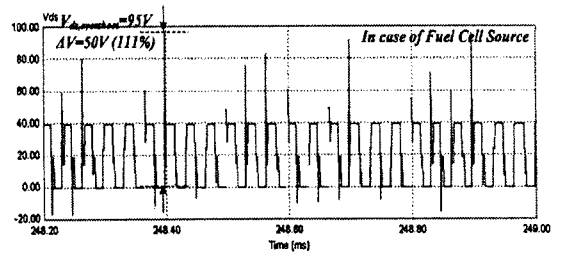
(b) 연료전지 시뮬레이션 모델 적용시
<그림5> DC 링크 응답 특성



<그림6> 시뮬레이션 Scheme



(a) 이상적 전압 인가시 스위치 전압



(b) PEMFC 전원 인가시 스위치 전압
<그림7> 전압 과도현상

3. 결론

본 논문에서는, DC-DC 컨버터에 사용되는 스위치와 다이오드 최적 설계를 위해 연료전지를 모델링하고 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 이상적인 직류 전압과 연료전지가 각각 부스트 컨버터에 적용 시 스위치와 다이오드의 특성 변화를 이론적으로 분석하고, 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다. 이 결과는 연료전지에 적용되는 DC-DC 컨버터의 스위치와 다이오드 설계 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] J. Padulles, 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.
- [3] 고정민, 김종수, 최규영, 강현수, 이병국, "부하의 변화를 고려한 연료전지 스택 동특성 모델링," 전기학회논문지(2007), v.58, no. 1, pp, 93-99, 2009년
- [4] 김종수, 강현수, 최규영, 이병국, "연료전지 시뮬레이터를 이용한 PCS 하드웨어 설계 기법," 대한전기학회 학술대회논문집, pp.1083-1084, 2008년