

연료전지 동특성 모델 기반 FC-PCS용 배터리 최적 설계

우동균, 고정민, 김종수, 이병국  
성균관대학교 정보통신공학부

Optimal design of FC-PCS battery based on fuel cell dynamic modeling

Dong-Gyun Woo, Jeong-Min Ko, Jong-Soo Kim, Byoung-Kuk Lee  
School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문은 연료전지의 동특성을 모델링하고 시뮬레이션 결과를 이용하여 시스템에서 에너지 보상 배터리의 최적화 설계 방법을 제안하였다. 다양한 전기화학방정식과 실제 연료전지의 측정 데이터를 기반으로 연료전지 모델링을 수행하고, 시뮬레이션 결과를 분석하여 시스템에서 요구되는 전력을 계산하여 배터리를 용량을 산정하였다.

1. 서 론

최근 몇 년간 지구온난화를 포함한 환경문제나 화석연료의 고갈 같은 에너지 문제가 대두되면서 친환경 에너지인 연료전지에 대한 연구개발이 이루어지고 있다. 다양한 연료전지 중에서도 70-100℃ 정도의 비교적 낮은 작동 온도 범위를 가지고 있고 짧은 시동시간과 반응시간을 가지는 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)가 가장 일반적으로 사용된다 [1].

PEMFC는 비선형 출력 특성을 가지고 있고 부하의 변화가 큰 경우에는 더욱 두드러진다. 부하가 급격히 증가하였을 때 큰 전압강하가 생기고 시간이 지나면서 지수적으로 정상상태로 회복된다. 이러한 동적 특성은 Charge double layer 현상과 연료전지 시스템에서 스택으로의 연료공급을 위한 기계적인 장치인 개질기, 블로워, 유체제어기, 가습기, 컴프레서, 솔레노이드 밸브에서의 물리적 지연에 의해 나타난다 [2]. 부하의 급격한 변화가 빈번히 발생할 때 전압의 강하현상으로 인해 연료전지의 출력전압이 일시적으로 차단 될 수 있으므로 배터리나 슈퍼 캐패시터 등의 에너지 보상 장치가 반드시 필요하게 된다. 에너지 보상장치의 용량은 연료전지와 부하의 관계에 따른 동특성을 고려하여 산정해야 한다.

이 논문에서는 연료전지 출력 전압의 강하현상과 회복현상을 표현하는 동특성 모델링을 수행하고 전력을 계산하여 에너지 보상 장치 설계 방법을 제안하고 배터리를 설계한다. 그리고, 연료전지와 배터리에 대한 이론적 해석과 시뮬레이션 결과, 실험 데이터의 비교 분석을 통해 제안한 방법을 검증한다.

2. 본 론

2.1 연료전지, 배터리 시스템

배터리는 그림 1과 같이 연료전지를 구동하는 전력변환기 (Power Conditioning System, PCS)와 함께 연료전지 출력을 제어하기 위해 병렬로 연결하여 사용된다. PCS에는 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터가 있고 연료전지의 출력을 사용자가 원하는 크기와 주파수, 위상을 가진 전력으로 변환시킨 후 공급하는 역할을 한다. 연료전지는 저전압 고전류의 에너지원이므로 전압을 상승시키는 풀브리지 컨버터와 배터리에 에너지를 충전하거나

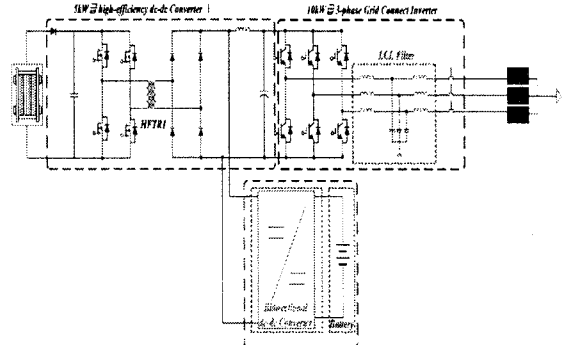
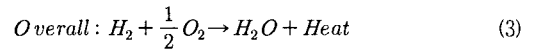
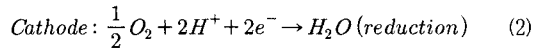
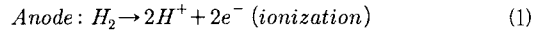


그림 1. 연료전지와 PCS, 배터리로 구성된 시스템

방전하는 양방향 DC/DC 컨버터가 필요하다.

연료전지의 스택 내부에서 전력을 생성하는 반응은 식 (1)-(3)과 같다. 수소와 산소를 이용하여 물을 만드는 과정에서 전류가 생성되고 전력이 발생한다.



연료전지의 이상적인 출력을 나타내는 깁스 자유 에너지를 이용한 네른스트 공식에서 스택내에서 발생하는 각 분극을 고려하여 실제 연료전지의 출력 전압을 나타내면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$V = E - (i + i_n)r - A \ln\left(\frac{i + i_n}{i_o}\right) + B \ln\left(1 - \frac{i + i_n}{i_L}\right) \quad (4)$$

여기서,  $A = \frac{RT}{\alpha nF}$ ,  $B = \frac{RT}{nF}$ ,  $i_L$ 은 제한전류밀도,  $i_o$ 는 교환전류밀도,  $i_n$ 는 내부전류밀도,  $i$ 는 전류밀도,  $R$ 는 가스 상수 (8.3144 J/molK),  $T$ 는 절대온도 (K),  $F$ 는 패러데이 상수 (96,495 C/mol),  $\alpha$ 는 전이계수,  $n$ 은 반응에 참여한 전자 수를 나타낸다.

전력을 생성하기 위해서는 스택과 PCS 외에도 연료전지의 출력 특성에 영향을 미치는 기계적인 요소인 연료전지 시스템이 필요하다. 시스템은 스택으로 공급되는 기체의 불순물을 제거하는 필터와 화학물질들로부터 수소를 발생하는 개질기와 기체를 스택에 공급하는 블로워

그리고 기체가 적절한 수분을 포함할 수 있도록 하는 가습기 등으로 이루어져 있다. 이러한 시스템에서 물리적인 지연에 의해 급격한 전압강하와 회복시간을 갖는 PEMFC의 동특성이 생긴다. 동적 특성은 연료전지 시스템의 물리적인 구조나 모양, 연료의 개질 방법 등의 다양한 요소들에 의해서 다르게 나타난다. 그러므로 수학적 접근과 정량화가 어렵고 실제 연료전지 스택을 이용하여 실험을 통해 데이터를 측정하여 파라미터를 얻어야 한다 [3].

## 2.2 실험 및 시뮬레이션

실험은 그림 2와 같이 Ballard Nexa 1.2kW PEMFC를 이용하여 MC (Magnet Connector)를 통해 400W 정격의 메탈클래이드 저항 부하를 연결하여 수행하였다. MC를 off 시킨 무 부하 상태에서 순간적으로 MC를 on 시켜서 300W의 부하를 인가하였다. 실험 결과는 그림 3과 같은 부하가 급격히 증가하였을 때, 전류는 0A에서 10A로 변화하였고, 전압은 10us에 19V 강하하였다가 시간에 지남에 따라 정상상태에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

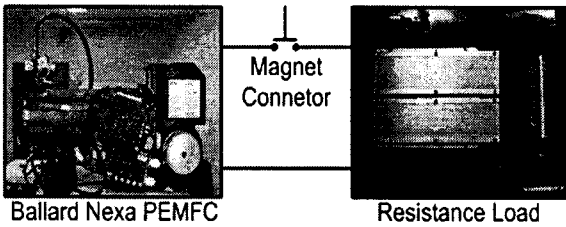


그림 2. 실험 세트

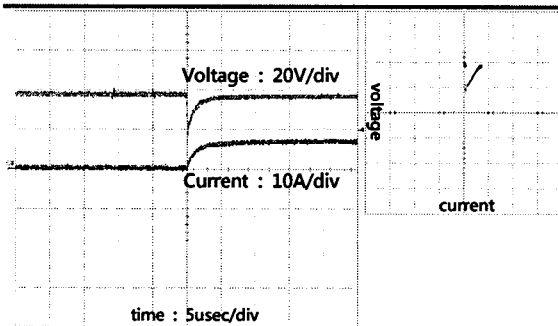


그림 3. 실험 결과 (0W → 300W, 0A → 10A)

그리고 V-I곡선을 통해 전력이 정상상태의 파형에서 벗어나 강하 현상을 보이는 것을 확인할 수 있다.

실험을 통해 전압의 동적특성을 확인하고 데이터를 통해 동적 특성 모델링을 수행하였다. 연료전지의 정상상태 모델링은 식 (4)에 의해 구현하였다.

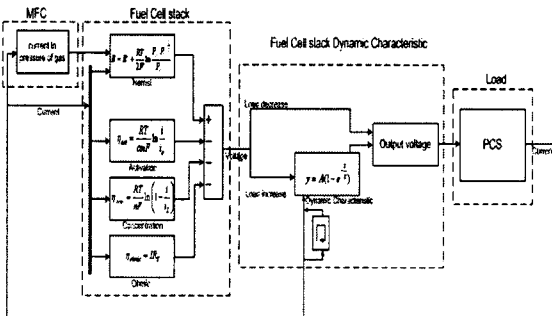


그림 4. 연료전지 모델 블록 다이어그램

동적 특성 모델링은 시스템에 따라 파라미터를 조정할 수 있도록 모델링 하였다. 모델의 블록 다이어그램은 그림 4와 같다. 시뮬레이션의 결과는 그림 5와 같고, 고안된 시뮬레이션 모델이 Ballard Nexa 1.2kW PEMFC의 실제 측정값과 일치하는 결과를 나타냄을 알 수 있다.

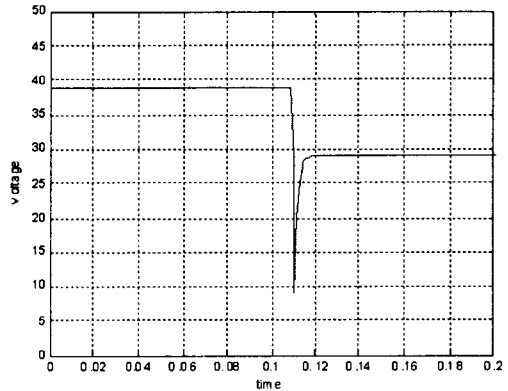


그림 5. 시뮬레이션 결과

## 2.3 배터리 용량 산정

연료전지를 사용할 때, 연료전지는 반응 속도가 느리기 때문에 부하가 급격하게 증가하였을 때, 효과적으로 전력을 공급해 줄 수 없으므로 필요한 전류를 공급하기 위해서 배터리나 울트라 커패시터 같은 이차적인 에너지 저장장치를 함께 사용한다. 그리고 연료전지는 에너지 저장능력이 없으므로 부하에서 쓰이지 않는 잉여 에너지를 저장하기 위해서도 배터리와 같은 보조 에너지 저장장치가 필요하게 된다. 또한 연료전지 스택이 제대로 동작하지 않을 시에도 배터리를 통해 에너지를 공급할 수 있다 [4]. 하지만 배터리는 높은 가격을 갖기 때문에 너무 큰 용량을 사용하면 경제적이지 못하고, 용량이 작으면 위에서 언급한 배터리의 역할을 제대로 수행하지 못한다. 그러므로 비용절감과 연료전지시스템의 효율적인 이용을 위해서 배터리의 용량에 대한 최적화 설계가 반드시 필요하게 된다.

배터리의 용량을 산정하는 데 있어서는 연료전지의 전압강하와 회복시간을 고려한 동특성을 파악하고 정상상태에 비해 부족한 전력을 계산하여 배터리의 용량을 부하와 PCS에 적합하도록 산정해야 한다. 그림 3의 실험 결과와 그림 5의 시뮬레이션 결과를 토대로 파형을 단순화하여 나타내면 그림 6과 같다.

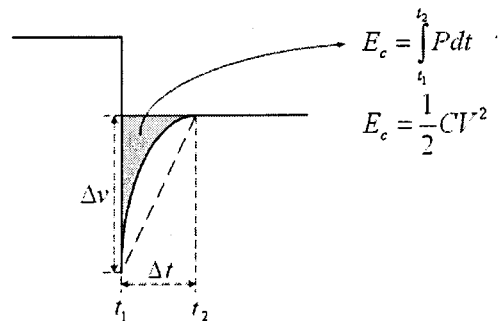


그림 6. 요구되는 배터리 에너지 계산

급격한 부하 변화가 요인으로 시간의 변화에 따른 전압의 변화 곡선은 그림 6의 점선과 같이 삼각형으로 간략화 될 수 있다. 배터리 용량은 전류와 시간을 곱한 형태로 나타내므로 정상 상태의 전압에 대비하여 부족한

전압을 계산하여 요구되는 배터리의 용량은 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$Ah = \frac{1}{V_b} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (5)$$

여기서,  $V_b$ 는 정상상태와 동특성에 의한 전압강하의 차이,  $t_1$ 은 전압강하가 일어난 시점 즉, 부하의 급격한 증가가 일어난 시점의 시간,  $t_2$ 은 전압이 정상상태로 수렴하는 시점의 시간,  $P$ 는 전력,  $Ah$ 는 배터리 용량의 단위이다.

### 3. 결 론

이 논문에서는 연료전지 실험을 수행하여 결과를 분석하여 파라미터를 추출하여 조정이 가능한 동특성 모델링의 변수로 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교하였으며, 이를 통해 배터리의 용량 산정 방법을 제시하였다. 이러한 방법을 이용하여 연료전지 시스템 설계 시 에너지 보상장치의 용량을 산정하여 최적의 설계가 가능할 것이 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] C. C. Chan, "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles," Proc. IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 704-718, April 2007
- [2] F. Ciancetta, A. Ometto, N. Rotondale, "Minimum supercapacitor choice to provide current step variation in FCPEM," International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP07), pp. 61-64, September 2007
- [3] 고정민, 김종수, 최규영, 강현수, 이병국, "부하의 변화를 고려한 연료전지 스택 동특성 모델링," 대한전기학회논문지, vol. 57, no. 9, pp. 1563-1571, 2008
- [4] 신재광, "연료전지 하이브리드 차량이 성능 해석 및 배터리와 울트라 커패시터를 이용한 제어 전략 최적화," 서울대학교 대학원 석사 학위 논문, 2005