

연료전지 과도특성 모델링 기반 FCEV용 배터리 용량 최적설계

고정민*, 김종수*, 이병국*, 이영국**

성균관대학교 정보통신공학부*, 현대자동차 하이브리드 설계팀**

Optimal Design of Battery in FCEV based on Fuel Cell Transient Model

Jeong-Min Ko*, Jong-Soo Kim*, Byoung-Kuk Lee*, Yeong-Kuk Lee**

School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University*

Hyundai Motor Company HEV system engineering team**

Abstract - 본 논문에서는 과도특성을 포함한 연료전지 모델을 입력전원으로 파라미터를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하고 DC전원 입력의 시뮬레이션 결과와 비교하여 과도특성이 부하 에너지와 공급 에너지의 불균형에 미치는 영향을 수치적으로 나타내었다. 또한, 자동차 주행 패턴으로부터 부하 수요 에너지를 유도하고 연료전지 모델과 PCS 연동 시뮬레이션 결과를 통해 배터리 용량의 최적설계기법을 기술한다.

1. 서 론

화석에너지 고갈과 환경오염 등의 사회적인 문제가 증가하면서 친환경적이고 에너지 효율이 높은 에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다. 친환경에너지의 하나로 연료전지가 대체 에너지원으로써 분산전원, 자동차의 전원 등으로 개발되고 있다 [1]. 자동차 동력 전원으로는 다양한 연료전지 중에서도 70-100°C 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. 그러나 연료전지는 반응속도가 느리고, 저장을 할 수 없다는 단점 때문에 단독으로 사용하기 힘들며, 배터리나 울트라 커패시터 등의 2차 전지를 보조 전원으로 사용하고 있다. 배터리는 가격이 높고 차량의 성능에 영향을 끼치므로 배터리의 효율적인 이용과 함께 적절한 용량 선정이 요구된다.

현재까지의 연구는 주로 전기자동차 (Electric vehicles, EV)용 배터리의 동작제어 방식이나 배터리 잉여 용량 예측에 대해 이루어지고 있는데, 양방향 DC/DC 컨버터를 연료전지와 배터리의 동작상태에 따라 buck, boost, shutdown 모드로 나누어 전력을 제어하는 방법이나 [2], 배터리의 온도와 방전수명에 의한 영향을 이용하여 잉여 용량을 예측하는 방법 등이 있다 [3]. 본 논문에서는 배터리 용량 선정을 중심으로 연구를 수행하였다. 배터리 용량 선정을 위해서는 주전원인 연료전지의 특성을 알아야 한다. PEMFC는 비선형 출력 특성을 가지고 있으며 부하의 변화가 큰 경우에는 전압의 강하가 생기는 과도특성이 나타나므로 연료전지에서의 전력공급이 일시적으로 차단 될 수 있다. 그러므로 에너지 보상장치의 용량은 연료전지와 부하의 관계에 따른 과도특성을 고려하여 산정해야 한다.

이 논문에서는 개발된 연료전지 과도특성 모델을 이용하여 회복시간과 전압강하량을 변화시키면서 시뮬레이션을 하여 과도특성에 따른 에너지 부족량을 계산하고 연료전지 과도특성의 영향을 수치적으로 나타내었다. 그리고 자동차 주행 패턴 Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS)에 따른 부하 에너지량을 계산하고 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 데이터를 분석함으로써 수요 에너지를 예측하여 배터리 최적 설계를 수행한다.

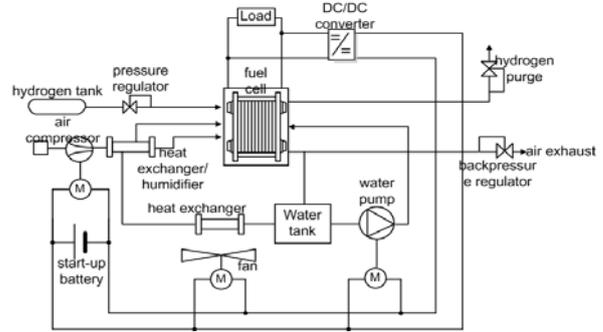
2. 본 론

2.1 연료전지 과도특성

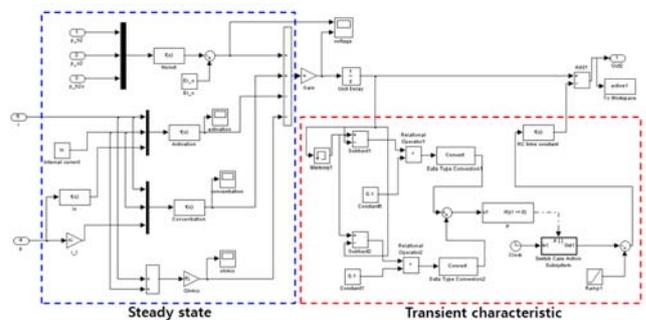
연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 과정을 통해 전력을 생산하므로 기체 자유에너지로부터 유도한 네른스트식에 의해 연료전지의 정특성 출력이 나타난다. 또한, 연료전지의 주변장치 (Balance of plant, BOP)에서의 물리적 지연현상에 의해 전압강하/회복시간 현상을 나타내는 과도특성을 보인다.

주변장치는 그림 1과 같이 메탄올, 가솔린 등의 연료로부터 수소를 개질하는 개질기나 기체의 압력을 조절해주는 유체제어기, 스택에 기체를 공급해주는 블로워 등으로 구성되어 있다 [4], [5]. 부하가 급격히 인가되면, 그에 따라 요구되는 기체가 유체제어기나 블로워, 밸브 등에서 물리적인 마찰에 의해 신속하게 공급되지 못하여 전압이 수직적으로 감소하였다가 시간이 지나 기체가 충분히 공급되면서 정상상태로 수렴하는 형태를 보인다 [6], [7]. 물리적 지연 현상은 시스템의 구조에 따라 변화

하여 수치적으로 정량화 할 수 없으므로 시스템마다 다른 특성을 표현할 수 있도록 전압의 강하 정도나 회복 시간을 변화시킬 수 있도록 해야 한다. 조정 가능한 파라미터를 포함한 모델링은 그림 2와 같이 구현할 수 있다.



〈그림 1〉 전체 연료전지 시스템 [8]



〈그림 2〉 연료전지 과도특성 모델

2.2 연료전지 과도특성에 따른 에너지 요구량

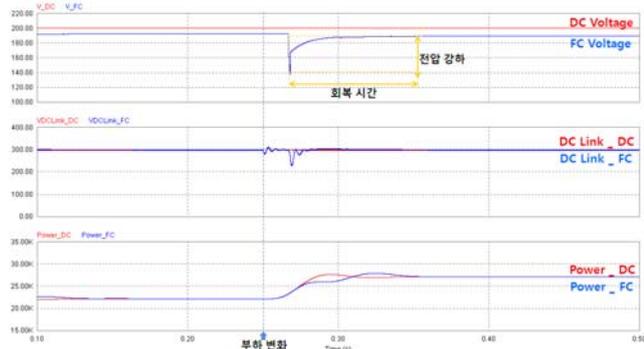
연료전지 과도특성이 에너지에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 2의 모델과 PCS모형을 연동하여 시뮬레이션 하였다. 부하의 변화는 0.25초에 인가하였으며 각 변수의 변화량은 표 1과 같다. 연료전지 모델에서 회복시간과 전압강하량을 조절하는 파라미터를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하고 DC 전원이 입력인 시뮬레이션 결과와 비교하여 과도특성이 에너지 요구량에 미치는 영향을 확인하였다. 시뮬레이션에서 표현된 전력을 간략화하고 각 전력을 시간 적분하여 각각의 에너지량을 계산하였다. DC 전원일때의 전력은 부하에서 요구하는 전력을 비교적 빠르게 공급하고 있으나 연료전지 모델의 경우 신속하게 공급하지 못하고 그림 3과 같이 전압강하와 회복현상에 의해 전력공급의 지연과 함께 DC Link의 왜곡이 생기는 것을 확인할 수 있다. 파라미터에 따른 에너지 요구량의 변화는 표 2와 같고 수학적 근사화식을 이용하여 도식화하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

〈표 1〉 시뮬레이션 파라미터

| 변수 | 22.53 kW | 27.05 kW |
|-------|-------------------------|-------------------------|
| 전력 변화 | 22.53 kW | 27.05 kW |
| 전류 변화 | 105.28 A _{rms} | 128.05 A _{rms} |
| 출력 전압 | 212.13 V _{rms} | 212.13 V _{rms} |

표2와 그림 4에서 확인할 수 있듯이 전압 강하량이 크고, 회복시간이 길어질수록 DC전원에 비해 부족 에너지량이 증가하는 것을 확인할 수

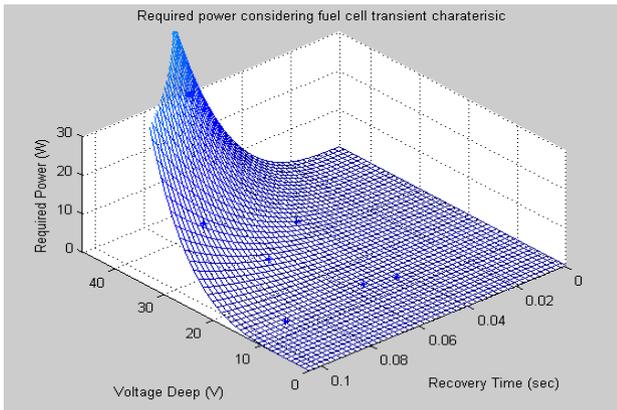
있고 이로써 연료전지의 과도특성에 의해 부하에서 필요로 하는 에너지를 효율적으로 공급하지 못한다는 것을 알 수 있다.



〈그림 3〉 연료전지와 DC전원의 시뮬레이션 결과

〈표 2〉 전압강하/회복시간에 따른 에너지 요구량

| 전압강하 | 회복시간 | 에너지요구량 |
|---------|-----------|------------|
| 12.67 V | 0.044 sec | 0.07823 W |
| 12.89 V | 0.089 sec | 0.16401 W |
| 14.08 V | 0.055 sec | 0.15100 W |
| 24.32 V | 0.073 sec | 4.38777 W |
| 25.75 V | 0.097 sec | 18.92530 W |
| 31.64 V | 0.031 sec | 2.63675 W |
| 46.87 V | 0.061 sec | 28.80332 W |



〈그림 4〉 전압강하/회복시간에 따른 에너지 요구량

2.3 FCEV 배터리 용량 설계

FCEV는 주전원인 연료전지 외에 배터리나 슈퍼커패시터 같은 이차 에너지 저장장치를 보조전원으로서 함께 사용한다. 연료전지는 반응 속도가 느리기 때문에 부하가 급격하게 증가하였을 때, 충분한 전력을 공급할 수 없으므로 배터리에서 필요한 전류를 공급하고 차량 급제동시나 부하 급감시의 회생되는 에너지를 저장한다. 또한 연료전지 스택이 제대로 동작하지 않을 시에도 배터리를 통해 에너지를 공급할 수 있다 [9]. 하지만 배터리는 높은 가격을 갖기 때문에 너무 큰 용량을 사용하면 경제적이지 못하고, 용량이 작으면 배터리의 기능을 제대로 수행하지 못한다. 그러므로 비용절감과 연료전지시스템의 효율적인 이용을 위해서 배터리의 용량에 대한 최적화 설계가 반드시 필요하게 된다.

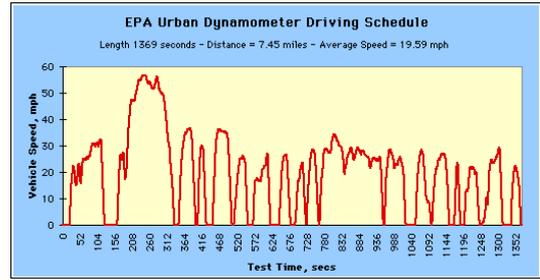
배터리의 용량은 연료전지의 과도특성에 의한 에너지 공급량과 부하에서 요구하는 에너지량과의 불균형 정도를 계산함으로써 부하와 PCS에 적합하도록 산정할 수 있다. 부하인 EV에서 원하는 에너지는 그림 5의 차량 주행 패턴으로부터 구할 수 있다. 초당 마일(Mile per second, Mph)의 단위로 표현되어 있는 주행패턴을 속도의 단위로 변환하여 주행 저항과 부하 저항, 등판저항을 구함으로써 부하 에너지를 구할 수 있고 식은 (1)-(3)과 같다.

$$F_d = m \cdot g \cdot m_{ue} \quad (1)$$

$$F_l = 0.5 \cdot A \cdot R_{ho} \cdot C_d \cdot v^2 \quad (2)$$

$$F_s = \sin(\theta) \cdot m \cdot g \quad (3)$$

여기서 m 은 차량중량, g 는 가속도, m_{ue} 는 회전저항계수, A 는 전면면적, R_{ho} 는 공기밀도, C_d 는 공기저항계수, v 는 속도, θ 는 등판각을 나타낸다.



〈그림 5〉 자동차 UDDS 주행패턴 [10]

차량 주행 시 부하에 필요한 에너지를 계산한 후 과도특성의 변수에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 4의 자료를 통해 분석하여 에너지 부족량을 알 수 있고 배터리의 용량은 식 (4)과 같이 산정할 수 있다.

$$Ah = \frac{1}{V_b} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (4)$$

여기서, V_b 는 배터리 전압, t_1 은 전력이 불균형이 생기기 시작하는 즉, 전압의 급격한 감소가 일어난 시점의 시간, t_2 는 전압이 정상상태로 수렴하여 전력이 균형을 이루는 시간, P 는 부하의 요구전력에서 연료전지가 공급하는 전력의 차, Ah 는 배터리 용량의 단위로 전력의 시간 적분 부분이 에너지의 부족분으로 표현된다. 시뮬레이션 결과를 통해 동일한 주행 패턴에서도 연료전지의 과도특성에 따라 배터리의 최적용량은 달라지는 것을 확인하였고 배터리 용량 선정 시에는 부하 전력 변화량과 함께 연료전지 특성에 대한 이해도 필요함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 FCEV용 배터리 용량의 최적설계를 위해서 연료전지 모델의 파라미터를 가변하면서 DC전원을 사용한 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해 과도특성의 에너지량에 대한 영향을 확인하고, 자동차 주행 패턴을 분석하여 부하 에너지를 유도하고 시뮬레이션을 통해 구한 데이터를 고려하여 배터리 용량의 최적 설계에 대한 연구를 수행하였다. 이 결과는 EV용 배터리 용량 설계 과정에서 부하변화와 연료전지 특성에 따른 근사적인 용량 예측을 가능하게 할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1] F. Blaabjerg R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006

[2] K. Jin, X. Fuan, M. Yang, and M. Xu, "A Hybrid Fuel Cell Power System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 4, pp. 1212-1222, Apr. 2009

[3] H. S. Park, C. E. Kim, C. H. Kim, G. W. Moon, and J. H. Lee, "A Modularized Charge Equalizer for an HEV Lithium-Ion Battery String," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1464-1476, May. 2009

[4] 김서영, 이대영, "PEM 연료전지의 운전장치 (BOP)," *설비저널*, 제34권, 제11호, 2005

[5] 민경덕, 김한상, 강상규, 하대훈, 김보영, "연료전지 운전 장치 개발 현황 및 소개," *유체기계저널*, 제9권, 제2호, 2006

[6] F.Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T.K. Beso and A. Laperriere, "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack," *Fuel Cells Journal*, vol 1, no. 1, pp. 66-71, 2001

[7] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou and J. peng, "Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System," *Proc. American Control Conference*, pp. 3117-3122, May 2002

[8] 고정민, 김중수, 최규영, 이병국, "연료전지 동특성 모델링 비교 분석," *전기학회춘계학술대회*, pp. 245-247, 2009

[9] 신재광, "연료전지 하이브리드 차량이 성능 해석 및 배터리와 울트라 커패시터를 이용한 제어 전략 최적화," *서울대학교대학원 석사 학위 논문*, 2005

[10] United States Environmental Protection Agency Web Page. [Online]. Available : <http://www.epa.gov>