

연료전지 과도 특성 모델링 기반 FCEV용 배터리 용량 최적 설계

논문
58-9-10

Optimal Design of Battery of Fuel Cell Electric Vehicle Based on Fuel Cell Dynamic Characteristic Model

고 정 민* · 김 중 수** · 이 영 국*** · 이 병 국†
(Jeong-Min Ko · Jong-Soo Kim · Young-Kuk Lee · Byoung-Kuk Lee)

Abstract - In this paper, methodology of battery optimal designing is proposed. Fuel cell model including dynamic characteristic is developed and load model is produced by considering driving schedule. Using these models, required energy of load and supplying energy from fuel cell are analyzed by comparing simulation results. Also parameter of fuel cell model is changed variously and battery capacity is calculated in each cases. And method of battery optimal designing is presented by regarding dynamic characteristic of fuel cell.

Key Words : PEM Fuel Cell, Dynamic Modeling, Fuel Cell Electric Vehicle, Battery Optimal Design

1. 서 론

화석에너지 고갈과 환경오염 등의 사회적 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 상대적으로 느리고, 에너지를 저장할 수 없다는 단점 때문에 단독으로 사용하기 힘들다. 따라서, 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 동작 상태에 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

중점으로 연구를 수행하였다. 배터리 용량 선정을 위해서는 주전원인 연료전지의 특성을 이해해야 한다. PEMFC는 비선형 출력 특성을 가지고 있으며 부하의 변화가 큰 경우에는 전압의 강하가 생기는 과도특성이 나타나므로 연료전지에서의 전력공급이 일시적으로 부하요구전력에 대해 부족할 수 있다. 그러므로 에너지 보상장치의 용량은 연료전지와 부하의 관계에 따른 과도특성을 고려하여 선정해야 한다.

본 논문에서는 개발된 연료전지 과도특성 모델을 이용하여 회복시간과 전압 강하량을 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하고 에너지 부족량을 계산하여 과도특성이 연료전지 공급 에너지에 미치는 영향을 정량적으로 나타내었다. 그리고 자동차 주행 패턴 (Urban Dynamometer Driving Schedule, UDDS)에 따라 차량에서 요구되는 에너지를 계산하여 부하 모델링을 수행하였다. 연료전지 모델과 부하 모델을 이용하여 부하 요구 에너지와 연료전지 공급 에너지를 분석하고 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 데이터를 분석함으로써 동특성을 고려한 연료전지 자동차용 배터리 용량 최적 설계를 수행하였다.

2. FCEV용 배터리 용량 최적 설계

연료전지 자동차 (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs)는 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 급제동이나 부하 급감시의 회생되는 에너지를 저장한다. 또한 연료전지 스택이 제대로 동작하지 않을 시에도 배터리를 통해 에너지를 공급할 수 있다 [4]. 하지만 배터리는 단가가 매우 높기 때문에 너무 큰 용량을 사용하면 경제적이지 못하고, 용량이 작으면 배터리의 기능을 제대로 수행하지 못한다. 그러므로 비용과 시스템

* 준 회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 석사과정
** 정 회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 박사과정
*** 정 회원 : 현대자동차 하이브리드설계팀 선임연구원 · 공박
† 교신저자, 시니어회원 : 성균관대학교 정보통신공학부
조교수 · 공박

E-mail : bklee@skku.ac.kr
접수일자 : 2009년 7월 23일
최종완료 : 2009년 8월 12일

효율의 최적화를 위해서 배터리의 용량에 대한 최적화 설계가 반드시 필요하게 된다. 배터리의 용량은 연료전지의 과도특성에 의한 에너지 공급량과 부하에서 요구하는 에너지와의 불균형 정도를 계산함으로써 부하와 전력변환장치(Power Conditioning System, PCS)에 적합하도록 산정할 수 있다.

2.1 연료전지 과도특성

연료전지 과도특성이 배터리 용량 설계에 미치는 영향을 확인하기 위해 연료전지 모델을 개발하였다. 연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 과정을 통해 전력을 생산하므로 김스 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 연료전지의 효율적 구동을 위한 장치로 그림 1과 같이 메탄올, 가솔린 등의 연료로부터 수소를 개질하는 개질기나 기체의 압력을 조절해주는 공기압축기와 유체 제어기, 기체에 적절한 수분을 공급해주는 가습기, 스택에 기체를 공급해주는 블로워 등으로 구성되어 있다 [5], [6]. 동특성은 부하가 급격히 인가되었을 때, 그에 따라 요구되는 기체가 유체제어기나 블로워, 밸브 등에서 물리적인 마찰에 의해 신속하게 공급되지 못하여 전압이 수직적으로 감소하였다가 시간이 지나 기체가 충분히 공급되면서 정상상태로 수렴하는 형태로 나타난다 [7], [8]. 물리적 지연 현상은 시스템의 구조에 따라 변화하여 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 메모리를 이용하여 현재 값과 이 전 값을 샘플링하여 부하가 증가하는 구역을 추출한 후 전압 강하량과 회복시간의 파라미터를 삽입하여 동특성을 부가하여 그림 2와 같이 구현할 수 있다 [9].

2.2 FCEV 부하특성

부하인 FCEV에서 요구되는 에너지는 차량을 주행하기 위한 에너지 외에도 에어컨, 전·후방 거리센서 등과 같은 전장 시스템을 위한 에너지가 필요하지만 배터리 용량 설계 기법에 주안점을 두었으므로 계산의 간략화를 위하여 주행에너지에 중점을 두었다. 그림 3의 UDSS 자동차 주행 패턴으로부터 주행 에너지를 구하기 위해서는 초당 마일 (Mile per second, Mps)의 단위로 표현되어 있는 주행패턴을 속도 단위로 변환하여 구름저항, 공기저항, 등판저항, 가속저항을 고려해야 한다.

구름저항 (Rolling resistance, R_r)은 타이어에서 발생하는 저항으로 수평노면을 주행하는 경우 노면의 굴곡, 타이어와 노면의 마찰 손실등에 의해 발생하여 타이어에 인가되는 차량중량에 비례하며 식(1)과 같다. 공기저항 (Air resistance, R_a)은 자동차 주행을 방해하는 기체의 저항으로 차체 형상에 따라 기류에 의해 발생하는 맴돌이 형상 저항과 표면저

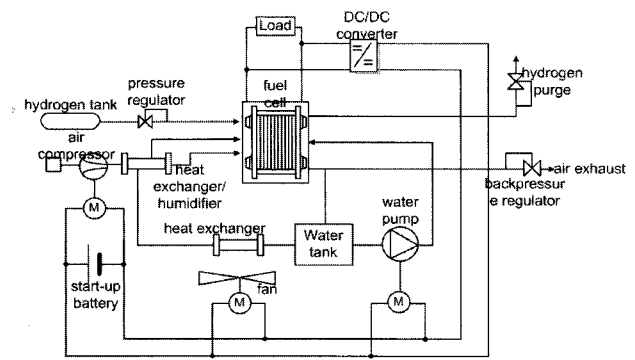


그림 1 전체 연료전지 시스템 [10]
Fig. 1 Entire Fuel Cell System

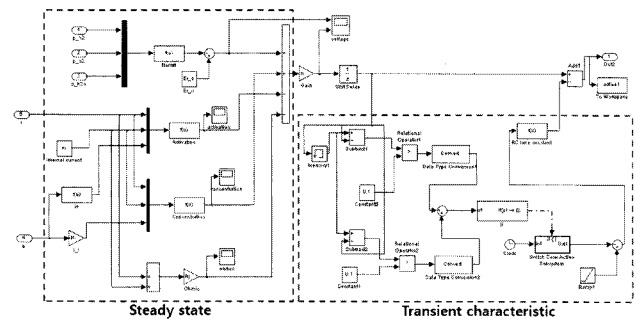


그림 2 연료전지 과도 특성 모델
Fig. 2 Fuel Cell Transient Characteristic Model

항 등이 있고 식(2)와 같다. 등판저항 (Gradient resistance, R_g)은 차량이 경사면을 주행할 때, 차량 중량에 의해 경사면에 평행하게 작용하는 저항으로 식 (3)와 같이 계산할 수 있다. 가속저항 (Acceleration resistance, R_{ac})은 차량의 주행 속도를 변화시키는 힘으로 관성저항이라고도 할 수 있고 식 (4)와 같다.

$$R_r = m \cdot m_{ue} \tag{1}$$

$$R_a = 0.5 \cdot A \cdot R_{ho} \cdot C_d \cdot v^2 \tag{2}$$

$$R_g = \sin(\theta) \cdot m \tag{3}$$

$$R_{ac} = (1 + \delta) \cdot \frac{m}{g} \cdot a \tag{4}$$

여기서, m 은 차량중량 (2081kg), g 는 가속도 (9.8067m/s²), m_{ue} 는 구름저항계수 (0.00827), A 는 차량투영전면면적 (2.56m²), R_{ho} 는 공기밀도 (1.23), C_d 는 항력계수 (0.41), v 는 속도, θ 는 등판각, a 는 가속도, δ 는 회전부분 상당 질량계수를 나타낸다 [11].

본 논문에서는 등속 운전, 평지 운전을 가정하였으므로 등판저항과 가속저항이 무시되고 구름저항과 공기저항을 중심으로 부하에서 요구되는 에너지를 계산하였고 결과는 그림 4와 같다.

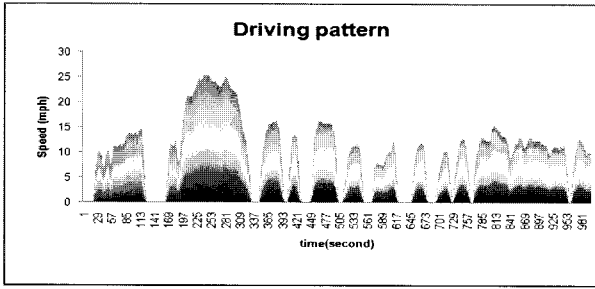


그림 3 자동차 UDDS 주행 패턴 [12]
Fig. 3 Urban Dynamometer Driving Schedule

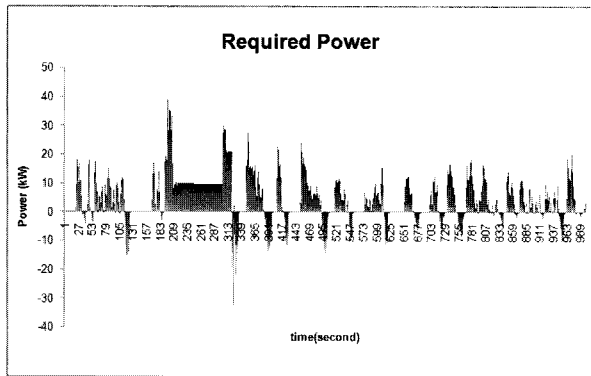


그림 4 연료전지 자동차 부하 요구 에너지량
Fig. 4 Load Required Energy of FCEV

2.3 배터리 용량 설계

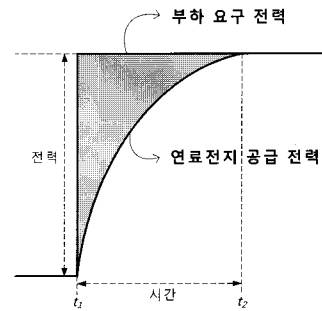
연료전지의 과도특성에 의해 연료전지는 부하에서 요구하는 에너지를 신속하게 공급하지 못하게 되므로 배터리는 에너지의 차이를 보상할 수 있도록 설계되어야 한다. 배터리 용량은 Ah의 단위로 표현되며 예를 들어 100mAh는 100mA의 전류를 한 시간 동안 공급할 수 있다는 것을 나타낸다. 따라서, 배터리 용량 설계는 그림 5와 같이 부하 요구 전력 과 연료전지 공급 전력의 차이를 시간 적분하여 배터리 전압으로 나누어 As단위로 변환하고 시뮬레이션 시간 단위를 초에서 시로 맞추기 위해 3600으로 나눈다. 그리고 배터리 용량은 일반적으로 70%로 설계되므로 70/100으로 나누어 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$Ah = \frac{1}{3600} \cdot \frac{100}{70} \cdot \frac{1}{V_b} \cdot \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt \quad (5)$$

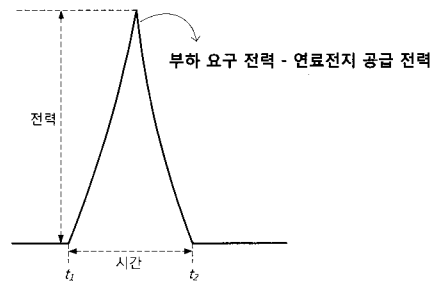
여기서, V_b 는 배터리 전압 (200V), t_1 은 전력이 불균형이 생기기 시작하는 즉, 전압의 급격한 감소가 일어난 시점의 시간, t_2 는 전압이 정상상태로 수렴하여 전력이 균형을 이루는 시간, P 는 부하의 요구전력에서 연료전지가 공급하는 전력의 차, Ah 는 배터리 용량의 단위로 전력의 시간 적분 부분이 에너지의 부족분으로 표현된다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 과도특성에 따른 연료전지 공급 에너지



(a)



(b)

그림 5 배터리 용량 설계 기법 (a) 부하 전력과 연료전지 전력 비교에 의한 보상 에너지 (b) 보상 에너지를 이용한 배터리 용량 설계

Fig. 5 Technique of Battery Design (a) Compensation Energy by comparing Energy of Load and Fuel Cell (b) Battery Design from Compensation Energy

과도특성이 연료전지의 공급 에너지에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 2의 연료전지 모델과 저항과 스위치로 회로를 스텝으로 변화하는 부하를 인가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 부하의 변화는 0.25초에 인가하였으며 전력은 22.53kW에서 27.05kW로 변화시키고 연료전지 모델에서 회복시간과 전압 강하량을 변화시키면서 DC 전원 입력인 시뮬레이션 결과와 비교하여 과도특성이 에너지 공급량에 미치는 영향을 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 연료전지에서 부하에 요구되는 전력을 신속하게 공급하지 못하고 그림 6과 같이 전압강하와 회복현상에 의한 전력공급의 지연과 함께 DC Link의 왜곡이 생기는 것을 확인할 수 있다. 부하에서 요구되는 에너지에 대한 연료전지 공급 전력을 간략화하고 시간 적분하여 파라미터에 따른 에너지 보상량을 계산한 결과는 표 1과 같고 수학적 근사화식을 이용하여 도식화하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 표 1과 그림 7에서 확인할 수 있듯이 전압 강하량이 크고, 회복시간이 길어질수록 전압강하의 크기와 회복시간의 길이에 의한 면적만큼 연료전지에서 공급할 수 있는 에너지에 부족분이 생기기 때문에 보상해야 하는 에너지가 증가하는 것을 알 수 있고 이로써 연료전지의 과도특성에 의해 부하에서 필요로 하는 에너지를 효율적으로 공급하지 못한다는 것을 확인할 수 있다.

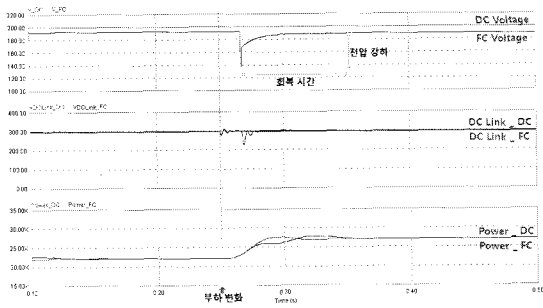


그림 6 연료전지와 DC전원의 시뮬레이션 결과
 Fig. 6 Simulation Result of Fuel Cell and DC Power Source

표 1 전압강하/회복시간에 따른 에너지 보상량
 Table 1 Required energy according to voltage deep and recovery time

전압강하	회복시간	에너지보상량
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

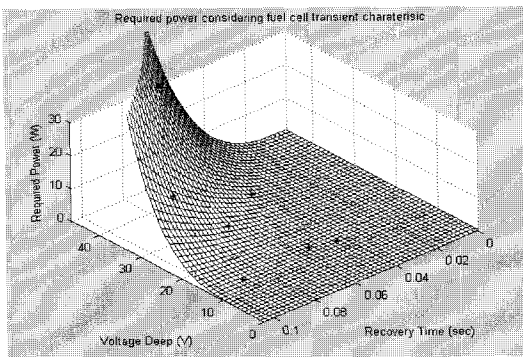


그림 7 전압강하/회복시간에 따른 에너지 요구량
 Fig. 7 Required Energy Based on Voltage Deep and Recovery Time

3.2 시뮬레이션 플랫폼

연료전지 자동차의 배터리 용량선정을 위한 플랫폼을 그림 8과 같이 연료전지 모델 및 부하 모델을 적용하여 구성하였다. 연료전지는 저전압 특성을 가지므로 승압형 Boost Converter를 사용하였다. 부하 요구 에너지를 확인하기 위하여 DC 전원을 부하모델과 연결한 PCS 회로와 연료전지에서 공급하는 에너지를 확인하기 위한 연료전지 전원과 부하를 연결한 PCS 회로를 구성하였다.

배터리 용량은 에너지가 가장 많이 요구되는 부분을 중심으로 설계되기 때문에 부하 모델은 차량의 주행 에너지 중에서 연료전지 동특성이 가장 두드러지게 나타나는, 부하가 급격히 증가하여 10kW 이상의 에너지가 요구되는 조건에 대해 설계되었다. 전체 1009초의 시간 중에서 부하 증가량이

10kW를 넘는 구간에서 DC Link 전압을 고려하여 전력으로부터 부하 저항값을 구하였고 각각의 시간과 주행속도, 주행 에너지, 저항 값은 표 2, 3과 같다. 부하모델은 PSIM에서 주행패턴의 1초를 시뮬레이션 시간 0.2초로 1/5 스케일링하여 저항과 스위치, 트리거 소자를 이용하여 구성되었다. 표 3은 시뮬레이션 시간과 실제 모델에 사용된 저항 값과 모델의 시뮬레이션 결과를 통해 얻은 에너지 요구량을 나타내고 있다. 전체 시뮬레이션 시간은 4초이고 계산된 저항값에서 소수점 두 자리까지 반올림하여 인가하였다. 이들에 의한 에너지 요구량과 부하 모델 시뮬레이션에 의한 에너지가 동일하다는 것을 확인할 수 있고 따라서, 제안된 모델이 타당함을 확인할 수 있다.

연료전지 동특성 모델은 Matlab Simulink로 구현되었으므로 Simcoupler를 통해 PSIM의 부하 모델과 연계하였고, 동특성이 배터리 용량 선정에 미치는 영향을 알아보기 위해 전압강하량과 회복시간을 조정하는 파라미터를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 전압강하량과 회복시간은 0kW에서 5kW로 부하 변화시의 값을 기준으로 설정하였다.

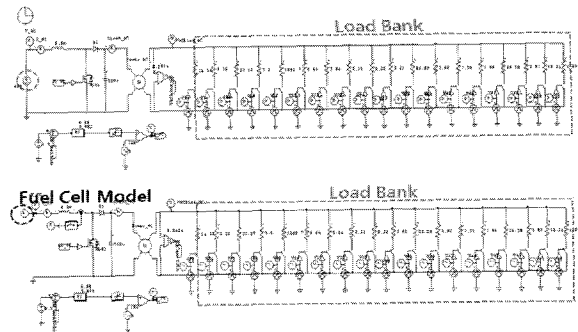


그림 8 배터리 용량 설계 플랫폼
 Fig. 8 Battery Design Platform

표 2 부하 모델링을 위한 차량 주행 에너지 분석
 Table 2 Analysis results of driving energy for load modeling

Time (s)	Speed (mph)	Power (kW)	Required Power (kW)
28	8.0912	6.3451	10.4403
29	9.2535	16.7854	
45	8.5382	2.4223	13.9533
46	9.4323	16.3756	
57	8.8511	0.0474	13.5144
58	9.6558	13.5618	
196	16.1824	17.8527	21.1614
197	16.6741	39.0141	
303	21.0997	10.9423	16.5244
304	20.6080	27.4667	
348	1.9222	4.3077	11.7145
349	3.3974	16.0222	
406	5.5878	0.0000	11.9378
407	7.0630	11.9378	
408	8.5382	22.7252	10.7874
452	7.3760	3.3848	11.7018
453	8.8511	15.0866	
963	5.3196	4.9143	13.6029
964	6.7948	18.5172	

표 3 부하 모델에 사용된 파라미터

Table 3 Parameters used in load model

Time (sec)	Resistance (Ω)	Resistance in model	Result Power (kW)
0.0	14.1842	14.18	6.2455
0.3	5.3618	5.36	16.5243
0.5	37.1548	37.15	2.3821
0.7	5.4960	5.50	16.1052
0.9	1898.7340	1898.73	0.0579
1.1	6.6363	6.64	13.3389
1.3	5.0413	5.04	17.5762
1.5	2.3069	2.31	38.3606
1.7	8.2250	8.22	10.7721
1.9	3.2767	3.28	27.0085
2.1	20.8928	20.89	4.2313
2.3	5.6172	5.62	15.7640
2.5	0.0000	0.00	0.0000
2.7	7.5391	7.54	11.7464
2.9	3.9604	3.96	22.3696
3.1	26.5895	26.59	3.3526
3.3	5.9656	5.97	14.8361
3.5	18.3139	18.31	4.8381
3.7	4.8503	4.86	18.2253

3.3 시뮬레이션 결과 및 배터리 용량 최적 설계

그림 9는 전압강하가 25V, 회복시간이 0.34초일 때의 시뮬레이션 결과로 부하 요구 에너지에 대해 연료전지가 에너지를 충분히 공급하지 못하는 것을 알 수 있으며 가장 많은 보상 에너지가 요구되는 부분은 1.518초에서 1.562초 사이이고 배터리가 보상해주어야 하는 전력은 2973.82W이다. 이와 같이 시간과 전력량을 추출하면 식 (5)를 이용하여 배터리 용량을 산정할 수 있다. 전압강하를 13V에서 110V, 회복시간을 0.033초에서 0.682초까지 다양하게 변화시키면서 배터리 용량을 산정한 결과는 표 4와 같다. 표 4의 결과를 근사화 공식을 이용하여 도식화하면 그림 10과 같고 전압 강하량이 커지고 회복시간이 길어짐에 따라 배터리 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 차량에서 전장시스템을 구동하기 위한 에너지는 무시하여 주행 패턴에 따른 에너지만을 고려하고, 등속·평지 운전을 가정하였으므로 실제 배터리 용량에 비하면 작은 용량이 산정되었다. 본 논문은 배터리 용량 최적 설계의 기법에 주안점을 두었으며 시뮬레이션을 통해 동일한 주행 패턴에서도 연료전지의 과도특성에 따라 배터리의 최적용량이 달라지는 것을 확인하여 배터리 용량 선정 시에는 부하 전력 변화량과 함께 연료전지 특성에 대한 이해도 필요함을 검증하였다.

4. 결론

본 논문에서는 FCEV용 배터리 용량의 최적설계를 위해 연료전지의 과도특성을 분석하여 연료전지 모델을 개발하고 차량의 주행패턴을 분석하여 부하 모델을 구현하였다. 그리고 DC전원을 사용한 시뮬레이션 결과와 연료전지 모델을 전원으로 수행한 시뮬레이션 결과를 비교하여 부하 요구 에너지와 연료 전지 공급 에너지를 분석함으로써 배터리에

서 보상해야 하는 에너지를 계산하여 배터리 용량을 산정하였다. 또한 동특성을 변화시키면서 연료전지의 특성이 배터리 용량 설계에 미치는 영향을 확인하였다. 이 결과는 EV용 배터리 용량 설계 과정에서 부하변화와 연료전지 특성에 따른 근사적인 용량 예측을 가능하게 할 것으로 기대된다.

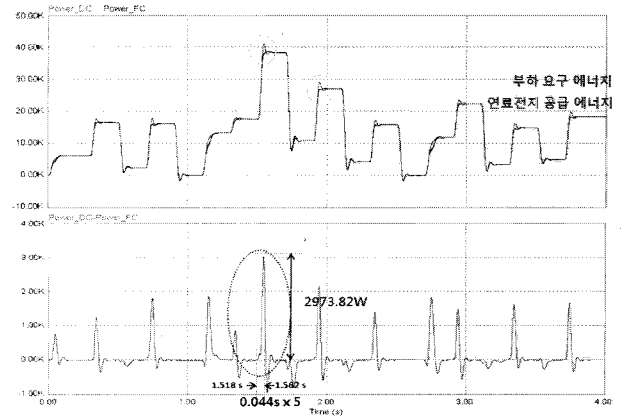


그림 9 에너지 보상량을 구하기 위한 시뮬레이션 결과
Fig. 9 Simulation Result for Calculating Compensation Energy

표 4 동특성에 따른 배터리 용량 설계

Table 4 Battery design according to fuel cell dynamics

전압강하	회복시간	배터리 용량
13 V	0.122 sec	36.060 mAh
25 V	0.340 sec	29.502 mAh
25 V	0.550 sec	37.376 mAh
28 V	0.182 sec	54.273 mAh
37 V	0.092 sec	54.653 mAh
41 V	0.023 sec	32.445 mAh
62 V	0.182 sec	104.062 mAh
65 V	0.034 sec	50.385 mAh
67 V	0.262 sec	103.910 mAh
77 V	0.682 sec	138.040 mAh
81 V	0.033 sec	44.424 mAh
110 V	0.033 sec	46.313 mAh

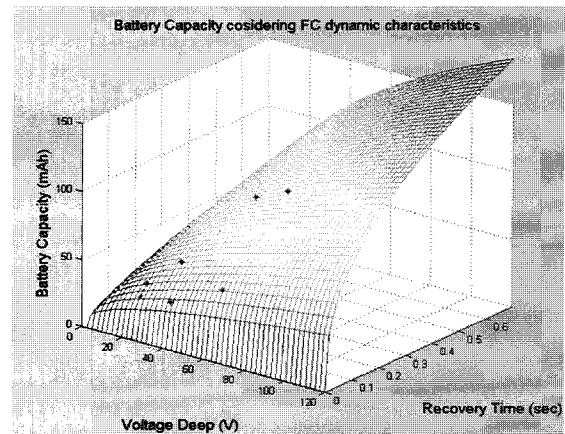


그림 10 동특성에 따른 배터리 용량
Fig. 10 Battery Capacity Based on Fuel Cell dynamic characteristic

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

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

[6] 민경덕, 김한상, 강상규, 하태훈, 김보령, "연료전지 운전 장치 개발 현황 및 소개," 유체기계저널, 제9권, 제2호, 2006

[7] 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

[8] 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

[9] 고정민, 김종수, 최규영, 강현수, 이병국, "부하변화를 고려한 연료전지 스택 동특성 모델링," 대한전기학회논문지, vol. 58, no. 1, pp. 93-99, 2009

[10] 고정민, 김종수, 최규영, 이병국, "연료전지 동특성 모델링 비교 분석," 전기학회춘계학술대회, pp. 245-247, 2009

[11] 최서호, 전순일, 임태원, "투싼 연료전지 차량 개발,"

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

저 자 소 개



고 정 민 (高 廷 旻)

1983년 8월 8일생. 2008년 성균관대학교 전자전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 석사과정.
Tel : 031-299-4638
E-mail : infireat@hanmail.net



김 중 수 (金 鍾 秀)

1975년 3월 5일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 졸업 (석사). 현재 동 대학원 전자전기컴퓨터 공학과 박사과정. 2000년 2월-2004년 7월 SEMIKRON Solution Centre Asia Application Engineer.
Tel : 031-299-4638
E-mail : sniper75@skku.edu



이 영 국 (李 永 國)

1970년 9월 3일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2007년 Georgia Institute of Technology 전기공학과 졸업 (공학박사). 1996년 2월-1999년 12월 현대정공 주임연구원. 2006년 1월-2007년 7월 Research Assistant, Georgia Institute of Technology. 2000년 1월-현재 현대자동차 하이브리드 설계팀 선임연구원.
Tel : 031-368-2196
E-mail : yklee70@hyundai-motor.com



이 병 국 (李 秉 國)

1968년생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2001년 Texas A&M University 전기공학과 졸업 (공학박사). 2002년 1월-2003년 1월 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년 4월-2005년 9월 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자그룹 선임연구원 (팀장). 2006년 3월-현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수. 2004년-현재 IEEE Senior Member. 2007년-현재 Associate Editor, IEEE Industrial Electronics Society (IES), ICEMS2007 및 IEEE INTELEC2009 Secretary General, 2009년-현재 KIEE Senior Member, 현재 당 학회 영문지 간사, 전기역사전문위원회 간사, B부문 총무이사.
Tel : 031-299-4581
E-mail : bklee@skku.edu