

MATLAB®/Simulink® 기반 EV/PHEV용 리튬 이온 배터리 모델 파라미터 추출

김홍석, 홍승건, 전준영, 최규영, 이병국
성균관대학교 정보통신공학부

Parameter Extraction of a Lithium-ion Battery for EV/PHEV by the use of MATLAB®/Simulink®

Hong-Seok Kim, Seung-Gun Hong, Joon-Young Jeon, Gyu-Yeong Choe, Byoung-Kuk Lee
School of Information & Communication Engineering, SungKyunKwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 쉽고 빠르게 정확한 리튬 이온 배터리 모델을 구현할 수 있는 방법을 제시하고 있으며, 구현된 모델을 MATLAB®/Simulink® 환경에서 검증한다. 모델을 구현함에 있어서 절차를 간소화하기 위해 비선형 개방 전압은 배터리 충전 및 방전 전압의 평균으로 근사하고, 배터리 내부 비선형 파라미터는 방전 초기에 발생하는 과도응답을 측정된 이산 데이터를 곡선 접합하여 구한다. 구현된 모델을 이용하여 시뮬레이션을 하고 이를 실험 데이터와 비교해본 결과, 평균 절대오차는 기존 연구^[4]보다 0.1% 낮은 0.091%로 측정되었다. 측정된 오차의 수준은 본 논문에서 제안한 방법이 파라미터 추출에 필요한 시간을 단축하고 시뮬레이션 모델을 쉽게 구현 가능하게 함에도 불구하고 여전히 리튬 이온 배터리의 출력 특성을 정확하게 예측함을 보여준다.

1. 서론

고에너지 밀도를 갖는 리튬이온 전지는 핸드폰에서 Electric Vehicle(EV)/Plug-in Hybrid Electric Vehicle(PHEV)에 이르기까지 다양한 분야에서 이용되고 있고 앞으로 더욱 증가할 전망이다. 특히 EV에 있어서 전지의 고에너지 밀도 특성은 매우 중요한 요소이기 때문에 리튬이온 전지가 더욱 더 주목받고 있다.^[5] 이러한 리튬이온 전지의 효율을 향상시키고 과도한 충전 및 방전에 의한 리튬이온 전지의 손상을 사전에 방지하기 위해 리튬이온 전지의 상태를 정확히 예측하기 위한 모델링의 필요성은 날이 갈수록 증가하고 있다.^[6]

지금까지 수행된 연구에 의하면 일반적으로 오차가 가장 낮으면서(5% 이하) 시뮬레이션 목적으로 적합한 모델은 전기적 등가회로 모델이다.^[3] 등가회로 모델은 수동소자인 저항과 커패시터를 포함한 전기적 등가 회로로 표현되며 그 동안 다양한 형태로 제안되어졌다. 이러한 형태의 모델은 전기공학자들에게 아주 유용하고 직관적 접근을 할 수 있게 하며 특히 시뮬레이터를 사용하거나 다른 회로들과 함께 사용할 경우 아주 유용하게 이용될 수 있다.^{[3][5]}

본 논문에서는 EV/PHEV용 리튬이온 배터리의 출력특성을 예측하기 위한 목적으로 M. Chen and G. A. Rincon-Mora, 2006에서 제안된 등가회로 모델을 바탕으로 모델 파라미터 추출을 빠르게 할 수 있는 방법을 제안하며 Simulink®를 통해 시뮬레이션하고 실험 데이터와 비교, 검증한다. 검증 결과, 평균 절대오차 0.094%로 정적 부하에 대하여 출력 특성을 정확

하게 예측하였으며 향후 동적 부하에 대한 출력 특성 예측을 위한 모델링 기법 수립의 중요한 기초자료가 될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 배터리 모델 및 파라미터 추출

2.1 배터리 모델

2.1.1 Equivalent Electric Circuit Model

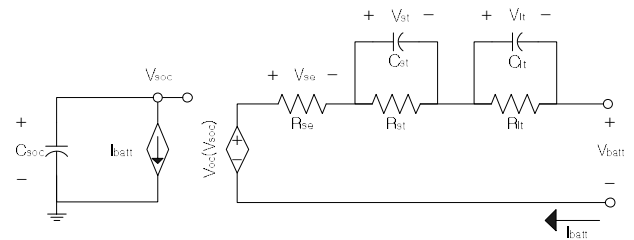


그림 1 리튬 이온 배터리의 회로 모델

Fig. 1 Battery circuit model of a Li-ion Battery

위 Fig. 1에 표현된 전기적 모델은 배터리의 특성을 배터리 내부저항 R_{se} , 분극현상을 표현하는 이온화 손실저항 R_{st} , R_{lt} 와 이중층의 커패시턴스 C_{st} , C_{lt} 로 나타냈다.^[6]

회로 모델의 분석과 구현을 쉽게 하기 위해 Laplace-domain에서의 State-space 모델 분석 기법을 사용하면, 등가회로 모델이 갖는 3개의 에너지 저장 소자에 각각 State 변수를 할당하여 다음과 같은 상태방정식과 출력 방정식으로 표현된다.

$$sX(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{R_{st}C_{st}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{R_{lt}C_{lt}} \end{bmatrix} X(s) + \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_{soc}} \\ \frac{1}{C_{st}} \\ \frac{1}{C_{lt}} \end{bmatrix} U(s) \quad (1)$$

$$Y(s) = V_{oc}(V_{soc}(s)) - V_{st}(s) - V_{lt}(s) - R_{se}U(s) \quad (2)$$

$$\text{단, } X(s)' = [V_{soc}(s) \quad V_{st}(s) \quad V_{lt}(s)] \quad (3)$$

여기서 $R_{st}C_{st}$ 는 shorter time constant 이고, $R_{lt}C_{lt}$ 는 longer time constant 이며 State vector인 $X(s)$ 의 원소는 각

각 3개의 커패시터 C_{soc} , C_{st} , C_{lt} 에 걸리는 전위차의 s-domain 함수를 의미한다. 그리고 $U(s)$ 는 입력전류 I_{batt} 을 의미하고 $Y(s)$ 는 단자전압 V_{batt} 을 나타낸다.

2.1.2 Simulink® Battery Model

식 (1), (2) 그리고 식 (3)을 이용하여 아래 Fig. 2와 같은 Simulink® 모델을 설계하였다. 아래의 Simulink® 모델은 State 변수를 계산함과 동시에 Lookup Table을 통해 V_{oc} 를 읽어온 후 이들의 대수적 연산을 통해 단자전압 $V_{batt}(t)$ 를 출력하는 형태이다.

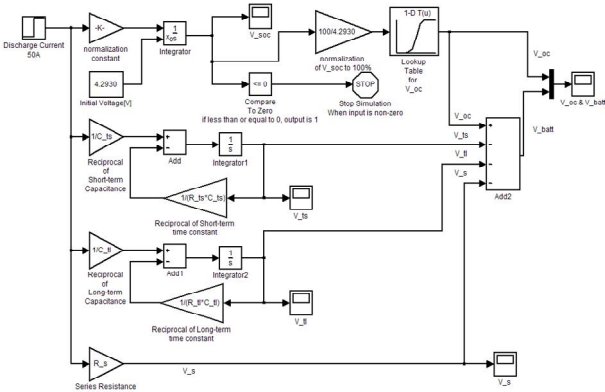


그림 2 배터리 회로모델의 시뮬링크 모델
Fig. 2 Simulink® Model of the battery circuit model

2.2 파라미터 추출

앞서 제시한 모델을 시뮬레이션에 사용하기 위해서는 필요한 파라미터를 특정 배터리의 실험 데이터로부터 추출해야 한다. 이를 위해 공칭용량 50Ah 인 HEV용 리튬 이온 배터리 1셀을 충전 및 방전 비율 1C, 샘플링 시간을 1초로 하여 실험하였고 Fig. 3과 같은 충전 및 방전 곡선을 얻었다.

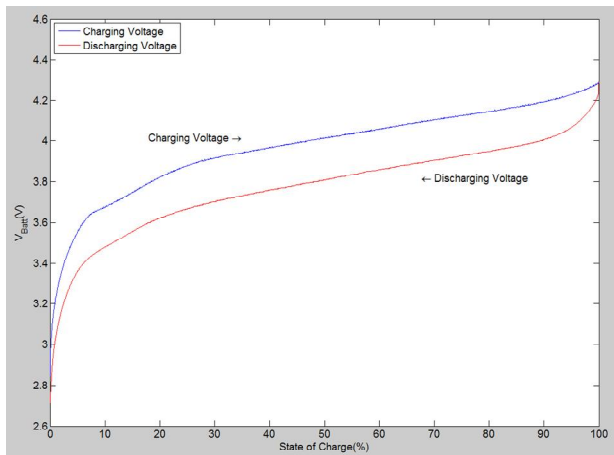


그림 3 SOC에 대한 V_{batt} 의 충전 및 방전 곡선.
Fig. 3 Charging and discharging voltage, V_{batt} versus. SOC

배터리의 파라미터는 SOC, 전류, 온도, Cycle 횟수 등에 의존하는 다변수 함수들이다. 이러한 함수들은 모델링 과정을 매우 길고 복잡하게 만든다. 그러나 EV/PHEV와 같이 빈번하게 충전 및 방전을 반복하는 배터리의 경우 1개월 당 2~10%에 이

르는 Self-Discharge Rate를 무시하여도 모델에 큰 오차를 가져오지 않으며,^[3] Cycle 횟수의 경우 300 Cycles 이상에서 10% 정도 용량 감소를 보인다고 알려져 있으므로 실험 시간의 단축을 위해 무시할 수 있다.^{[2],[3]} 온도의 경우 실제 응용에 있어서 거의 일정한 상태로 유지 가능하다고 가정하고 이번 실험에서는 배제하였다.

2.2.1 단자 개방 전압 V_{oc}

SOC- V_{oc} 관계를 얻는 방법은 S. Abu-Sharkh and D. Doerffel, 2004.에서 제시하고 있지만, SOC가 10% 변화할 때마다 충, 방전을 중단하여 단기 과도응답 이후의 전압을 측정하거나 곡선 접합을 통해 정상 상태 전압을 추정하여야 하는 단점이 있고, Long-term test를 통해 얻은 결과와 비교하여 오차가 존재하였다.^[5] 그러나 S. Abu-Sharkh and D. Doerffel, 2004.의 연구를 통해 단자개방전압은 충전 전압과 방전 전압의 평균으로 근사될 수 있다는 사실을 알 수 있었다.^[5] 따라서 본 논문에서는 SOC의 변화에 따른 개방전압을 추정하는 대신 SOC에 따른 충전 시의 단자전압과 방전 시의 단자전압의 평균을 계산하는 방법을 통해 SOC- V_{oc} 곡선을 구하였다.

2.2.2 내부저항과 커패시턴스

등가회로 모델에서 배터리의 입출력특성을 결정짓는 중요한 요소인 배터리 내부저항 R_{se} , 분극현상을 표현하는 이온화 손실저항 R_{st} , R_{lt} 와 이중층의 커패시턴스 C_{st} , C_{lt} 또한 V_{oc} 와 마찬가지로 SOC에 의존하기 때문에 일정한 전류로 방전을 수행하되, 특정 SOC에서 방전을 멈추고 과도응답을 관찰하는 방법이 제안되었다.^[5] 그런데 이 방법을 통해 얻어진 RC파라미터는 SOC 10% ~ 100% 영역에서 거의 일정하다.^{[3],[4],[5]} 따라서 방전 초기 과도응답만으로 근사한 값을 얻어낼 수 있다.

먼저, 내부 직렬 저항은 방전이 시작되는 순간에 나타나는 전압 강하로부터 구한다.^[5] 이번 실험에서는 전압 측정을 1초 단위로 일정하게 하였기 때문에 초기 전압 강하의 값을 추정하기 위해 Moving Average Filter에 의한 Smoothing 기법을 사용하여 방전 직후의 전압 강하를 추정하여 계산하였으며 그 값은 Table. 1에 나타내었다.

R과 C로 이루어진 2개의 병렬회로 부분에 걸리는 전위차는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V_{RC} = (V_{ts} + V_{tl}) = V_{oc} - V_{se} - V_{batt} \quad (4)$$

V_{RC} 는 실험 데이터와 앞서 구한 V_{oc} , V_{se} 그리고 위 식을 사용하여 수치적으로 구할 수 있다. 한편, V_{RC} 를 물리적으로 기술하는 식은 식(1)의 State 변수들로부터 얻을 수 있다.

$$V_{RC}(t) = V_{st}(t) + V_{lt}(t) \quad (5)$$

$$= (R_{st} + R_{lt})I_{batt} - R_{st}I_{batt}e^{-\frac{1}{R_{st}C_{st}}t} - R_{lt}I_{batt}e^{-\frac{1}{R_{lt}C_{lt}}t}$$

이 식을 바탕으로 Curve Fitting 모델을 세우고 MATLAB® Curve Fitting Toolbox™의 Trust-Region 알고리즘을 사용하여 식(4)의 수치 데이터로부터 식(6)과 같은 결과를 얻었고 각 파라미터를 계산한 결과는 Table. 1에 나타내었다.

$$V_{RC}(t) = 81.44 - 11.81e^{-5.42 \times 10^{-4}t} - 66.91e^{-8.04 \times 10^{-4}t} \quad (6)$$

식(6)에서 $V_{RC}(t)$ 의 단위는 mV이고, t의 단위는 seconds이다. 식(5)와 식(6)을 계수 비교하여 RC 파라미터를 추출하였고 아래 표와 같다.

표 1 추출된 회로 파라미터들의 수치
Table 1 Extracted values of circuit parameters

Parameters	Values
$R_{se} [m\Omega]$	0.4934
$R_{st} [m\Omega]$	1.3382
$R_{lt} [m\Omega]$	0.2362
$C_{st} [F]$	7812696.5380
$C_{lt} [F]$	92939.7765

3. 시뮬레이션

선택한 등가회로와 제안한 방법으로 얻은 파라미터를 사용한 모델의 시뮬레이션 결과와 실험 데이터의 비교는 아래 Fig. 4, Fig. 5를 통해 나타내었다.

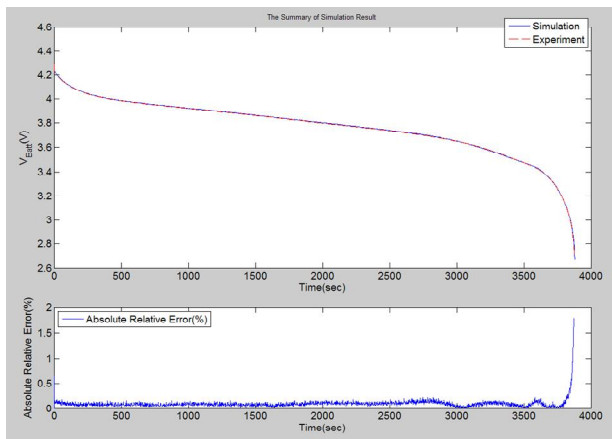


그림 4 시뮬레이션과 실험 데이터의 비교 및 절대오차
Fig. 4 Comparison between simulation and test data, and error

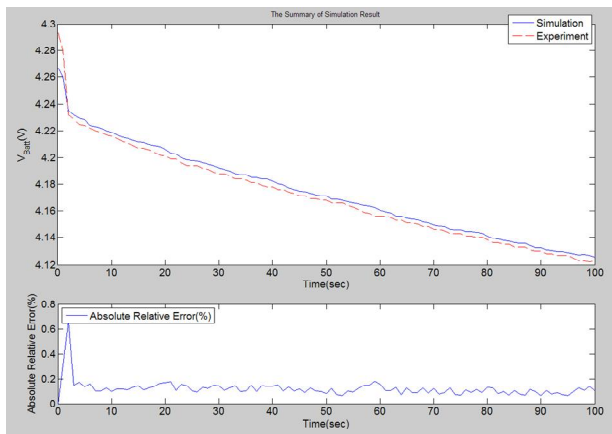


그림 5 방전 초기 과도응답의 비교
Fig. 5 Comparison between simulation and test data
- detailed view of transient response

Fig. 4는 방전 초기 과도응답만으로 파라미터를 추출했음에도 불구하고 실험 데이터와 시뮬레이션 결과가 거의 정확히 일치하는 것을 보여주고 있다.(절대오차 평균 0.094%). Fig. 5는 방전 초기 과도응답 부분을 확대한 것이며 일정 오차가 존재하지만 시뮬레이션 모델에 의한 단자전압 출력이 실제 배터리의 응답과 매우 유사한 경로를 따르고 있음을 보여주고 있다.

4. 결론

본 논문은 MATLAB®/Simulink® 환경에서 EV/PHEV용 리튬 이온 전지 시뮬레이션을 위한 모델링 기법을 제시한다. 과거에 제안된 방법들의 경우 다양한 SOC에 대하여 파라미터를 추출해야 하므로 장시간의 테스트를 요하며 곡선 집합을 수차례 행해야 하고 이들 데이터를 시뮬레이션 모델에 반영하게 되면 모델의 복잡도가 증가한다는 단점이 있었다. 본 논문이 제안하는 방법은 지금까지 수행되어온 많은 연구결과들을 토대로 정확성을 잃지 않는 범위 내에서 테스트 시간을 최소화하였고, 동시에 단 1회의 곡선 집합만을 필요로 하므로 파라미터 추출을 쉽게 하며 시뮬레이션 모델의 복잡도를 낮춘다.

이 방법을 토대로 한 시뮬레이션 결과는 실험 결과 대비 0.0914%의 평균 절대 오차를 기록하여 기존 연구 결과에서 나타난 평균 절대오차 0.192%^[4] 보다 개선되었으므로 신뢰성을 잃지 않으면서 테스트 과정을 단순화하였음을 확인할 수 있다.

또한 본 논문이 제안하는 모델링 기법에서는 실험 데이터를 얻은 이후의 모든 과정이 MATLAB®/Simulink® 환경에서 이루어지기 때문에 일련의 과정을 프로그램으로 구현 가능하고 출력 전류의 변화가 일어나는 방전 초기에 단 1회만 파라미터를 추출하므로 On-line 파라미터 식별을 통한 실시간 출력 특성 예측에 적용 가능할 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] Karris, S. T., "Introduction to Simulink: With Engineering Applications. 2 ed" Orchard Pubns, 2008
- [2] Linden, D. & Reddy, T., "Handbook of Batteries. 3rd ed.", New York McGraw-Hill Professional, 2001
- [3] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.21, no.3, p. 504-511, 2006
- [4] Michael Knauff, J. McLaughlin, Chris Dafis, D. Niebur, P. Singh, H. Kwatny and C. Nwankpa, "Simulink model of a lithium-ion battery for the hybrid power system test-bed" *the ASNE Intelligent Ships Symposium*. IEEE, p. 1-8, 2007
- [5] S. Abu-Sharkh and D. Doerffel, "Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol.130, p. 266-274, 2004
- [6] 김호기, 허상진, 강구배, "최소 자승법을 이용한 하이브리드용 리튬이온 배터리 모델링 및 특성분석" *한국자동차공학회*, Vol.17, No.1, p. 130-136, 2009