

논문 2017-54-4-13

리튬 배터리 등가모델의 정확도 개선을 위한 SOC 계수 보정법

(A SOC Coefficient Factor Calibration Method to improve accuracy
Of The Lithium Battery Equivalence Model)

이 대 건*, 정 원 재*, 장 중 은, 박 준 석*

(Dae-Gun Lee[©], Won-Jae Jung, Jong-Eun Jang, and Jun-Seok Park)

요 약

본 논문은 기존의 리튬 배터리(lithium battery) 등가모델의 정확도 개선을 위한 배터리 모델 계수 보정기법을 제안한다. 전 기자동차 등 다양한 산업분야에 사용되는 리튬 배터리의 배터리 셀간 잔존용량(SOC, state of charge) 동일하게 유지하여 배 터리 수명의 단축을 최소화하기 위해 BMS(battery management system)가 연구 개발 되었지만, 배터리 셀 전압 기반의 셀 밸 런싱(cell balancing) 동작으로 내부저항 및 커패시터에 따른 SOC 변화를 따라가지 못한다. 배터리 내부저항 및 커패시터에 따 른 배터리 SOC 추정을 위해 다양한 배터리 등가모델이 연구되었지만, 모든 배터리에 동일하게 적용하는 것은 한계가 있으며 특히 과도상태의 배터리 상태 추정이 어렵다. 기존의 배터리 전기적 등가모델 연구는 1종의 배터리를 대상으로 5~10% 오차 율로 충·방전 동적특성을 모사하며 서로 다른 전기적 특성을 갖는 실제 배터리에 적용이 부적합하다. 따라서 본 논문에서는 모델 및 용량이 다른 실제 배터리 운용환경에 적합하며 오차율 5%이하의 동적특성 모사가 가능한 배터리 모델 계수 보정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 배터리 모델 계수 보정법 검증을 위해 3.7 V 정격전압, 280 mAh, 1600 mAh 용량의 리튬 배터 리를 사용하였으며, 리튬 배터리의 전기적 등가 모델로 2단 RC Tank 모델을 사용하였다. 또한 0.25C, 0.5C, 0.75C, 1C 4가지 C-rate를 사용하여 배터리 충·방전 실험 및 모델검증을 진행하였으며 제안하는 배터리 모델 계수 보정 알고리즘을 통해 구현 한 두 종류의 배터리 모델의 배터리 충·방전 특성 및 과도상태 특성의 오차율은 최대 2.13%이다.

Abstract

This paper proposes a battery model coefficient correction method for improving the accuracy of existing lithium battery equivalent models. BMS(battery management system) has been researched and developed to minimize shortening of battery life by keeping SOC(state of charge) and state of charge of lithium battery used in various industrial fields such as EV. However, the cell balancing operation based on the battery cell voltage can not follow the SOC change due to the internal resistance and the capacitor. Various battery equivalent models have been studied for estimation of battery SOC according to the internal resistance of the battery and capacitors. However, it is difficult to apply the same to all the batteries, and it is difficult to estimate the battery state in the transient state. The existing battery electrical equivalent model study simulates charging and discharging dynamic characteristics of one kind of battery with error rate of 5~10% and it is not suitable to apply to actual battery having different electric characteristics. Therefore, this paper proposes a battery model coefficient correction algorithm that is suitable for real battery operating environments with different models and capacities, and can simulate dynamic characteristics with an error rate of less than 5%. To verify proposed battery model coefficient calibration method, a lithium battery of 3.7V rated voltage, 280 mAh, 1600 mAh capacity used, and a two stage RC tank model was used as an electrical equivalent model of a lithium battery. The battery charge/discharge test and model verification were performed using four C-rate of 0.25C, 0.5C, 0.75C, and 1C. The proposed battery model coefficient correction algorithm was applied to two battery models, The error rate of the discharge characteristics and the transient state characteristics is 2.13% at the maximum.

Keywords : Battery, Battery cell balancing, BMS, Battery model, SOC coefficient calibration

* 정희원, 국민대학교 (Kookmin University)

© Corresponding Author (E-mail : koreashow3@naver.com)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2015-H8601-17-1010)

Received ; December 19, 2016

Revised ; March 9, 2017

Accepted ; March 20, 2017

I. 서 론

지난 수십 년 동안 스마트 전기자동차 개발을 위한 노력이 계속되었다. 더불어 전기자동차의 동력원으로 사용되는 리튬 배터리의 용량 및 강건도 향상을 위한 연구가 활발히 진행되었다^[1~2]. 배터리는 수백 개 이상의 배터리 셀, 배터리 모듈 및 배터리 팩으로 구성된다. 배터리 셀의 집합을 배터리 모듈이라고 하며, 배터리 모듈의 집합을 배터리 팩이라고 한다. 배터리 제작 공정의 변수로 모든 배터리 셀의 리튬 및 전해질 농도를 동일하게 제작할 수 없기 때문에 수백 개의 배터리 셀은 서로 다른 전기적 특성을 갖는다. 따라서 각 배터리 셀이 충전 및 방전 할 수 있는 능력에 차이가 발생하며, 이는 배터리 셀들 간의 잔존용량(SOC, state of charge) 편차를 발생시킨다. 배터리 셀간 SOC 편차는 배터리 수명을 단축시키는 핵심요소이다. 배터리 수명 향상을 위해 배터리 셀간 SOC 편차를 제거하기 위한 연구가 진행되었으며, BMS(battery management system)가 개발되었다^[3]. BMS는 배터리 셀의 전압 상태를 감지하며, 배터리 셀간 SOC 레벨을 동일한 수준으로 유지한다. 수동형(passive) BMS는 과충전된 배터리 셀의 전력을 저항성 소자를 통해 소비하여 SOC 레벨을 유지하는 방식이고, 능동형(active) BMS는 과충전된 배터리 셀의 전력을 낮은 SOC 레벨의 배터리 셀로 전송하여 SOC 레벨을 유지하는 방식이다^[4]. 배터리 셀 밸런싱이 없는 배터리 셀의 가용 SOC 레벨은 배터리 셀 밸런싱을 수행한 배터리 셀의 가용 SOC 보다 낮다. 일반적인 BMS는 배터리 셀의 전압 정보만을 이용하여 배터리 셀의 SOC 레벨을 유지하기 때문에, 배터리 충·방전에 따른 내부 저항 및 커패시터 변화에 빠르게 대응할 수 없다. 따라서 배터리 셀의 SOC 편차가 60 mV 이상 존재하며, 수십 개 이상의 배터리 셀의 직렬연결시 최종단 전압의 변화가 발생 할 수 있다. 이러한 BMS의 한계를 극복하기 위해 배터리 셀의 전기적 등가모델을 통한 BMS에 대한 연구가 진행되고 있다: 테브닌 모델(Thevenin model), 저항성 테브닌 모델(Resistive Thevenin model), RC 임피던스 모델(RC impedance based model) 등(그림 1(a), (b), (c)). 배터리 셀의 등가모델은 그림 1과 같이 OCV(개방전압, open circuit voltage) VOC, 배터리 내부 저항 및 커패시터로 표현할 수 있다^[5]. OCV, 저항 및 커패시터는 SOC에 대한 함수로 표현되며 이를 통한 배터리 충·방전 동적특성 모사는 배터리 셀의 SOC를 5~10% 이내로 근사 추정이 가능하다.

하지만, 기존의 테브닌 모델은 OCV, 저항 및 커패시터 값이 SOC 함수가 아닌 상수로 되어 있어 배터리 충·방전 특성 모사에 한계가 있다. 저항성 테브닌 모델^[5]은 커패시터 성분이 생략되어 과도상태의 배터리 특성을 모사할 수 없는 단점이 있다. 또한, RC 임피던스 모델은 비교적 정확하게 배터리 비선형성을 모사할 수 있지만, DC 응답 및 과도상태 응답이 실제 배터리 특성을 따라가지 못한다^[5].

본 논문은 SOC 함수 기반의 테브닌 등가 모델의 계수 보정을 위한 알고리즘 연구를 통해 모든 리튬 배터리의 충·방전 특성 및 과도상태 특성을 5% 이내의 오차율로 기존 대비 향상된 정확도로 모사할 수 있는 배터리 등가모델의 계수 보정법을 제안한다. 제안하는 배터리 등가모델의 계수 보정법 검증에 위해 3.7 V의 280 mAh, 1600 mAh 리튬-폴리머(Li-pol) 배터리를 사용하였다. 기존의 배터리 전기적 등가모델 연구는 1가지 종류의 배터리를 대상으로 동적 특성을 모사하였기 때문에 서로 다른 전기적 특성을 갖는 실제 배터리 운용환경에 적합하도록 서로 다른 2가지 종류의 리튬-폴리머 배터리를 대상으로 0.25C, 0.5C, 0.75C, 1C 4가지 전류모드(C-rate: 완전 방전된 배터리를 1시간동안 완전 충전할 수 있는 전류의 세기)로 충·방전 및 과도상태 특성을 도출하였다. 이는 여러 충·방전 전류모드에 따라 도출되는 충·방전 특성 및 오차율을 비교하기 위함이다. SOC 함수 기반 테브닌 RC Tank 모델의 시뮬레이션을 위해 매트랩(Matlab)의 시뮬링크(Simulink)를 사용하였다. 시뮬링크로 구성한 배터리 모델의 SOC 함수 및 계수 가변을 통해 실제 배터리의 전기적 특성을 모사할 수 있는 SOC 계수 추정 알고리즘을 도출하였다. 본 논문의 2장에서는 기본적인 배터리의 전기적 특성을 설명하고, 제안하는 배터리 모델의 시뮬링크 구현방법에 대하여 설명한다. 3장에서는 실험을 통해 배터리의 충·방전 및 과도상태 특성 결과 및 기존 배터리 등가모델의 계수 보정알고리즘에 대하여 설명한다. 마지막 4장은 결론으로 배터리 모델의 계수 보정법을 적용한 배터리 모델과 실제 배터리의 방전 전압 특성에 대한 결과, 기대효과 및 향후 추가적인 연구 개발이 필요한 분야에 대하여 기술한다.

II. 리튬 배터리 모델의 전기적 특성 구현

그림 2는 본 논문에서 배터리 모델의 계수 보정법 검증을 위한 SOC 함수로 구성된 소자 기반 테브닌 RC

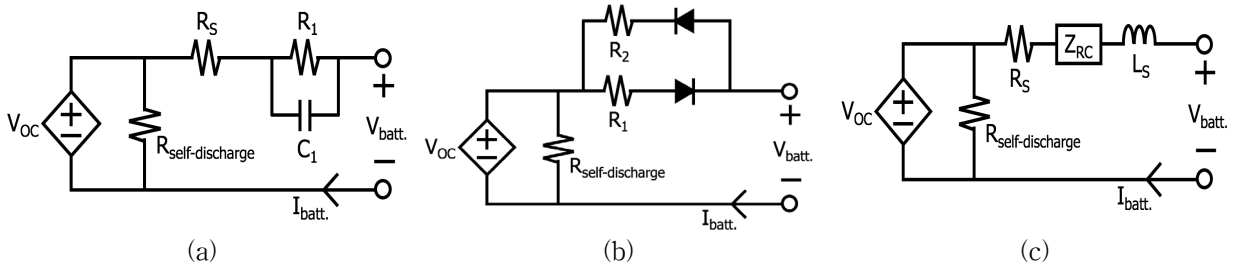


그림 1. 배터리의 전기적 등가회로 (a) 테브닌 모델, (b) 저항성 테브닌 모델, (c) RC 임피던스 모델
Fig. 1. Battery equivalent model (a) Thevenin model, (b) Resistive Thevenin model, (c) RC impedance model.

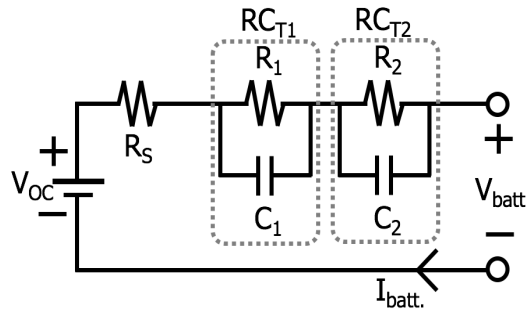


그림 2. 배터리 모델 계수 보정법 검증을 위한 테브닌 RC Tank 모델
Fig. 2. Thevenin RC Tank battery equivalent model to evaluate battery model's coefficient calibration.

Tank 모델이다^[5]. 테브닌 RC Tank 모델은 SOC 함수 기반의 개방전압(OCV, open circuit voltage), 직렬 저항(R_S), $RC_{T1}(R_1, C_1)$ 및 $RC_{T2}(R_2, C_2)$ 의 2단 RC Tank로 구성된다. 본 2장에서는 SOC 함수 기반 배터리 등가모델의 변수 보정법에 대한 설명 이전에 배터리 모델링에 필요한 파라미터에 대하여 정의하고 배터리 모델의 시뮬링크 구현에 대하여 설명한다.

1. 배터리 전기적 등가모델 파라미터 정의

가. 정전 용량(Usable Capacity)

완전히 충전된 배터리가 일정한 조건의 전압으로 방전하여 완전 방전 시, 이때 추출된 에너지량을 정전용량이라고 한다. 정전용량은 배터리의 충·방전 횟수, 온도, 충·방전 전류 및 자가방전 등 다양한 요소에 의해 감소한다. 이러한 현상을 그림 2의 R_S , RC_{T1} , RC_{T2} 를 사용하여 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다^[5].

$$C_C = 1\text{hour} \times C_{\text{useable}} \times f(\text{cycle}) \times f(\text{temp.}) \quad (1)$$

CC는 배터리 전체 전하이며, C_{useable} 은 정전용량, $f(\text{cycle})$ 및 $f(\text{temp.})$ 는 충·방전 횟수와 온도에 따른 보정계수이다. 그림 3은 $f(\text{cycle})$ 와 $f(\text{temp.})$ 의 그래프를 나타낸다. 배터리 충·방전 횟수가 증가하면 정전용량이 감소하고 온도 증가에 따라 정전용량이 증가한다. 배터리 용량의 단위는 Ah이므로 3600초에 정전용량, 충·방

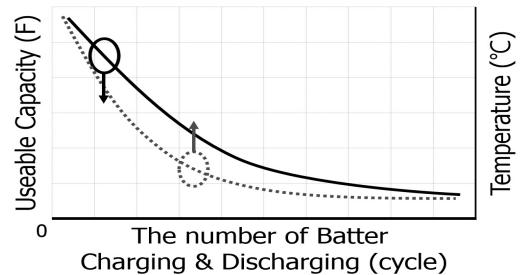


그림 3. 배터리 충·방전 횟수 및 온도에 따른 정전 용량 변화량 추세도
Fig. 3. Variation of the usable capacity versus number of battery cycle and temperature.

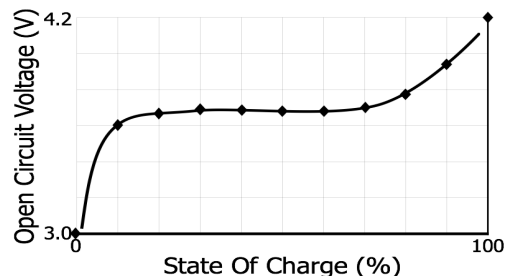


그림 4. SOC에 따른 개방전압 변화량 추세도
Fig. 4. Open circuit voltage versus battery SOC.

전 횟수 및 온도보상 계수의 곱으로 나타낼 수 있다.

나. 개방전압(OCV, Open Circuit Voltage)

개방전압은 무부하 배터리의 양단 전압을 의미하며,

배터리의 용량 및 SOC에 따라 변한다. 따라서 그림 2의 OCV전압을 나타내는 VOC는 SOC의 함수로 표현된다(그림 4). 본 논문에서 사용한 280 mAh 리튬-폴리머 배터리의 경우 배터리 SOC가 0 % 일 때, 배터리 VOC = 3 V이고, 100 % SOC 시 VOC = 4.2 V이다.

다. 과도상태응답(Transient State Response)

부하가 연결된 배터리에 일정한 전류가 흐르면, 그림 5와 같이 동적응답에 따라 배터리 전압이 변한다. 동적응답 곡선의 변화율은 배터리의 전압강하에 의존하기 때문에, 과도상태의 응답은 RC Tank를 통해 구현할 수 있다. 배터리 충전이 시작되어 전류가 흐르는 시점의 동적응답을 short time constant 라고 하고, 이 구간은 첫 번째 RC Tank인 RCT1 으로 구현할 수 있다. 일정한 배터리 전류가 흐르는 구간의 동적 변화를 long time constant 라고 하며, 두 번째 RC Tank로 구현할 수 있다. 본 논문은 모델링의 간소화를 위해 선형 함수로 단순화 할 수 있는 충·방전 횟수 및 온도에 따른 변화를 생략하였다. 이때 발생하는 오차율은 5 % 미만으로 무시할 수 있다.

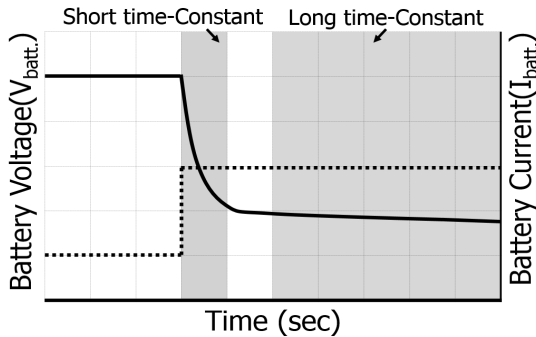


그림 5. 부하전류에 따른 배터리 과도상태 응답
Fig. 5. Transient response versus battery load current.

2. SOC 함수 기반 테브닌 RC Tank 배터리 모델링

그림 6은 배터리 모델 계수 보정법 검증을 위해 시뮬링크를 사용하여 구현한 테브닌 RC Tank 배터리 모델이다. 사용한 테브닌 RC Tank 배터리 모델은 SOC 함수 정보를 담고 있는 SOC 블록(SOC block), 개방전압원(OCV source), 직렬저항(RS) 및 두 단의 RC Tank로 구성된다.

가. SOC 블록(SOC Block)

SOC 블록은 SOC 함수로 표현된 배터리 전기적 모델의 소자를 SOC 0 %에서 100 %까지 가변하여 그 값을 산출하는 블록이다. 최초 SOC 100 %에서 0 %까지

일정하게 감소하며, 감소 비율은 배터리 전류(I_{batt.})와 배터리 정전용량에 따라 일차함수의 비율로 감소되며 식 (2)와 같이 표현된다. SOC_{t0}는 100 % SOC로 1로 정의한다.

$$SOC = SOC_{t0} - \int \frac{I_{batt.}}{C_{useable}} dt \tag{2}$$

$$C_{useable} = C_C \times 3600sec \tag{3}$$

SOC 블록을 그림 7과 같이 시뮬링크로 구현할 수 있다. 펄스파형이 터미널 1로 입력되어 배터리에 흐르는 전류, I_{batt.}으로 구현한다. 식 (3)에 표현된 배터리의 정전용량 함수가 터미널 2로 입력되어 SOC에 따른 감쇄율을 구현할 수 있다.

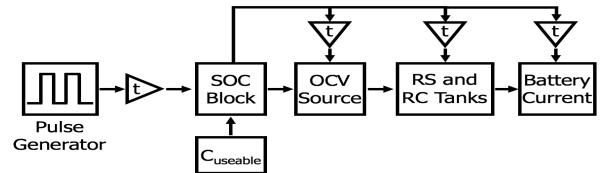


그림 6. 시뮬링크로 구현한 RC Tank 배터리 모델
Fig. 6. Thevenin RC Tank battery model using simulink tool.

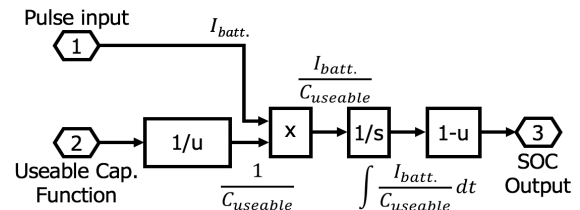


그림 7. 시뮬링크 SOC 블록
Fig. 7. SOC block of the simulink.

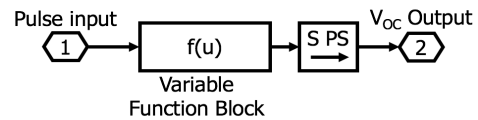


그림 8. 시뮬링크 OCV 블록
Fig. 8. OCV function block of the simulink.

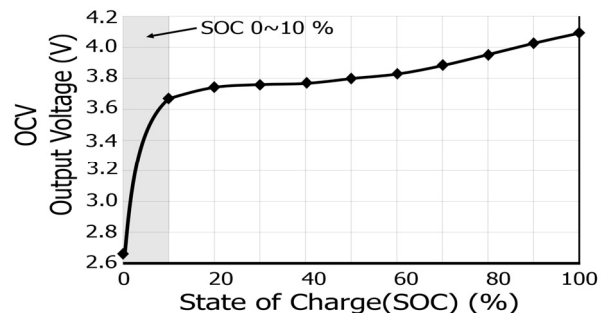


그림 9. 시뮬링크 OCV 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation results of the OCV.

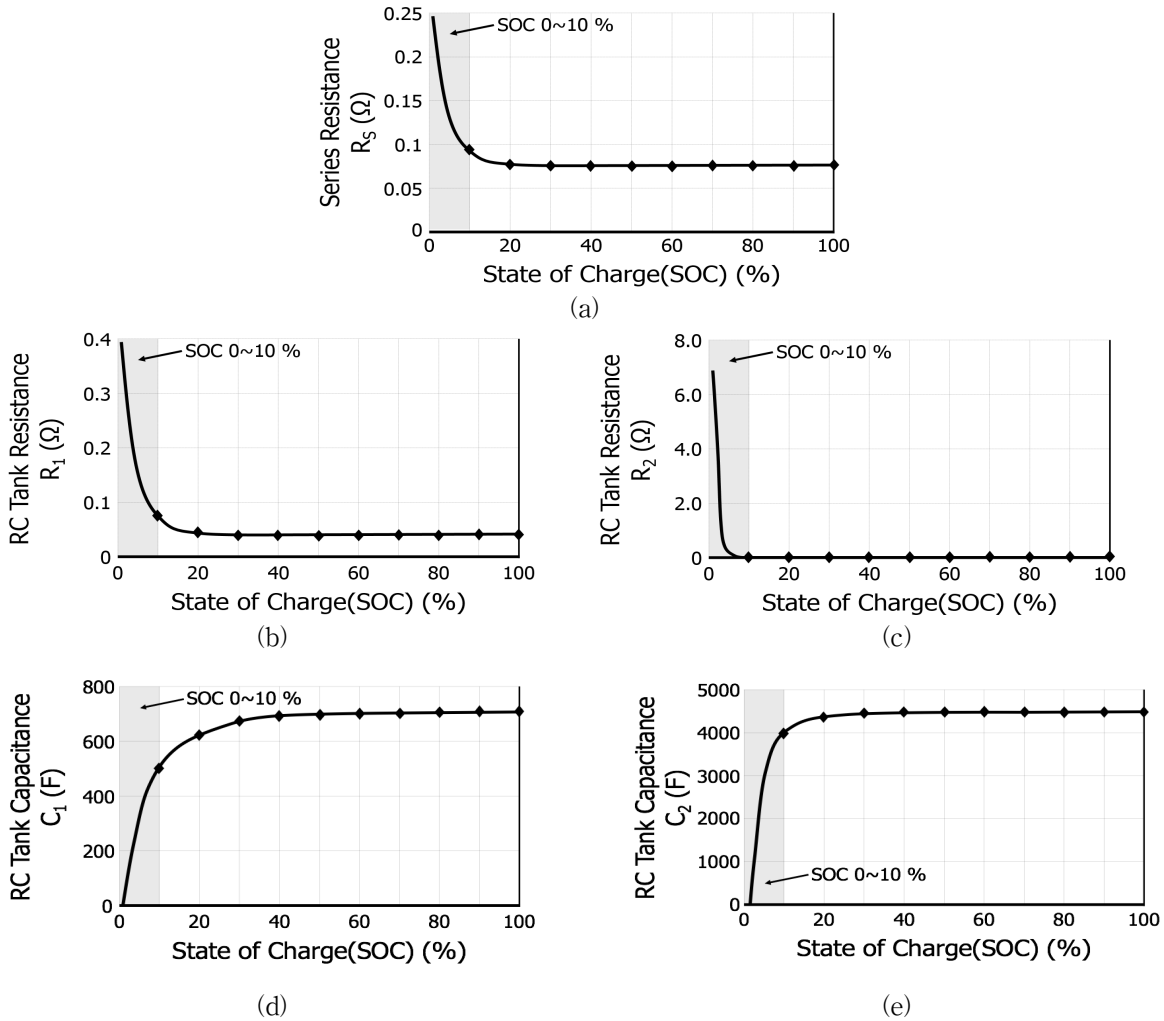


그림 10. 테브넨 RC Tank 배터리 모델의 SOC에 따른 파라미터 특성 (a) 직렬 저항 성분, (b) 첫 번째 RC Tank의 저항 성분, (c) 두 번째 RC Tank의 저항 성분, (d) 첫 번째 RC Tank의 커패시터 성분 (e) 두 번째 RC Tank의 커패시터 성분

Fig. 10. Parameter values of Thevenin RC Tank battery model versus SOC (a) R_s , (b) R_1 of the RC_{T1} , (c) R_2 of the RC_{T2} , (d) C_1 of the RC_{T1} , (e) C_2 of the RC_{T2} .

나. 개방전압원(OCV Source)

그림 8은 시뮬링크로 구현한 OCV 공급원이다. OCV 공급원의 가변함수 블록(Variable function block)은 식 (4)로 표현되며^[5~6] 그림 9는 SOC 특성 그래프이다.

$$V_{OC}(SOC) = -1.031e^{-35SOC} + 3.685 + 0.2156 \times SOC - 0.1178 \times SOC^2 + 0.3201 \times SOC^3 \quad (4)$$

OCV는 SOC가 0~10 %인 구간에 급격하게 변화하며, 10~80 %까지 완만한 기울기로 변화한다. 80 % 이후 배터리 전력이 포화될 때 까지 선형적으로 변한다.

다. 배터리 모델의 SOC 가변 소자

RC 블록은 그림 8의 OCV 공급원과 동일하게 구현

할 수 있다. 가변함수 블록은 식 (5)와 같이 R_s , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 의 SOC 함수로 표현된다^[5~7].

$$\begin{aligned} R_s(SOC) &= 0.1562e^{-24.37SOC} + 0.07446 \\ R_1(SOC) &= 0.3208e^{-29.14SOC} + 0.04669 \\ R_2(SOC) &= 6.603e^{-155.2SOC} + 0.04984 \\ C_1(SOC) &= -752.9e^{-13.51SOC} + 703.6 \\ C_2(SOC) &= -6056e^{-27.12SOC} + 4475 \end{aligned} \quad (5)$$

각 SOC 함수로 표현된 가변소자들은 지수함수와 선형함수의 합으로 표현된다. 배터리 OCV가 급격히 변하는 SOC 0~10 % 구간을 지수함수로 구현하고, 포화되는 구간을 선형함수로 구현한다. 그림 10(a), (b), (c)와 같이 저항성분은 SOC 증가에 따라 감소하는 결과를 보이며, 반대로 그림 10(d), (e)와 같이 커패시터 성분은 증가하는 결과를 보인다.

3. 배터리 모델 계수 보정 알고리즘

그림 11은 배터리 모델의 계수 보정 알고리즘을 간략화한 플로 차트다. 가장 먼저 배터리 모델링이 필요한 배터리를 선정하고, 배터리 모델을 선택한다. 배터리 모델은 배터리의 용량 및 제조사에 따라 다르게 선정할 수 있다. 배터리의 충·방전 특성 및 과도상태 특성 측정과 시뮬링크 기반 배터리 모델 구현을 병렬 수행하여, 두 값을 비교하여 오차를 확인한다. 이 과정에서 배터리 모델의 SOC 가변소자의 가변함수 블록의 계수값을 변화하며 오차를 줄인다. 실제 배터리 특성과 배터리 모델의 특성간 평균 오차율(Erroravg.)은 식 (7)을 사용하여 구할 수 있다. T는 시뮬레이션 및 측정의 수행 횟수이다. 본 연구의 최종 오차율은 5 %로 설정하였다. 5 % 오차율을 만족하는 배터리 모델의 가변소자의 SOC 계수 값을 도출한 후 4가지 전류모드 0.25C, 0.5C, 0.75C, 1C에서 동일한 계수 보정을 수행한다.

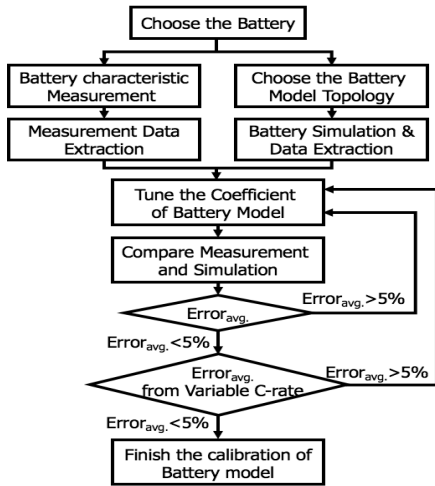


그림 11. 제안하는 배터리 모델의 계수보정 플로우차트
Fig. 11. Flow chart of the proposed battery model's coefficient calibration algorithm.

$$Error_{avg.} = \left(\sum_{T=0}^T \frac{SOC_{Model} - SOC_{Measure}}{SOC_{Model}} \times 100 \right) T \quad (7)$$

$$VAR(SOC) = a \times e^{(b \times SOC)} + C \quad (8)$$

배터리 모델의 SOC 가변 소자(Var(SOC))는 배터리 SOC가 0~10 %인 구간에서 급격하게 변하기 때문에 식 (8)과 같이 지수함수와 정수의 합 형태로 표현할 수 있다. 방전시의 계수 보정법을 예로 설명하면 다음과 같다. 가장 먼저 배터리 모델에 가장 큰 영향을 미치는 RS의 계수를 보정한다. RS의 계수를 증가시키면 배터리가 과도상태일 때의 IR Drop이 증가하기 때문에,

안정화 구간에서의 전압 변화를 실제 실험을 통해 얻은 방전 특성과 근사하게 구현할 수 있다^[8]. 이때, SOC가 0%으로 변화하면 안정화 구간에서 전압강하가 증가하기 때문에 a, b, c 계수를 모두 증가시킨다. 이에 따라 방전 전류가 시작되는 지점의 특성 변화(SOC 0~10%)는 R₁ 및 C₁의 a, b, c 계수 수정을 통해 보정할 수 있으며, 일정한 방전 전류가 흐른 뒤(SOC 20% 이상) 방전 특성은 R₂ 및 C₂의 계수를 통해 보정할 수 있으며 이에 따라 배터리 방전 특성에 대한 시뮬레이션 그래프와 실제 실험을 통해 도출한 그래프의 차이가 줄어드는 것을 실험을 통해 확인 할 수 있다. 그림 12는 기존의 값과 변경된 파라미터 값을 비교한 그래프이다.

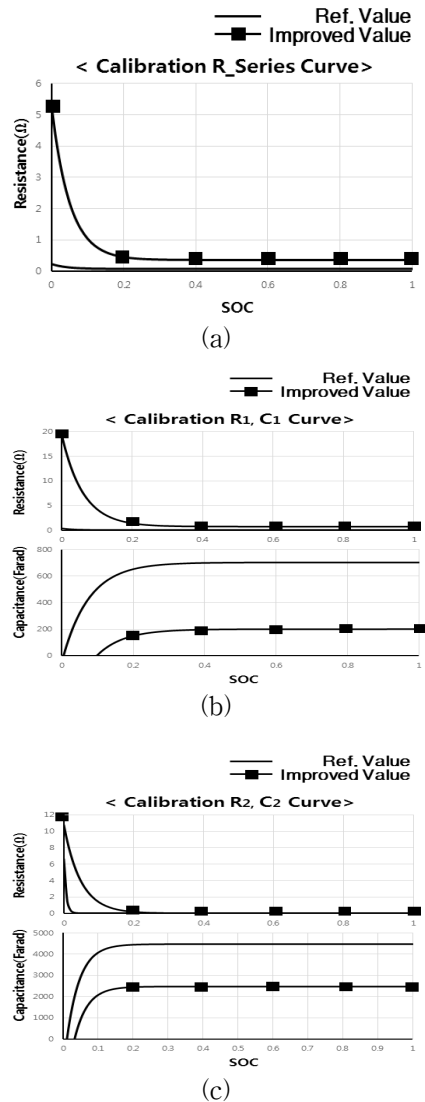


그림 12. R_{series}(a), R₁, C₁(b), R₂, C₂(c)파라미터 보정 그래프
Fig. 12. R_{series}(a), R₁, C₁(b), R₂, C₂(c)parameter calibration graph.

Ⅲ. 실험

본 논문은 실제 배터리 충·방전 및 과도상태 특성과 배터리 모델의 특성을 비교하여 배터리 모델의 SOC 계수 보정 알고리즘을 통해 평균 오차율을 감소시키는 것을 목표로 한다. 실제 배터리 충·방전 및 과도상태 특성을 추출하기 위해 280 mAh, 1600 mAh 배터리를 0.25C, 0.5C, 0.75C, 1C 의 전류모드로 실험을 진행하였다. 그림 13은 280 mAh 용량의 배터리를 각 전류모드에서 30분 방전 및 30분 안정화(무부하 상태 유지)를 반복하여 완전 방전한 결과이다. 배터리의 내부 보호회로로 인해 완전 방전시 배터리 양단의 전압은 3.0 V 로 나타난다. 그림 14는 일반적인 배터리 모델을 사용하여 280 mAh 배터리를 0.25C로 방전한 결과와 실제 배터리 측정 결과를 비교한 그래프이다. 방전 중, 두 결과의 평균 오차율은 최소 5 % 정도로 나타나지만, 안정화 구간에서 오차율은 최대 30 %로 매우 크다. 이는 실제 배터리와 배터리 모델의 SOC 계수의 차이로 발생하며, 제안하는

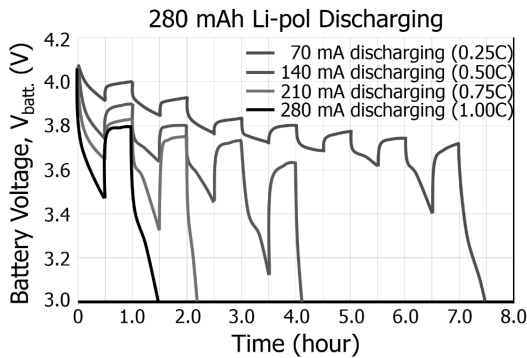


그림 13. 280 mAh 리튬-폴리머 배터리 방전 특성
Fig. 13. Discharging results of the 280 mAh Li-pol battery with 4 type C-rate.

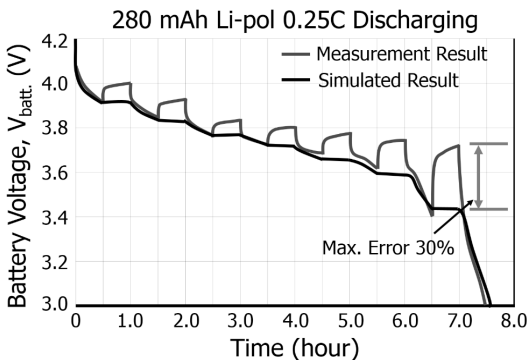
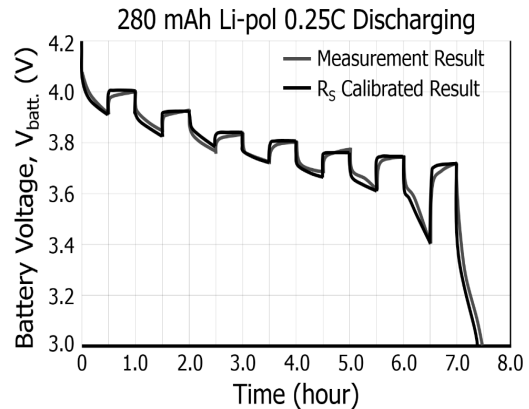
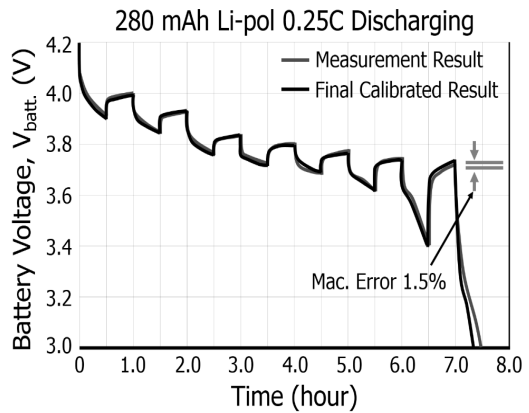


그림 14. 배터리 모델 기반 방전 시뮬레이션결과와 실제 배터리 방전 특성 비교(280 mAh, 0.25C)
Fig. 14. Comparison between general battery model based simulation results and real battery discharging results (280 mAh, 0.25C).

배터리 모델 계수 보정법에 따라 개선할 수 있다. 그림 15(a)는 RS 계수 보정에 따른 실제 배터리와 배터리 모델의 전압 특성을 비교한 그래프이며, 그림 15(b)는 배터리 모델의 모든 계수를 보정한 배터리 모델 특성과 실제 배터리 전압 특성을 비교한 그래프이다. 최대 오차율이 1.5 %로 제안하는 배터리 모델 계수 보정법을 사용한 배터리 모델이 실제 배터리를 잘 모사함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 15. 제안하는 배터리 모델의 계수보정 기반 개선된 배터리 모델과 실제 배터리 방전특성 비교 (a) 직렬 저항 성분 보정 모델 (b) SOC 계수 보정된 최종 배터리 모델

Fig. 15. Comparison results between improved battery model usign coefficient calibration and real battery discharging characteristic (a) series resistrance coefficient calibration model (b) final improved battery model.

Ⅳ. 결론

표 1에 4가지 전류모드에서 제안한 배터리 모델 계수 보정법을 적용한 개선된 배터리 모델의 방전 전압 특성

과 실제 배터리의 방전 전압 특성의 오차율을 정리하였으며(280 mAh 리튬-폴리머 배터리) 다른 용량의 배터리를(1600 mAh 리튬-폴리머 배터리) 같은 조건과 방법으로 실험하여 표 2에 나타내었다. 개선된 배터리 모델의 최대 오차율은 2.13 %이다. 표 3은 최종 보정된 계수를 갖는 배터리 모델의 SOC 함수를 보인다. 본 논문에서 제안한 배터리 모델 계수 보정 기법을 통해 기존 오차율 5~10%의 동적특성 모사를 최대 2.13% 오차율로 정확도를 향상시킬 수 있으며 또한 1가지 종류의 배터리 대상이 아닌 여러 종류의 실제 배터리 운용환경에 적용이 가능하다. 향후 배터리 SOC와 배터리 충·방전 횟수 및 주변 온도를 고려한 배터리 모델에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되며, 본 논문의 결과를 토대로 정확한 BMS 구축이 가능할 것으로 예측된다.

표 1. 280 mAh 배터리 모델의 방전 전압 특성 오차율 요약

Table1. Summary of discharge voltage characteristic error rate of 280 mAh battery model.

C-Rate (C) / Current (mA)	Average Error Rate (%)
0.25C / 70mA	1.50%
0.50C / 140mA	2.13%
0.75C / 210mA	1.93%
1.00C / 280mA	1.82%

표 2. 1600 mAh배터리 모델의 방전 전압 특성 오차율 요약

Table2. Summary of discharge voltage characteristic error rate of 1600 mAh battery model.

C-Rate (C) / Current (mA)	Average Error Rate (%)
0.25C / 400mA	1.43%
0.50C / 800mA	2.11%
0.75C / 1200mA	1.78%
1.00C / 1600mA	1.88%

표 3. 계수 보정된 테브닌 RC Tank 배터리 모델의 SOC 함수

Table3. SOC fuction of the calibrated Thevenin RC Tank battery model.

Parameter	Variable Function
R_s	$4.94 \cdot \exp^{(-19.82 \cdot SOC)} + 0.36$
R_1	$18.53 \cdot \exp^{(-16.58 \cdot SOC)} + 0.74$
C_1	$-752.9 \cdot \exp^{(-13.51 \cdot SOC)} + 200$
R_2	$10.76 \cdot \exp^{(-20.71 \cdot SOC)} + 0.0275$
C_2	$-6056 \cdot \exp^{(-27.12 \cdot SOC)} + 2475$

REFERENCES

- [1] Mann Cho, Do-Baek Nah, Sang Chul Kil, and Sang oo Kim "Li-Ion Traction Batteries for All-Electric Vehicle," Journal of Energy Engineering, vol. 20, no. 2, pp. 109~122, 2011.
- [2] Mesbahi T, Khenfri F "Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid Particle Swarm-Nelder-Mead (PSO-NM) optimization algorithm," Electric power systems research v.131, pp. 195-204 2016.
- [3] S. W. Moore and P. J. Schneider, "A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems," in Proc. SAE World Congr., 2001
- [4] M. Daowd, N. Omar, P. V. D. Bossche, J. V. Mierlo, "A review of Passive and Active Battery Balancing Based on MATLAB/SIMULINK," International Review of Electrical Engineering, 2011
- [5] M. Chen, and G. A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I - V Performance," IEEE Tran. on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, June 2006.
- [6] O. Erdinc, B. Vural and M. Uzunoglu, "A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading," IEEE International Conference on Clean Electrical Power, pp. 383-386, June 2009.
- [7] C. Sinkaram, K. Rajakumar, V. Asivadam, "eling Battery Management System Using The Lithium-Ion Battery," IEEE International Conference on Computing and Engineering, pp. 23-25 Nov. 2012.
- [8] C. H. Lin, H. W. Huang, and K. H. Chen, "Built-in Resistance Compensation (BRC) Technique for Fas Charging Li-Ion Battery Charger," IEEE Conference on Custom Intergrated Circuits, 2008.

저 자 소 개



이 대 건(정회원)-교신저자
2013년 국민대학교 전자공학부 학사
졸업.
2015년~현재 국민대학교 보안스마
트 전기자동차공학과 석사
과정.

<주관심분야: 배터리, 센서 시스템, RFIC>



정 원 재(정회원)
2010년 국민대학교 전자공학부 학사
졸업.
2012년 국민대학교 전자공학부
(공학석사).
2012~현재 국민대학교 전자공학부
박사과정.

<주관심분야: Analog IC 설계, 배터리, RFIC>



장 종 은
1996년 UCLA 전자공학과 학사
졸업.
1999년 UCLA 전자공학과
(공학석사).
2005~2009년 (주)유컴테크놀로지
연구소장.

2009년~현재 (주)에픽 솔루션 대표.

<주관심분야: Analog IC 설계, RFIC 중계기>



박 준 석(정회원)
1991년 국민대학교 전자공학부 학사
졸업.
1993년 국민대학교 전자공학부
(공학석사).
1996년 국민대학교 전자공학부
(공학박사).

1998~2003년 순천향대학교 정보 기술공학부
조교수.

2009년~현재 국민대학교 교수.

<주관심분야: IT융합기술, RFIC, 센서 시스템>