배터리 내부 파라미터 가변성에 기인한 등가회로 모델링 성능 분석

김재호*, 박진형*, 장성수**, 김종훈*
충남대학교*, 한국항공우주연구원**

Analysis of equivalent circuit modeling performance by internal parameter variability

JaeHo Kim*, Jinhyeong Park*, Sung-Soo Jang**, Jonghoon Kim*
Chungnam National University*, Korea Aerospace Research Institute**

ABSTRACT

배터리의 내부 파라미터는 외부환경 및 동작 영역에 따라 가변적인 특성이 존재한다. 이에 따라 배터리 모델의 추정성능이 결정된다. 본 논문에서는 두 개의 RC-ladder 전기적 등가회로 모델링을 이용하여 휴지구간, 방전구간 및 휴지구간에서 방정식 기반으로 추출한 파라미터의 비교 분석을 실시하고, 등가회로 모델기반으로 검증을 실시하였다.

1. 서 론

리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 긴 수명, 높은 정격전압, 환경 친화적, 낮은 자가 방전 등의 특성을 갖고 있어 잠수함, 전기 자동차(electric vehicle, EV), 인공위성 등 여러 분야에 사용되고 있다. 리튬 이온 배터리의 효율적인 사용을 위해서는 용도에 맞는 BMS(Battery Management System)가 필수적이다. BMS의 구성요소중 하나인 SOC(State of charge)의 추정은 매우 중요하다. SOC의 추정을 위해서는 모델기반 알고리즘이 필요한데 이를 위해서는 배터리 모델의 높은 추정성능이 바탕이 되어야한다[1].

본 논문에서는 배터리의 상태 추정을 위한 파라미터 분석을 하기위해 전기적등가회로 모델링을 사용하였다. 전기적 등가회로 모델은 계산량 및 파라미터 추출 시간을 고려하여 2개의 RC-ladder를 선정하였다. 그 후에 파라미터를 방전구간, 휴지구간, 방정식 기반으로 추출하고 모델링에 적용해서 시뮬레이션을 진행했으며, 각 파라미터 추출 방법의 결과를 비교 분석하였다.

2. 배터리 등가회로 모델

2.1 배터리 2차 RC-ladder 등가회로 모델

그림1은 배터리의 2차 RC-ladder 전기적 등가회로 모델이다. 전기적 등가회로 모델은 배터리의 비선형적인 특성을 정확하게 묘사할 수는 없으나, 계산량이 적다는 장점이 있어 알고리즘에 많이 활용되고 있다. 배터리 등가회로의 핵심파라미터는 OCV(Open circuit voltage), 직렬저항(R_i), 확산저항(R_1, R_2) 및 확산 커패시턴스(C_1, C_2)로 구성된다. 이 파라미터들을 등가회로 모델의 전기적 특성을 기반으로 추출하였다.

OCV는 배터리에 전류가 흐르지 않을 때의 배터리의 실제 단자 전압으로 배터리의 전압이 완전히 안정화 되었을 때의 전압으로 나타낸다. SOC(State of charge)는 가용한 전하 잔량을 배터리 용량과의 비율로 나타낸 것으로, 이는 식(1)처럼 전류적산법을 이용하여 계산된다. SOC_0은 SOC의 초기 값, C_n은 배터리의 정격용량, i는 배터리에 인가되는 전류를 나타낸다. 식 (2)는 키르히호프의 전압 법칙에 따른 배터리의 단자 전압을 나타낸 식이다. 식 (3)은 RC-ladder에서 커패시터와 저항에 흐르는 전류를 나타낸다. 그림 2는 배터리가 방전할 때의 전압 특성을 나타낸다. 방전할 때 순간적인 전압강하부분의 저항을 R_i, 지수적으로 감소하는 부분을 시정수를 기점으로 빠르게 감소하는 부분을 1차 RC-ladder(R_1, C_1), 느리게 감소하는 부분을 2차 RC-ladder(R_2, C_2)로 나타낼 수 있다.

$$SOC = SOC_0 - \int idt / C_n \tag{1}$$

$$v(t) = OCV(SOC(t)) - V_{c_1}(t) - V_{c_2} - V_{R_i}(t) \tag{2}$$

$$i_{R_1}(t) + Cv_C'(t) = i(t)(v'(t) = C\frac{di_{R_1}(t)}{dt}) \tag{3}$$

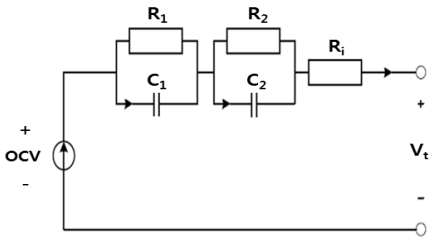

그림 1 배터리 전기적 등가회로 모델
Fig. 1 Battery electrical equivalent model

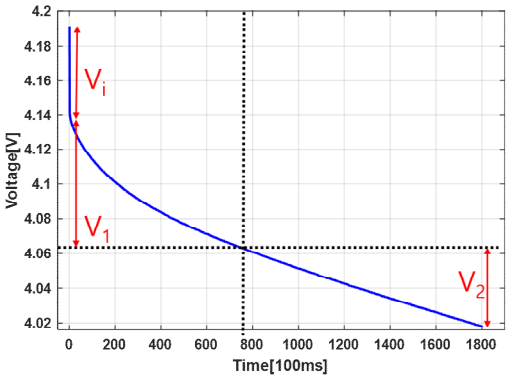

그림 2 방전 구간 배터리 전압 특성
Fig. 2 Battery voltage characteristic during discharge

2.2 등가회로 모델 파라미터 추출방법 비교 및 선정

2.2.1 방전/ 휴지 구간에서의 파라미터 추출

본 논문에서는 배터리의 파라미터를 추출하기 위해 휴지 구간, 방전 구간 및 방정식기반으로 파라미터를 추출하고 비교분석하였다. 먼저 휴지구간은 전류가 인가중인 셀에 전류를 차단하면 순간적으로 전압이 오르면서 특정 전압으로 수렴하는데 이 구간에서의 파라미터 추출은 그림 3에서처럼 순간적인 전압 상승 부분 V_i와 지수적으로 상승하는 부분에서 시정수를 기준으로 처음 빠르게 상승하는 부분의 전압을 V_1, 전압이 비교적 느리게 상승하는 부분의 전압을 V_2로 정의하고, 식 (4)와 (5)를 통해서 저항과 커패시턴스 값을 구할 수 있다. 식 (5)의 시정수 τ_1, τ_2는 전체 시정수 기점으로 나눈 곡선 각각의 시정수를 뜻한다. 방전구간에서의 파라미터 계산은 휴지 구간과 같은 방법으로 추출하였다. 방전 구간 및 휴지 기간에서는 $i(t) = i_{R1}(t)$를 가정하고 단순화 하여 추출하였다.

$$R_i = \triangle V_i / \triangle I, R_1 = \triangle V_1 / \triangle I, R_2 = \triangle V_2 / \triangle I \quad (4)$$

$$C_1 = \tau_1 / R_1, C_2 = \tau_2 / R_2 \quad (5)$$

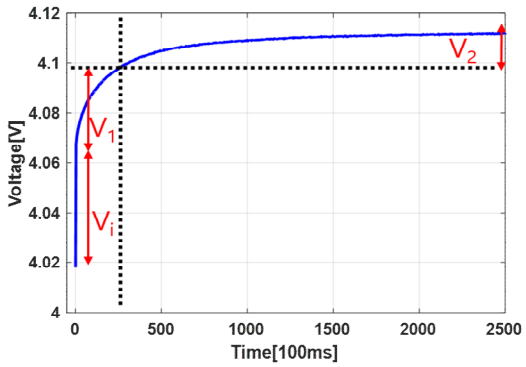

그림 3 휴지 기간 배터리 전압 특성

Fig. 3 Battery voltage characteristic during rest

2.2.2 방정식 기반 파라미터 추출

세 번째 방법으로 Matlab의 Curve fitting Tool을 사용하였다. 휴지기간에서의 전압파형함수를 식 (6)과 같이 추출하여 식 (7), (8)을 통하여 파라미터를 추출 하였다. 이 방법은 앞의 두 방법과 달리 커패시턴스 전류까지도 고려할 수 있다.

$$F(x) = A + Be^{-ax} + Ce^{-bx} \quad (6)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{a}, \tau_2 = \frac{1}{b} \quad (7)$$

$$R_1 = \frac{B}{(1 - e^{\frac{T_{dis}}{\tau_1}})I_{dis}} \quad R_2 = \frac{C}{(1 - e^{\frac{T_{dis}}{\tau_2}})I_{dis}} \quad (8)$$

3. 시뮬레이션 검증

표 1은 앞의 세 가지 파라미터 추출 방법의 결과이다. 표 1의 값을 등가회로 모델에 적용하였을 때 실제 값과의 최대 오차율을 표 2에 나타내었다. 가장 오차율이 작은 방정식 기반의 파라미터 추출 방식이 가장 우수한 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 방전구간에서 파라미터 추출방법간의 시뮬레이션 비교 그래프이다. 방정식 기반 방법이 오차가 가장 적은 것을 확인하였다. 분석 : 앞의 방전/휴지 구간에서의 파라미터 추출과 달리 방정식 기반 추출법은 커패시턴스 전류를 고려해줬는데 이로 인해서 식 (3)을 충분히 만족하기 때문에 배터리의 동적 특성을 더 잘 표현할 수 있다.

표 1. 파라미터 추출방법 간 결과 비교

Table 1. Comparing results between parameter extraction methods

	R_i	R_1	C_1	R_2	C_2
휴지 구간	0.074	0.022	707.072	0.0128	8719.594
방전 구간	0.077	0.025	568.008	0.0147	3042.443
방정식	0.074	0.026	1261.926	0.0204	16111.792

표 2. 추출방법에 따른 실제 값과의 최대 오차율

Table 2. The maximum error rate with the actual value according to the extraction method

추출방법	휴지구간	방전구간	방정식
오차율[%]	0.41	0.71	0.28

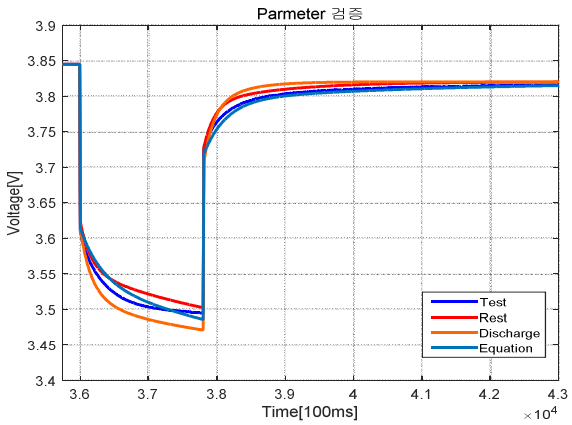

그림 3 배터리 단자전압 시뮬레이션 결과

Fig. 3 Simulation result of battery terminal voltage

4. 결 론

본 논문에서는 배터리 파라미터의 추출 방법에 따른 파라미터의 가변성을 비교 분석 하였으며, 배터리 등가회로 모델을 기반으로 검증하였다. 방전구간, 휴지구간, curve-fitting 기반 방정식 방법으로 파라미터를 비교한 결과 방정식 기반의 파라미터 추출방법이 가장 우수한 것을 확인하였다. 이를 기반으로 모델기반 배터리 SOC 추정 알고리즘에 개발 시 활용이 가능하다.

이 논문은 2018년 한국연구재단의 정지궤도복합 위성개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NRF-2018M1A3A4A03058068).

참 고 문 헌

[1] 김종훈, 전창윤, 허인넝, 조보형, 김범재 “OCV 히스테리시스 특성을 이용한 확장 칼만 필터 기반 리튬 폴리머 배터리 SOC 추정”, 전력전자학회, 전려전자학술대회논문집, 2011.11, 301-302

[2] 박진형, 이평연, 윤창오, 김종훈, 장성수 “배터리 팩 전기적 등가회로 모델 기반 파라미터 추출 및 시뮬레이션 검증”, 2017.11, 155-156