

배터리 가용 에너지 증대를 위한 최대 출력 전류 추정 알고리즘

허성준, 이재형, 노태원, 안정훈, 이병국[†]
 성균관대학교 정보통신대학

Estimation Algorithm of Maximum Output Current to Increase Available Energy of Battery

Sung Jun Heo, Jaehyung Lee, Tae Won Noh, Jung Hoon Ahn, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 배터리의 에너지 사용량을 증대시키기 위하여 출력 가능한 최대 전류를 실시간으로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 측정된 단자전압을 이용한 전압 모사 방식과 피드백 구조를 이용한 최대 출력 전류 추정 알고리즘으로 구성된다. 제안한 알고리즘을 Simulink 기반의 시뮬레이션과 Li ion 배터리를 이용한 실험을 통해 검증한다.

1. 서론

최근 다양한 분야에서 Li ion 배터리가 전원을 대체함으로써 배터리의 안정적인 운용을 위한 연구의 필요성이 강조되고 있다. 특히 큰 충/방전 전류가 흐르는 경우 내부 임피던스에 인가되는 전압에 의하여 단자전압이 허용 범위를 벗어나 안전 문제가 야기될 수 있으며 배터리의 상한 또는 하한 전압에 가까운 SOC (State of Charge)의 경우 작은 충/방전 전류에도 허용 전압 범위를 넘어갈 수 있다. 따라서 허용 전압 범위 내에서 배터리의 가용 출력 및 에너지를 최대한 사용하기 위하여 배터리의 단자전압이 상한 또는 하한에 닿지 않게 하는 최대 충전/방전 전류 (I_{max})를 실시간으로 추정하는 알고리즘이 필요하다^[1].

I_{max} 추정 알고리즘을 적용하기 위해서는 배터리의 단자전압을 모사하기 위한 모델과 배터리 모델 기반의 I_{max} 를 추정하는 알고리즘이 필요하다. 기존의 ECM (Equivalent Circuit Model)은 직렬 저항 (R_s)과 RC ladder로 구성된다. 하지만 전압 모사 정확도를 높이기 위해 많은 수의 RC ladder가 필요하며, 이로 인해 관리해야 할 파라미터 수의 증가와 연산량 증가의 문제를 야기하게 된다. 또한 I_{max} 를 추정하기 위하여 ECM의 단자전류와 전압 사이의 관계식을 이용하여 수식으로 표현하는 경우, C rate, SOC에 따른 파라미터 변동을 반영하기 위한 추가 연산이 요구된다. 게다가 SOC와 ECM 파라미터가 1:1 대응이 아님을 고려할 때, I_{max} 를 단순한 수식으로 표현하는 것에 한계가 존재한다.

따라서 본 논문은 I_{max} 를 단자전압이 상한 또는 하한에 닿게 하는 10초 동안의 정전류로 정의하고, 센싱을 이용한 단자전압 모사 알고리즘 및 피드백 구조의 I_{max} 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 NMC (Nickel Manganese Cobalt) type Li ion 배터리 (3.6V, 30.5Ah)를 이용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증한다.

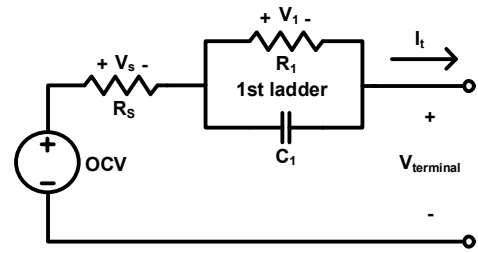


그림 1 배터리 등가 회로 모델
 Fig. 1 Equivalent circuit model of battery.

표 1 RC-ladder 전압 분석
 Table 1 RC-ladder voltage analysis.

시간 (t_k)	RC-ladder 전압 ($V_{1,k}$)
t_1	$I_{t,1} \cdot R_{1,1} \cdot \beta_1$
t_2	$I_{t,2} \cdot R_{1,2} \cdot \beta_2 + (I_{t,1} \cdot R_{1,1} \cdot \beta_1) \cdot \alpha_2$
t_3	$I_{t,3} \cdot R_{1,3} \cdot \beta_3 + (I_{t,2} \cdot R_{1,2} \cdot \beta_2 + I_{t,1} \cdot R_{1,1} \cdot \beta_1 \cdot \alpha_2) \cdot \alpha_3$

2. 전압 모사 추정 알고리즘

2.1 기존 전압 모사 알고리즘 한계

그림 1의 기존 ECM은 R_s , R_1 , C_1 및 OCV (Open Circuit Voltage)와 같은 파라미터를 이용하여 전류 프로파일에 대한 단자전압을 모사한다. 특히 배터리의 분극 현상으로 발생하는 전압은 시정수 ($R_1 C_1$)를 가지고 증감 하는 RC ladder의 전압 (V_1)을 통해 표현한다. V_1 을 시간의 흐름에 따라 정리하면 표 1과 같고, 이를 점화식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$V_{1,k} = V_{1,k-1} \cdot \alpha_k + I_{t,k} \cdot R_{1,k} \cdot \beta_k \quad (1)$$

$$\alpha_k = e^{-\frac{\Delta t}{R_{1,k} C_{1,k}}}, \quad \beta_k = (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_{1,k} C_{1,k}}})$$

α_k 는 이전 시간 전압 ($V_{1,k-1}$)의 감소율을 의미하며, β_k 는 k번째 인가된 전류 ($I_{t,k}$)로 인한 전압 상승률을 나타낸다. 이 때, α_k 와 β_k 는 단자전류 크기 및 SOC에 따라 결정되는 $R_{1,k}$, $C_{1,k}$ 을 통해 결정된다. 하지만, 한정된 수의 RC ladder를 사용하는 ECM의 한계를 고려할 때, $R_{1,k}$, $C_{1,k}$ 을 통해 계산되는 α_k 와 β_k 는 오차를 가지게 된다.

따라서 표 1에서와 같이 부정확한 α_k 와 β_k 가 누적되어 V_1 을

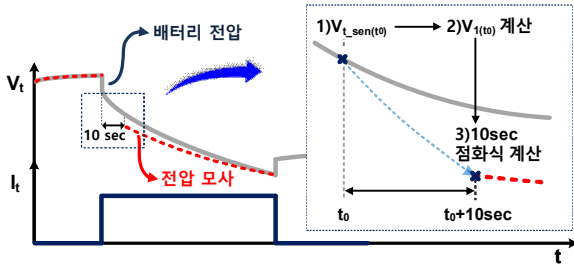


그림 2 제안하는 단자전압 모사 알고리즘
Fig. 2 Proposed algorithm to describe terminal voltage.

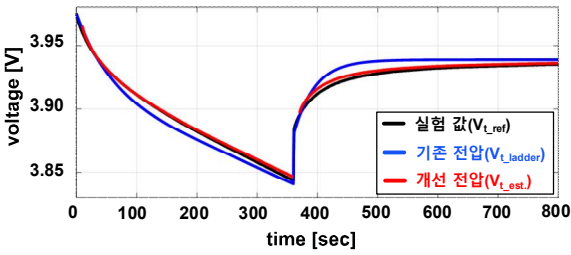


그림 3 전압 모사방식 비교 및 검증
Fig. 3 Comparison and verification of described voltage.

계산하는 경우, ECM을 통해 모사된 단자전압은 시간이 흐를수록 큰 오차가 발생하게 된다. I_{max} 가 ECM의 단자전압과 전류 사이의 관계식을 통해 도출되는 것을 고려할 때, 기존 ECM의 전압 모사 오차는 I_{max} 추정 정확도를 감소시키는 요인이 된다.

2.2 센싱 기반 전압 모사 알고리즘

제안하는 전압 모사 알고리즘은 부정확한 파라미터로 인해 V_1 모사 오차가 누적 되는 것을 최소화한다. 이를 위해 그림 2와 같이 센싱된 단자전압($V_{t, sen}$)과 전류($I_{t, sen}$)를 이용하여 10초 뒤의 V_1 를 예측한다. 현 시점 (t_0)의 V_1 은 ECM의 전압 관계식을 이용하여 식 (2)와 같이 계산된다. 이 때, R_s 와 OCV는 SOC 및 C rate에 따른 look up table을 통해 규명되고 I_{max} 추정을 위해 필요한 10초 뒤 단자전압 ($V_{t,k}(t_0+10)$)은 식 (2)의 결과를 기준으로 식 (1)의 점화식을 10초 동안 적용하여 예측할 수 있다.

$$V_1(t_0) = OCV(t_0) - I_{t, sen} \cdot R_s(t_0) - V_{t, sen} \quad (2)$$

$$V_{t,k}(t_0+10) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &= OCV(t_0+10) - v_s(t_0+10) - V_1(t_0+10) \\ &= OCV_k - I_{t, sen} \cdot R_{s,k} \\ &\quad - \left\{ I_{t,k} \cdot R_{1,k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_{1,k}C_{1,k}}}\right) + V_{1,k-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{R_{1,k}C_{1,k}}} \right\} \end{aligned}$$

전압 모사가 이루어지는 시간 동안 연속적으로 점화식이 사용되는 기존 ECM 대비, 제안하는 전압 모사 알고리즘($V_{t, est.}$)은 10초 동안만 점화식을 사용하기 때문에 α_k 와 β_k 인하여 발생하는 누적 오차를 최소화 할 수 있다.

그림 3은 1C 전류를 통해 방전 후 휴지 시 기존 ECM ($V_{t, ladder}$)과 제안된 전압 모사 알고리즘사이 ($V_{t, est.}$)의 전압 모

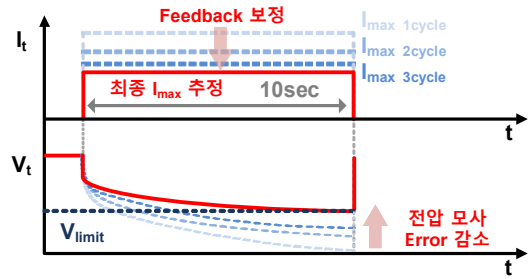


그림 4 제안하는 I_{max} 추정 알고리즘
Fig. 4 Proposed I_{max} estimation algorithm.

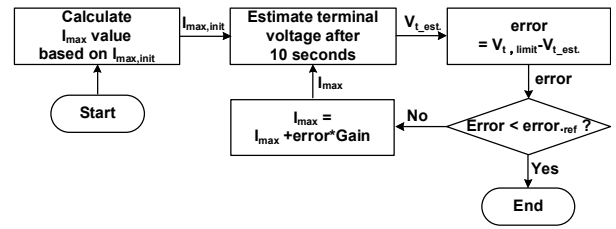


그림 5 I_{max} 추정 플로우 차트
Fig. 5 Flowchart for I_{max} estimation.

사 정확도를 나타낸다. 실험 결과 ($V_{t, ref}$) 대비 $V_{t, ladder}$ 과 $V_{t, est.}$ 각각의 평균 오차는 12.1mV, 3.2mV가 측정되었다. 따라서 $V_{t, est.}$ 를 사용하였을 경우 오차율이 $V_{t, ladder}$ 대비 약 73.6% 개선 되었다.

3. I_{max} 추정 알고리즘

3.1 피드백 구조 I_{max} 추정 알고리즘

I_{max} 는 $V_{t, ladder}$ 의 전압 전류 관계식을 기반으로 10초 뒤의 단자전압이 하한전압 또는 상한전압 (V_{limit})이 되게 하는 전류의 크기를 계산하여 표현한다. 그러나 표 1과 같이 I_{max} 도출 기준 동안 변화하는 파라미터가 모두 고려되어야 하므로 식 (4)와 같이 단순화 된 형태로 표현하는데 한계가 존재한다. 또한 R_s , R_1 , C_1 등의 ECM 파라미터는 C rate, SOC 등과 1:1 함수가 아니기 때문에 I_{max} 와 관련된 식 정리에 어려움이 존재한다. 따라서 본 논문은 그림 4와 같이 피드백 구조를 통해 I_{max} 추정 오차를 감소시키는 알고리즘을 제안한다.

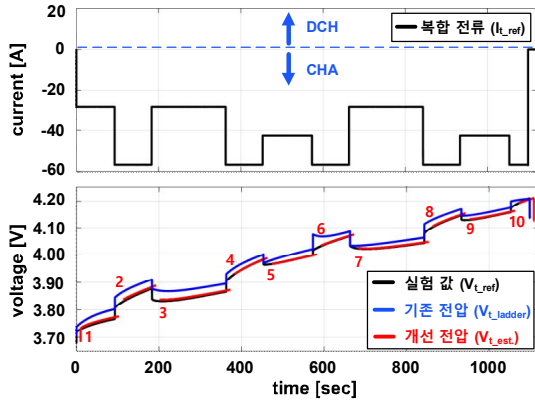
$$I_{max-\epsilon} = \frac{OCV - V_{t, min}}{R_s + R_1 \left(1 - e^{-\frac{-\Delta t}{R_1 C_1}}\right)} \quad (4)$$

식 (4)는 V_1 의 초기 값이 0V이고 I_{max} 가 인가되는 동안 SOC는 변화하지만 OCV, R_s , R_1 , C_1 의 변화는 없다고 가정 한 후 도출된 식으로 초기 I_{max} 를 계산한다. I_{max} 를 도출하기 위해 22절에서 제안된 전압 모사 알고리즘을 통해 초기 I_{max} 인가 후 10초 뒤의 전압을 예측한다. 또한 초기 I_{max} 의 오차를 보정하기 위해 예측된 V_t 와 V_{limit} 간의 오차는 Gain과 곱해진 후 이전 I_{max} 에 더해짐으로써 I_{max} 오차가 보정된다. 이러한 과정은 V_t 와 V_{limit} 간의 오차가 1mV 이내로 될 때까지 반복된다. 그림 5는 I_{max} 추정 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

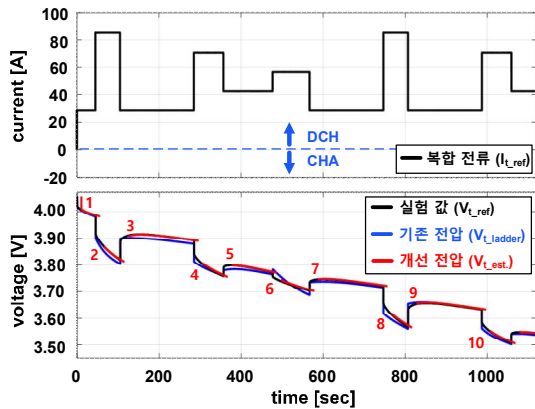


(a) 실험 장비 (b) NMC-type battery

그림 6 충전/방전기 및 NMC-type Cell
Fig. 6 Experiment apparatus and NMC-type cell.



(a) 충전 복합 프로파일 검증



(b) 방전 복합 프로파일 검증

그림 7 충전/방전 복합 프로파일 검증
Fig. 7 Verification for charging/discharging combined profile.

표 2 모사방식에 따른 전압 최대 오차
Table 2 Maximum voltage error according to describing method.

충전	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	평균
SOC [%]	42.9	45.7	50.5	55.8	60.6	65.8	70.5	75.8	80.6	85.8	-
V_{t_ladder} [mV]	-35.7	-36.8	-39.2	-24.1	-23.1	-43.1	-20.0	-30.5	-18.1	-16.5	-28.7
V_{t_est} [mV]	-9.1	-14.0	-11.8	-10.1	-9.3	-8.6	-9.3	-9.0	-8.9	-8.3	-9.9
방전	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	평균
SOC [%]	86.1	84.2	79.8	74.4	69.7	64.5	59.8	54.2	49.8	44.3	-
V_{t_ladder} [mV]	6.10	19.5	16.0	17.3	15.8	-23.1	9.66	24.8	-9.42	15.3	9.2
V_{t_est} [mV]	3.0	8.2	17.6	3.2	9.8	3.4	7.3	5.0	10.6	4.1	7.2

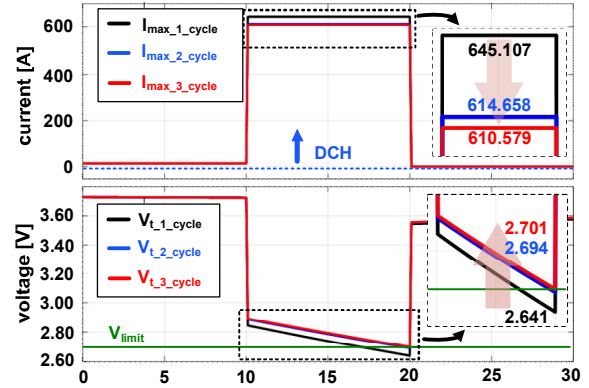


그림 8 피드백 기반 I_{max} 알고리즘 검증
Fig. 8 Verification for feedback based I_{max} algorithm.

3. 검증

알고리즘 검증을 위해 그림 6 (a)의 충전/방전기와 (b)의 NMC type Li ion 배터리 (3.6V, 30.5 Ah)를 이용한 단전지 실험을 통해 추출된 파라미터가 사용된다. 그림 7은 단자전압 모사 알고리즘 검증을 위하여 다양한 크기의 전류로 구성된 복합 로딩 프로파일을 이용한 실험결과를 나타낸다. 실제 배터리의 V_{t_ref} 대비 V_{t_est} 는 충전/방전 시 각각 7.93mV, 23.6mV의 오차를 갖으며, V_{t_ladder} 는 2.11mV, 9.75mV의 오차를 갖는다. 또한 V_{t_est} 의 정확도는 V_{t_ladder} 대비 충전/방전 시 각 66.4%, 78.3% 향상 되었다. 표 2는 충전 및 방전 시 구간 별 전압 모사 최대 오차를 나타낸다.

피드백 기반 I_{max} 추정 알고리즘을 검증하기 위해 그림 8과 같이 Simulink 기반의 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 SOC 50%, 0.5C 방전 상태의 배터리를 가정하여 I_{max} 가 10초 동안 인가 되었을 때 1mV 이하의 전압 오차를 만족시키는 I_{max} 를 산출하였다. 시뮬레이션 결과 $V_{t_1_cycle}$ 오차가 발생하여 $I_{max_1_cycle}$ 오차 또한 크게 발생하지만 피드백 2회 반복 후 조건을 만족하는 I_{max} 를 예측하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 배터리가 출력 할 수 있는 I_{max} 를 실시간으로 추정함으로써 가용에너지를 증가시킬 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 구현된 전압 모사 알고리즘은 센싱을 통한 방식으로 배터리의 RC ladder에 누적된 오차를 감소시킴으로써 기존 방식 대비 약 73.6%의 개선효과를 가졌다. 또한 피드백 방식 알고리즘을 적용하여 1mV 이하의 전압 오차를 만족시키는 I_{max} 를 산출하였다. 본 논문의 알고리즘을 적용 시 배터리의 허용 전압 범위 내에서 가용 출력 및 에너지를 최대화 할 수 있다.

참고 문헌

[1] S. Mohan, Y. Kim, and A. G. Stefanopoulou, "Estimating the power capability of li ion batteries using informationally partitioned estimators," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 24, no. 5, pp. 1643-1654, Sep. 2016.