

# 전기자동차용 배터리의 최대 가용 출력 전류 추정 알고리즘

이재한, 배정현, 노태원, 이병국<sup>†</sup>  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Maximum Output Current Estimation Algorithm for Battery of EVs

Jae Han Lee, Jeong Hyun Bae, Tae-Won Noh, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차용 배터리의 충방전 시 단자전압이 배터리의 상하한 전압에 도달하지 않는 최대 가용 출력 전류 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 SOC에 따라 변화하는 내부 파라미터를 고려하여 일정 시간동안 배터리가 출력 가능한 최대의 전류를 추정함으로써 해당 시간 동안 배터리의 출력을 보장하고 배터리의 가용 에너지를 극대화한다. 알고리즘을 검증하기 위하여 전기자동차용 배터리를 이용한 실험 및 시뮬레이션을 진행한다.

### 1. 서 론

최근 전기자동차 시장이 성장함에 따라 전기자동차 배터리의 운용에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 전기자동차 배터리로 주로 사용되고 있는 Li-ion 배터리는 자동차의 급가속 및 급정거에 의해 순간적으로 큰 전류가 인가될 경우 그로 인해 배터리 단자 전압에 급격한 변화가 발생하여 단자 전압이 허용 범위를 벗어날 수 있다. 배터리의 단자 전압이 허용 범위를 벗어나게 되면 안전 문제 및 노화 가속 등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 배터리의 최대 가용 출력 전류 ( $I_{max}$ )를 추정하여 배터리 전압이 상하한 전압에 도달하지 않도록 제어하는 방안이 필요하다.

$I_{max}$ 를 추정하기 위해서는 먼저 ECM (Equivalent circuit model)을 구성하여 인가 전류에 대한 단자 전압의 동특성을 분석해야 한다. 분석 결과를 통해 배터리 단자 전압과 충방전 전류 사이의 관계식을 도출하고, 도출된 관계식과 ECM의 파라미터를 이용하여 상하한 전압과 현재 단자 전압으로부터  $I_{max}$ 를 추정해야 한다. 그러나 SOC (State of charge), 온도, 노화 등 동작 환경에 따라 ECM의 파라미터가 비선형적으로 변화하기 때문에 이를 실시간으로 추출하여  $I_{max}$  추정에 적용하기 위한 방안이 필요하다.

이러한 점을 고려하여 기존에는 실험을 통해 배터리의 SOC, 온도, 노화 상태에 따른  $I_{max}$ 를 추출하여 LUT (Lookup table)을 구성하는 방법을 사용하였다. 그러나 이는 LUT 추출을 위해 다수의 실험이 필요하고, 이 때 배터리의 사용 방식에 따라 단자 전압의 변화 양상이 달라지기 때문에 안전을 위해 실험으로 추정된  $I_{max}$ 보다 작은 값을 사용하게 되어 비효율적으로 동작하게 된다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 배터리 파라미터 변화를 고려한 실시

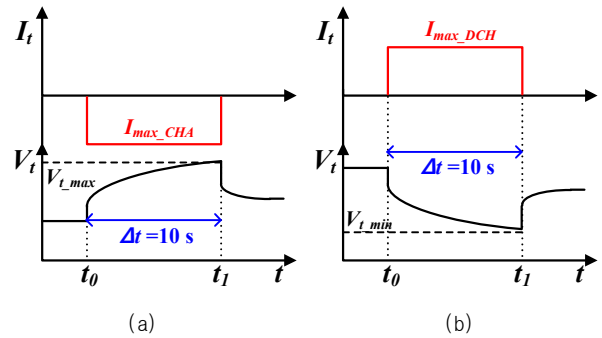


그림 1  $I_{max}$  인가 시 단자 전압 변화: (a) 충전 (b) 방전  
 Fig. 1 Variation of terminal voltage applying  $I_{max}$ : (a) charging (b) discharging.

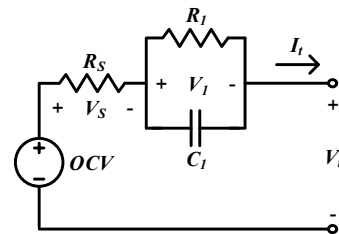


그림 2 배터리 등가 회로 모델  
 Fig. 2 Battery equivalent circuit model.

간  $I_{max}$  추정 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 배터리의 ECM을 통해 단자 전류와 전압 간 동특성을 분석하고 분석 결과를 기반으로  $I_{max}$  수식을 도출한다. 도출된 수식에서 동작환경에 따라 변화하는 파라미터를 반영하여  $I_{max}$ 를 실시간으로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 전기자동차용 배터리 팩을 이용한 실험을 통해 검증한다.

### 2. $I_{max}$ 추정 알고리즘

#### 2.1 배터리 동특성 분석을 통한 $I_{max}$ 추정

본 논문에서는 그림 1과 같이 최대 가용 전류를 배터리의 단자 전압이 상하한에 도달하게 하는 10초 동안의 충방전 정전류 ( $I_{max\_CHA}$ ,  $I_{max\_DCH}$ )로 정의한다. 이 때 10초의 시간 조건은 자동차의 급가속 및 급제동 시간을 고려하여 선정하였다.

최대 가용 전류를 도출하기 위하여 내부 저항 ( $R_s$ )과 1차 RC-ladder로 구성된 그림 2의 ECM을 이용한다<sup>[1]</sup>. 그림 2에서 측정이 가능한 파라미터는 단자 전류 ( $I_t$ )와 단자 전압 ( $V_t$ )이

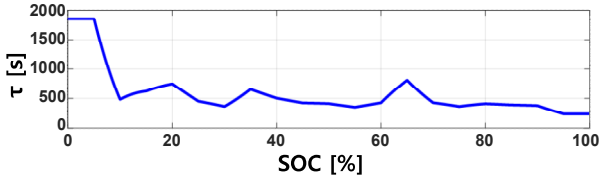


그림 3 SOC에 따른  $V_I$  시정수 ( $\tau$ ) 변화  
Fig. 3 Times constant variations of  $V_I$  according to SOC.

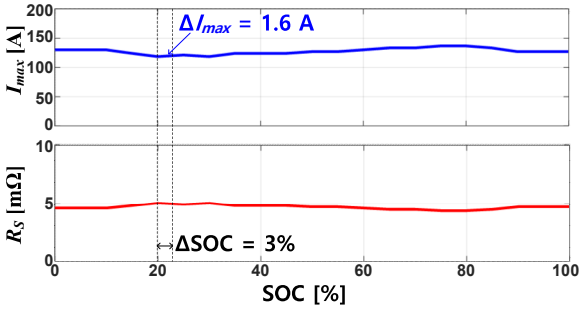


그림 4 SOC에 따른  $R_s$  및  $I_{max}$  변화  
Fig. 4 Variations of  $R_s$  and  $I_{max}$  according to SOC.

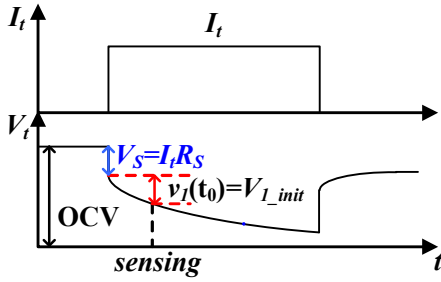


그림 5 측정값을 통한 파라미터 계산  
Fig. 5 Calculation of parameters using measured values.

며, 이를 통해  $I_{max}$ 를 추정하기 위해 정전류로 충방전될 때 10초 후 시점 ( $t_1$ )의 단자 전압을 모사하면 (1), (2)와 같이 나타난다.

$$V_i(t_1) = OCV(t_1) - I_t(t_1)R_s(t_1) - V_L(t_1) \quad (1)$$

$$V_L(t_1) = V_{L\_init} e^{-\frac{10}{R_1(t_1)C_1(t_1)}} + I_t(t_1)R_1(t_1) \left(1 - e^{-\frac{10}{R_1(t_1)C_1(t_1)}}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서  $V_{L\_init}$ 은 현재 시점에서의  $V_L$ 을 의미한다. 두 수식을 통해  $I_t$ 가 정전류로 10초 동안 인가되었을 때 전압을 모사할 수 있고, 따라서 (1)의  $V_L$ 를 상하한 전압으로 가정했을 때  $I_{max\_CHA}$ ,  $I_{max\_DCH}$ 에 대한 식이 (3), (4)와 같이 나타난다.

$$I_{max\_DCH} = \frac{OCV(t_1) - V_{L\_init} e^{-\frac{10}{R_1(t_1)C_1(t_1)}} - V_{t\_min}}{R_s(t_1) + R_1(t_1) \left(1 - e^{-\frac{10}{R_1(t_1)C_1(t_1)}}\right)} \quad (3)$$

$$I_{max\_CHA} = \frac{OCV(t_1) - V_{L\_init} e^{-\frac{10}{R_1(t_1)C_1(t_1)}} - V_{t\_max}}{R_s(t_1) + R_1(t_1) \left(1 - e^{-\frac{10}{R_1(t_1)C_1(t_1)}}\right)} \quad (4)$$

식 (3), (4)에서  $I_{max}$ 를 도출하기 위해서는  $R_L$ ,  $C_L$ ,  $R_s$ ,  $V_{L\_init}$ , OCV (Open circuit voltage) 값을 알아야 하고 이 중  $V_{L\_init}$ 을 제외한 파라미터의 경우  $t_1$  시점의 파라미터를 알아야 한다. 그러나  $t_1$  시점의 파라미터는 SOC에 따라 달라지기 때문에 파라미터의 변화를 고려한  $I_{max}$  추정 로직이 요구된다.

## 2.2 $I_{max}$ 추정을 위한 파라미터 추출

식 (3), (4)에서  $R_L$ 과  $C_L$ 의 경우  $V_L$ 의 시정수 ( $\tau$ )와 같은 형태로 반영된다. 이 때  $\tau$ 의 크기가 그림 3에 나타난 것과 같이 10초에 비해 매우 크기 때문에, SOC에 따라  $R_L$ 과  $C_L$ 이 변화해도 그로 인한  $I_{max}$  추정값의 변화는 미미하게 나타난다. 따라서  $I_{max}$  추정 시  $R_L$ 과  $C_L$ 은 10초 동안의 변화를 무시하고 현재 시점의 값을 사용하였으며 현재 시점의 파라미터는 주행 중 실시간으로 추정할 경우 별도의 알고리즘이 요구되기 때문에 SOC에 따른 LUT로 도출하였다.

반면  $R_s$ 의 경우 (1)에서 전류가 순간적으로 변할 때 OCV,  $V_L$ 은 변화하지 않으므로 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta V_i(t)}{\Delta I_t(t)} = R_s(t) \quad (5)$$

따라서  $R_s$ 의 크기는  $V_L$ 과  $I_t$ 의 변화량을 계산하여 도출할 수 있기 때문에  $R_s$ 의 현재 값은 실시간으로 계산된 값을 사용하였다. 또한, 배터리의 전류 정격을 고려하였을 때 10초 동안 SOC의 변화량은 3%를 초과할 수 없다. 따라서 SOC가 3%만큼 변화하였을 때 SOC에 따른  $R_s$  변화가  $I_{max}$  추정에 미치는 영향을 분석하였고 그 결과가 그림 4와 같이 나타났다. 그림 4에서 SOC 3% 변화 시  $I_{max}$  추정 값 변화가 1.6 A로 작게 나타났다 때문에  $I_{max}$  추정을 위한  $R_s$  추출 시 10초 동안의 변화를 무시하고 현재 값을 사용하였다.

$V_{L\_init}$ 의 경우에는 직접적인 측정이 불가능하기 때문에, 그림 5와 같이  $V_L$ 의 측정값을 통해 도출한다. 그림 5에서  $V_{L\_init}$ 은 (1)과 같이  $V_L$ 과 OCV,  $I_t$ ,  $R_s$ 에 따라 결정되는데 이 중 OCV와  $V_s$ 는 실시간 추정이 가능하고  $V_L$ 과  $I_t$ 는 측정값이므로  $V_{L\_init}$  값을 실시간으로 도출하는 것이 가능하다.

이와 달리 OCV는 SOC에 따른 값을 추출하기 위해 별도의 실험이 요구되므로, 현재 SOC에 해당하는 OCV를 도출하기 위해 SOC에 따른 LUT를 사용하였다. 또한  $I_{max}$  추정을 위해 10초 후의 OCV를 구하기 위해서는 SOC의 변화를 예측해야 하는데,  $I_{max}$ 에 따른 10초 후의 SOC가 (6), (7)과 같이 나타난다.

$$SOC(t_1) = SOC_{init} + \Delta SOC \quad (6)$$

$$\Delta SOC = \frac{I_{max}}{360 \times C-rate} \times 100\% \quad (7)$$

식 (6)에서  $SOC_{init}$ 은 현재 시점의 SOC를 나타내고,  $\Delta SOC$ 는 10초 동안 변화하는 SOC를 의미한다. SOC의 변화량 계산에는 (7)에 나타난 것과 같이  $I_{max}$  값이 필요하므로 본 논문에는

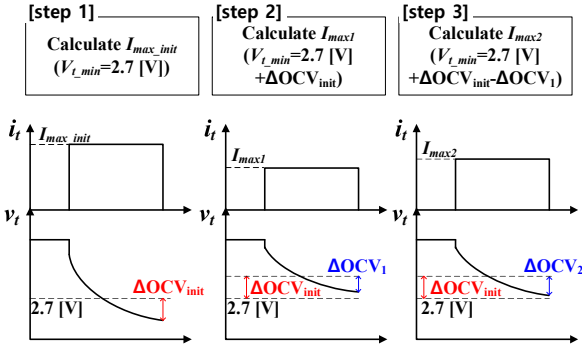


그림 6 알고리즘 진행 과정  
Fig. 6 Process of proposed algorithm.

서는 SOC 변화량을 계산하지 않고  $I_{max}$ 를 추정하기 위한 알고리즘 구현을 진행하였다.

### 2.3 OCV 변화를 고려한 $I_{max}$ 추정 알고리즘

식 (3), (4)에서 OCV를 현재 시점에서 구할 수 없기 때문에, 이를 SOC와 같이 현재 시점의 OCV와 10초 동안의 OCV 변화량으로 나누면 (8)과 같이 나타난다.

$$OCV(t_1) = OCV_{init} + \Delta OCV \quad (8)$$

그림 6은  $I_{max}$  추정 알고리즘의 진행 순서를 나타낸다. 그림 6의 step 1에서는  $\Delta OCV$ 를 0으로 가정한 후 (3), (4)를 통해 최대 전류 ( $I_{max\_init}$ )를 추정한다.  $I_{max\_init}$  추정 시  $\Delta OCV$ 가 0이기 때문에 추정된  $I_{max\_init}$ 로 10초 후 단자 전압을 예측할 경우 그림 6과 같이 상하한 전압을 초과하는 형태로 나타난다. 이에 따라 상하한 전압을 초과하지 않기 위해  $I_{max\_init}$ 에 의해 발생한  $\Delta OCV_{init}$ 를 반영하여  $I_{max1}$ 을 다시 추정하는데, 이 때 추정된  $I_{max1}$ 의 크기가  $I_{max\_init}$ 보다 작기 때문에  $I_{max1}$ 에 의해 발생하는  $\Delta OCV_1$ 은  $\Delta OCV_{init}$ 보다 작게 나타난다.

따라서  $I_{max1}$  인가 시 10초 후 단자 전압은 step 2와 같이 실제 상하한 전압에 도달하지 못하는 방향으로 나타나  $I_{max1}$  추정 값이 이상적인  $I_{max}$ 에 비해 약간의 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 이렇게 발생한 오차는 추정된  $I_{max}$ 가 실제 상하한 전압에 도달하게 하는  $I_{max}$ 에 비하여 항상 작게 나타나도록 하기 때문에 배터리의 단자 전압 범위를 초과하지 않아 안정적인 동작을 보장할 수 있다.

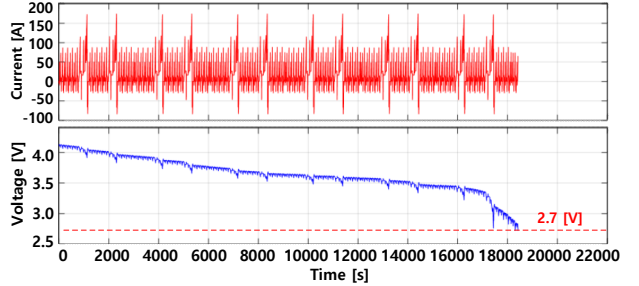
### 3. 실험을 통한 검증

$I_{max}$  추정 알고리즘을 검증하기 위하여 표 1에 나타난 NMC (Nickel Manganese Cobalt) type 배터리 셀을 통해 실험을 진행하였다. 실험을 위한 프로파일은 전기자동차의 주행 상태를 가정하여 NEDC (New European Driving Cycle) 프로파일을 사용하였다. 비교를 위해  $I_{max}$  추정 알고리즘이 적용되지 않은 상태에서 NEDC 프로파일을 통해 배터리의 단자전압이 하한전압에 도달할 때 까지 실험을 진행하였고, 이후  $I_{max}$  추정 알고리즘을 적용하여 NEDC 프로파일의 전류 크기가  $I_{max}$ 보다 작아질 경우  $I_{max}$ 로 방전되도록 실험을 진행하였을 때 그 결과가 그림 7과 같이 나타났다. 그림 7 (a)에서 NEDC 프로파일을 통해 방전을 진행하였을 때 약 19000초가 지난 시점에서 단자 전압이 하한 전압에 도달하여 방전이 중단되었고 SOC 사용량이

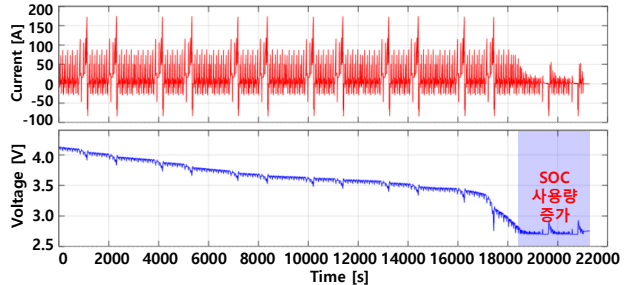
표 1 배터리 셀 스펙

Table. 1 Specifications battery cell.

Parameter	Value	Unit
Battery Type	NMC	[-]
Capacity	89	[Ah]
Voltage Range	2.7 - 4.2	[V]
Nominal Voltage	3.6	[V]



(a)



(b)

그림 7 NEDC 프로파일이 인가된 배터리 전압 및 전류: (a)  $I_{max}$  추정 알고리즘 미적용, (b)  $I_{max}$  추정 알고리즘 적용

Fig. 7 Voltage and current of battery based on NEDC profile: (a) without  $I_{max}$  estimation algorithm, (b) with  $I_{max}$  estimation algorithm.

90.37%에 도달하는 것을 확인하였다. 반면  $I_{max}$  추정 알고리즘이 적용된 그림 7 (b)의 경우 이전 NEDC 프로파일을 통한 방전이 중단된 시점에서 전류가 감소하며 추가적인 방전이 진행되어 SOC 사용량이 97.95% 까지 증가하여  $I_{max}$  추정 알고리즘에 의해 SOC 사용량이 증가하였음을 검증하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 전기자동차용 배터리의 충방전 시 단자전압이 배터리의 상하한 전압에 도달하지 않는 최대 전류 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘을 실제 주행 프로파일에 적용하였을 때 더 많은 배터리 용량을 사용하는 것을 확인하였다. 본 논문의 알고리즘을 적용할 경우 배터리의 허용 전압 범위를 초과하지 않는 범위 내에서 가용 출력을 최대화할 수 있다.

### 참고 문헌

[1] C. Sen and N. C. Kar, "Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle," in *Proc. IEEE Veh. Power Propulsion Conf.*, Sep. 2009, pp. 1-5.