

배터리 온도를 고려한 급속 충전 전류 추정 알고리즘

강승현, 김동환, 이재한, 노태원, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Fast Charging Current Estimation Algorithm Considering Battery Temperature

Sung hyun Kang, Dong hwan Kim, Jae han Lee, Tae-won Noh, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 급속 충전 시 배터리의 상한 온도를 초과하지 않는 최대 가용 충전 전류의 실시간 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 배터리 열 모델을 기반으로 상한 온도에 도달하는 발열량을 추정하고, 충전 상태에 따른 내부 저항의 변화 양상을 고려하여 최대 급속 충전 전류를 도출한다. 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 전기자동차용 배터리 팩을 이용한 시뮬레이션 및 실험을 진행한다.

1. 서론

최근 전기 자동차 시장이 급격하게 성장함에 따라 전기 자동차 배터리의 급속 충전에 대한 수요 또한 증가하고 있다. 그러나 배터리의 급속 충전 방식은 높은 전류의 충전을 필요로 하기 때문에 배터리의 손상 및 수명 저하와 같은 안전문제가 야기된다. 따라서 이와 같은 문제를 방지하기 위해 배터리 온도의 상한선을 설정하여 배터리의 온도가 상한선에 도달하지 않도록 급속 충전 전류의 크기를 제어할 필요가 있다.

이를 위해서는 배터리 열 모델을 기반으로 한 전류와 온도 사이의 동특성 분석이 필요하며, 그에 따라 상한 온도에 도달하게 하는 최대 전류를 추정해 그보다 작은 전류를 배터리에 인가할 수 있는 제어가 구현되어야 한다. 또한 배터리의 노화나 동작 환경 변화에 따라 실시간으로 대응하여 최대 전류를 추정하는 급속 충전 방식이 필요하다.

기존의 급속 충전 방식은 온도의 상한선에 닿게 하는 전류의 크기를 실험을 통해 추출하고, 추출된 결과를 기반으로 급속 충전 전류 프로파일을 구성하여 제어한다. 그러나 충전 시작 시점의 SOC (State-of-charge) 및 온도에 따라 별도의 프로파일을 구성해야 하며, 배터리 노화로 인해 초기에 설정한 전류 프로파일의 사용이 제한되기 때문에 배터리 노화를 고려한 추가적인 실험이 필요하다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 배터리의 온도가 상한선에 도달하게 되면 전류의 크기를 낮춰 상한선 미만의 온도를 유지하는 CT (Constant temperature) 방식의 연구가 진행되고 있다^[1]. 이 방식의 경우 작은 전류로 온도를 천천히 상승시키는 완속 충전 알고리즘으로 급속 충전에 적용하기에는 한계가 있다. 그러므로 온도의 예측을 통해 배터리의 상한 온도를 초과하지 않으면서 최대의 전류를 인가할 수 있는 급속 충전 알고리즘 개발이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 배터리의 노화 및 동작 환경을 고려하여 배터리의 상한 온도를 초과하지 않는 최대 가용 충전 전

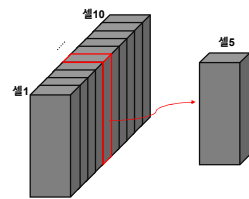


그림 1 배터리 팩 구조
 Fig. 1 Battery pack structure.

표 1 배터리 셀 사양
 Table 1 Specifications of battery cell.

종류	NCM (Nickel cobalt manganese)
진압 범위	3 - 4.2 [V]
전류 용량	175 [Ah]
R_{th}, C_{th}	2.057 [°C/W], 2527 [W·s/°C]

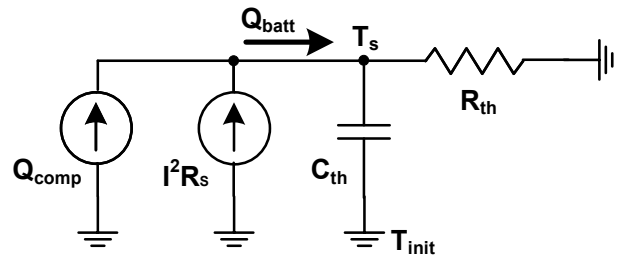


그림 2 제안하는 알고리즘에 사용된 열 모델
 Fig. 2 Thermal model used in the proposed algorithm.

류의 실시간 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 급속 충전 알고리즘은 배터리 열 모델을 기반으로 전류와 온도의 동특성 분석을 통해 급속 충전 전류를 추정하는 알고리즘을 도출한다. 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 배터리 열 모델 및 모델링을 이용한 시뮬레이션을 진행한다.

2. 제안하는 배터리 급속 충전 알고리즘

2.1 열 모델 기반 전류와 온도의 동특성 분석

그림 1과 표 1은 급속 충전 전류 추정 알고리즘의 개발 및 검증을 위해 사용된 배터리 팩으로, 총 10개의 모듈이 직렬로 연결되어 있으며 각 모듈에는 3개의 셀이 병렬로 구성되어 있다. 본 논문에서는 급속 충전 전류와 배터리 온도 간의 동특성 분석을 위하여 그림 2와 같은 배터리 팩의 열 모델을 사용한다. R_{th} 와 C_{th} 는 발열량 (Q_{batt})과 표면 온도 (T_s)간의 관계를 나타내기 위한 열 저항 및 열 용량이며, 이를 기반으로 정전류로 충전되는 배터리의 온도는 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$T_s = T_{s-1} \times e^{-\frac{t_s}{R_{th}C_{th}}} + Q_{batt}R_{th} \left(1 - e^{-\frac{t_s}{R_{th}C_{th}}}\right) \quad (1)$$

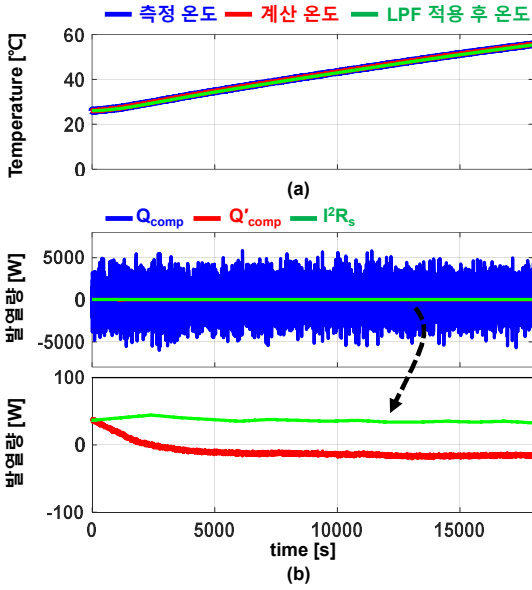


그림 3 1.5C 충전 시뮬레이션 결과: (a) 온도, (b) 발열량
Fig. 3 1.5C charging simulation result: (a) Temperature, (b) heat generation.

$$Q_{batt} = I^2 R_s + Q_{comp} = I^2 R_s + I^2 R_{comp} \quad (2)$$

T_s 는 현재 온도, T_{s-l} 은 직전 온도를 의미하며 t_s 는 BMS (Battery management system)의 측정 및 연산 주기를 나타낸다. Q_{batt} 은 (2)와 같이 배터리 내부 저항 (R_s)에서 발생하는 발열량과 Q_{comp} 의 합으로 계산된다. Q_{comp} 는 배터리 노화, 방열 시스템 등 동작 환경의 영향을 받는 발열량을 모사하는 값으로, (2)와 같이 전류 제곱에 비례하는 값 (R_{comp})으로 표현할 수 있다. Q_{comp} 는 (3)과 같이 $I^2 R_s$ 만을 이용하여 예측된 온도와 측정 온도간의 차이를 이용하여 실시간으로 산출될 수 있다.

$$Q_{comp} = \frac{T_s - T_{s-1} \times e^{\frac{-t_s}{R_b C_b}}}{R_{th} \left(1 - e^{\frac{-t_s}{R_b C_b}}\right)} - I^2 R_s \quad (3)$$

그림 3은 1.5C 정전류로 충전한 배터리의 실험 결과를 기반으로 (2)와 (3)을 이용해 모사된 온도와 Q_{comp} 를 보여준다. 이때 Q_{comp} 를 이용하여 모사된 배터리의 온도는 그림 3(a)와 같이 실제 측정 온도와 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 그림 3(b)와 같이 Q_{comp} 는 순시적인 피크값을 가지기 때문에 온도 예측 및 I_{max} 추정 시 큰 오차를 야기할 가능성이 존재한다. 이는 NTC 온도 센서의 오차와 (3)의 분모가 0에 가까운 값으로 산출되는 것으로 인하여 야기된다. 따라서 (4)와 같이 저주파 통과 필터를 이용하여 Q_{comp} 의 순시적 피크값을 저감시킨다.

$$Q'_{comp}(k) = A \cdot Q'_{comp}(k-1) + (1-A) \cdot Q_{comp}(k) \quad (4)$$

그림 3(b)는 (4)가 적용된 Q_{comp} (Q'_{comp})를 나타내며, 기존 대비 순시적 피크값이 저감된 것을 확인할 수 있다. 그림 3(a)에서 보이는 것과 같이 Q'_{comp} 를 이용하여 모사된 온도는 최대 오차 2.84, 평균 오차 0.05 °C로 온도 모사 정확도의 큰 저감 없이 순시적인 피크값을 제거할 수 있다. 따라서 $I^2 R_s$ 와 Q'_{comp}

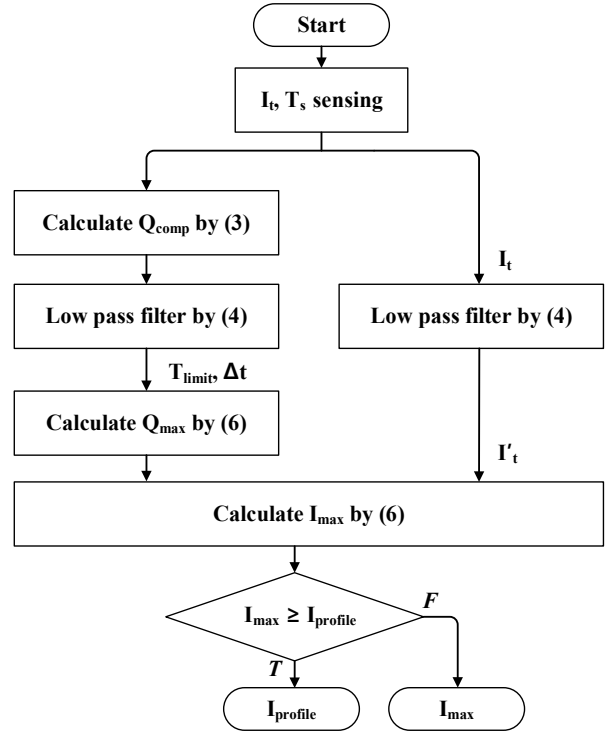


그림 4 I_{max} 추정 알고리즘 순서도
Fig. 4 I_{max} estimation algorithm flowchart.

를 이용하여 계산된 Q_{batt} 이 특정 시간 동안 일정하게 유지되고 했을 때 열 모델을 통해 특정 시간 후 온도를 예측할 수 있고 이는 (5)와 같이 점화식의 형태로 표현할 수 있다. Δt 는 점화식의 예측 시간을 의미한다.

$$T_s(t + \Delta t) - T_{init} = \{T_s(t) - T_{init}\} e^{\frac{-\Delta t}{R_b C_b}} + (I^2 R_s + Q'_{comp}) R_{th} \times (1 - e^{\frac{-\Delta t}{R_b C_b}}) \quad (5)$$

2.2 최대 급속 충전 전류 추정 알고리즘

본 논문에서 최대 급속 충전 전류 (I_{max})는 급속 충전 중 상한 온도 (T_{limit})에 도달하게 만드는 Δt 동안의 정전류로 정의한다. 제안하는 급속 충전 전류 추정 알고리즘은 실시간으로 I_{max} 를 추정하고, 그림 4와 같이 인가된 급속 충전 전류 프로파일 ($I_{profile}$)보다 I_{max} 가 작은 경우 충전 전류의 크기를 I_{max} 로 제어하여 온도가 상한선을 넘어가는 것을 방지한다.

I_{max} 를 추정하기 위하여 배터리가 Δt 초 뒤 상한 온도에 도달하게 만드는 발열량 (Q_{max})을 계산해야 하며, (5)의 T_s 를 T_{limit} 으로 대체하여 Q_{max} 에 대해 수식을 정리할 수 있다. 식 (2)를 통해 Q_{max} 를 I_{max} 에 대해 수식을 정리하면 (6)과 같이 나타난다.

$$I_{max} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{R_s + \frac{Q'_{comp}}{I^2}}} \quad (6)$$

$$Q_{max} = \frac{T_{limit} - T_{init} - \{T_s(t_0) - T_{init}\} \times e^{\frac{-\Delta t}{R_b C_b}}}{R_{th} \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{R_b C_b}}\right)} \quad (7)$$

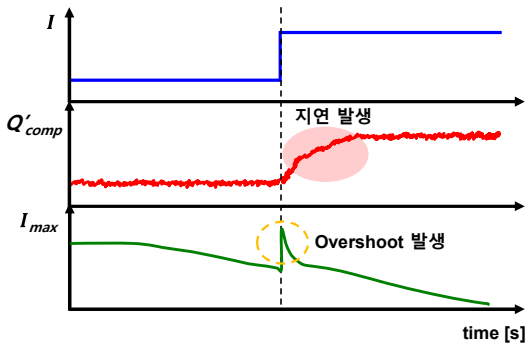


그림 5 전류 변화에 따른 Q'_{comp} 와 I_{max}
 Fig. 5 Q'_{comp} and I_{max} according to the current change.

그림 5는 Q'_{comp} 와 I_{max} 가 충전 전류 변화 시점에서 어떠한 형태로 변하는지를 보여준다. 전류의 변화가 없는 구간에서는 발열에 따른 배터리 온도의 증가로 I_{max} 가 서서히 감소한다. 그러나 전류가 변화하는 시점에서는 (6)의 수식을 통해 I^2 은 순간적으로 변하지만 Q'_{comp} 는 저주파 통과 필터에 따른 지연이 발생하여 천천히 변화하기 때문에, 따라서 I_{max} 가 큰 값으로 계산되어 순시적인 오차가 발생하게 된다. 따라서 Q_{comp} 에 사용되었던 저주파 통과 필터를 전류에도 적용시켜 전류와 Q'_{comp} 에 동일한 지연 시간을 적용함으로써 I_{max} 의 순시적인 오차를 저감하였다.

3. 시뮬레이션 검증

그림 6은 제안하는 급속 충전 전류 추정 알고리즘을 검증하기 위한 MATLAB Simulink 기반의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 1의 배터리를 기반으로 열 모델을 구성한 뒤 3개의 정전류 (1.5C, 1.0C, 0.5C)로 구성된 충전 프로파일이 인가될 때 제안하는 알고리즘을 이용하여 I_{max} 를 추정한다. 추정된 I_{max} 의 정확도를 검증하기 위하여 해당 전류 인가 시 배터리 온도의 상한선 (50 °C) 도달 여부를 확인한다.

그림 6(a)는 상온 환경에서 충전이 시작된 후 1500초가 지난 시점에서 I_{max} 가 352.5 A로 추정되며, 추정된 전류를 400초 동안 인가하였을 때 배터리의 온도가 상한 온도인 50 °C에 도달하는 것을 확인하였다. 동작 환경의 변화에 따라 Q_{comp} 로 인한 발열량의 실시간 추정 정확도를 검증하기 위하여, 그림 6(b)-(c)와 같이 외부 시스템으로 인한 방열 동작 및 노화로 인한 R_s 증가를 모사하여 동일 검증을 진행하였다. 방열 시스템의 동작을 모사한 그림 6(b)의 경우 그림 6(a) 대비 온도 상승 폭이 저감되기 때문에 I_{max} 가 더 큰 405.5 A로 추정되는 것을 확인할 수 있다. 반면 노화된 상황을 모사하기 위하여 R_s 를 30% 증가 시킨 그림 6(c)의 경우, I_{max} 가 그림 6(a) 대비 작은 228.0 A로 추정된다. 두 가지 모두 추정된 I_{max} 를 통해 충전을 하였을 때 상한 온도에 도달하는 것을 검증하였다.

4. 결론

본 논문에서는 배터리 팩의 안전한 동작을 위하여 배터리 팩의 상한 온도를 넘지 않는 최대 가용 전류를 실시간으로 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 검증을 통해 실시간으로 배터리에 인가할 수 있는 최대 충전 전류를 추

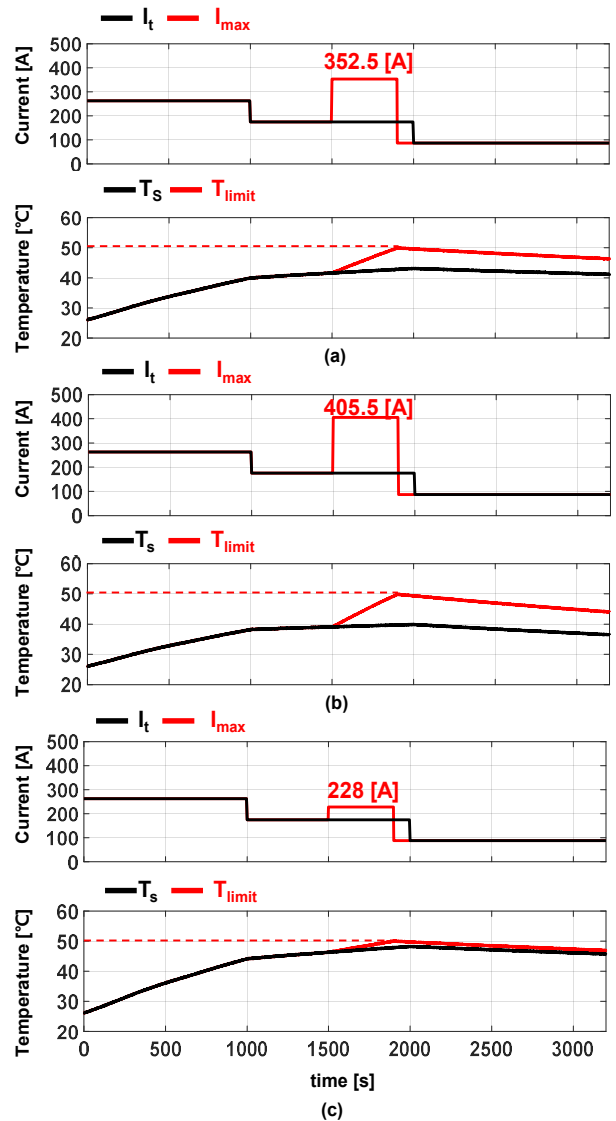


그림 6 시뮬레이션 검증 결과: (a) 상온/fresh, (b) 외부 방열/fresh, (c) 상온/노화
 Fig. 6 Simulation verification results: (a) room temperature/fresh, (b) external heat dissipation/fresh, (c) room temperature/aging.

정함으로써 급속 충전 시 야기될 수 있는 배터리의 안전 문제에 대해 안전성이 검증되는 것을 확인하였다.

참고 문헌

[1] L. Patnaik, A. V. J. S. Praneeth and S. S. Williamson, "A Closed-Loop Constant-Temperature Constant-Voltage Charging Technique to Reduce Charge Time of Lithium-Ion Batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1059–1067, Feb., 2019.