

# 최대 출력 전류 산출을 위한 실시간 셀 스크리닝 알고리즘

한해찬, 노태원, 이재형, 안정훈, 이병국<sup>†</sup>  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Real-time Battery Cell Screening Algorithm for Maximum Output Current Estimation

Hae-Chan Han, Tae-Won Noh, Jaehyung Lee, Jung-Hoon Ahn, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차에 탑재된 배터리의 최대 출력 전류 산출을 위한 실시간 셀 스크리닝 알고리즘을 제안한다. 알고리즘을 통하여 배터리 팩을 구성하는 셀들 중 필수적으로 관리해야 할 셀을 선별하고 이를 최대 출력 전류 추정에 사용함으로써 안전성을 확보함과 동시에 연산량을 줄여 BMS의 부담을 완화하고 관리의 효율을 증대한다. 제안된 알고리즘은 시물레이션을 기반으로 유효성을 검증한다.

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 전기자동차에 대한 수요가 급증하고 충전 인프라의 구축이 확산됨에 따라 전기자동차 및 2차 전지 시장의 규모가 크게 확대되고 있다. 배터리의 성능과 안전한 운영을 보장하기 위하여 배터리 관리 시스템 (Battery Management System, BMS)이 필수적이며, 전기자동차는 특히 안전성이 중요하므로 배터리의 상태에 대한 정확한 추정 알고리즘을 필요로 한다.

배터리의 상태 추정 알고리즘은 배터리로부터 측정된 전압과 전류를 직접 이용하거나 등가 회로 모델을 구성하는 파라미터를 기반으로 한다. 그 중 SOF (State of Function) 알고리즘은 배터리가 안전한 전압 영역에서 동작할 수 있도록 최대 출력 전류를 산출하고 그보다 작은 전류를 허용함으로써 배터리의 에너지 이용률을 상승시킨다<sup>[1]</sup>. 그러나 전기자동차를 구동하는 배터리 팩은 직렬 및 병렬로 연결된 각각의 배터리 셀과 모듈로 구성되므로 충·방전 동작이 반복됨에 따라 그림 1과 같이 노화도나 온도의 차이가 필연적으로 발생하고 이는 배터리 셀간 용량 및 내부 저항의 편차로 이어진다. 배터리 팩의 단자 전압을 그대로 사용하거나 이를 셀의 개수로 나눈 평균값을 SOF 알고리즘에 적용하면 무질서하고 편차를 가진 배터리 셀에 의하여 치명적인 안전 문제가 야기될 수 있다. 따라서 배터리 팩을 구성하는 셀들을 안전하게 동작시킬 수 있는 셀 스크리닝 알고리즘 (Cell Screening Algorithm)이 적용되어야 한다.

셀 스크리닝의 가장 간단한 방법으로는 모든 배터리 셀의 전압을 센싱하여 각각을 전부 SOF 알고리즘에 적용하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 배터리 셀 개수만큼의 연산량을 필요로 하므로 BMS의 가격과 부담을 증가시킨다. 따라서 배터리의 상태를 추정하기 위하여 배터리 전체의 안전성을 만족하는

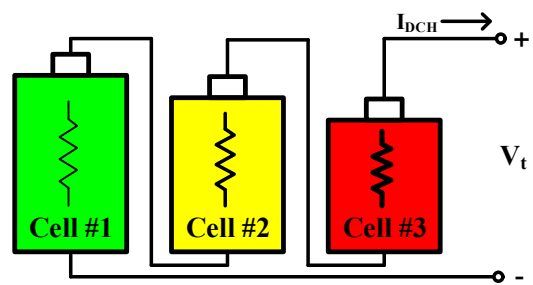


그림 1 노화에 따른 셀간 편차  
 Fig. 1 Deviations of battery cells.

하나 또는 일부의 셀을 특정하고, 그 배터리 셀의 전압 및 전류를 SOF 알고리즘에 적용함으로써 안전성과 효율성을 동시에 확보할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 셀 스크리닝 알고리즘은 배터리의 안전한 동작을 위하여 SOF 알고리즘의 관점에서 필수적으로 관리해야 하는 배터리 셀을 선별한다. 노화도나 온도의 차이로 인하여 발생하는 셀간 용량 및 내부 저항의 편차를 고려하여 배터리 팩을 모델링하고, 전기자동차 주행 전류 프로파일을 이용하여 셀 스크리닝 알고리즘을 검증한다.

### 2. 셀 스크리닝 알고리즘 설계

#### 2.1. 배터리 셀간 편차에 따른 사례 분석

배터리의 용량 및 내부 저항은 배터리 노화에 따라 변하는 특성을 가진다<sup>[2]</sup>. 배터리가 노화되면 용량이 감소하므로 동일한 전류가 인가되어도 SOC (State of Charge) 및 OCV (Open Circuit Voltage)의 변동 폭이 크게 나타난다. 마찬가지로 배터리의 노화가 진행될수록 내부 저항이 증가하므로 전류 인가에 의한 순시적인 전압 변동이 커진다. 따라서 노화가 진행되어 용량이 줄어들고 내부 저항이 커진 배터리는 노화되지 않은 배터리에 비해 급격한 전압 변화 양상을 보인다. 예를 들면, 균일한 전압의 셀들로 구성된 배터리를 충전, 혹은 방전할 경우 가장 노화된 셀의 전압이 배터리의 안전 사용 영역을 벗어난 상·하한 전압에 제일 먼저 도달하게 된다.

그러나 배터리 팩을 구성하는 셀들의 전압이 외부의 환경이나 전류 인가 상황에 따라 편차를 갖기 때문에 노화도에 의한 전압 변동 폭과 초기 셀 전압 편차 중 지배적인 영향에 따라 상·하한 전압에 닿는 배터리 셀은 언제든지 뒤바뀔 수 있다. 그림 2는 충·방전 시 실제로 일어날 수 있는 배터리 팩의 모

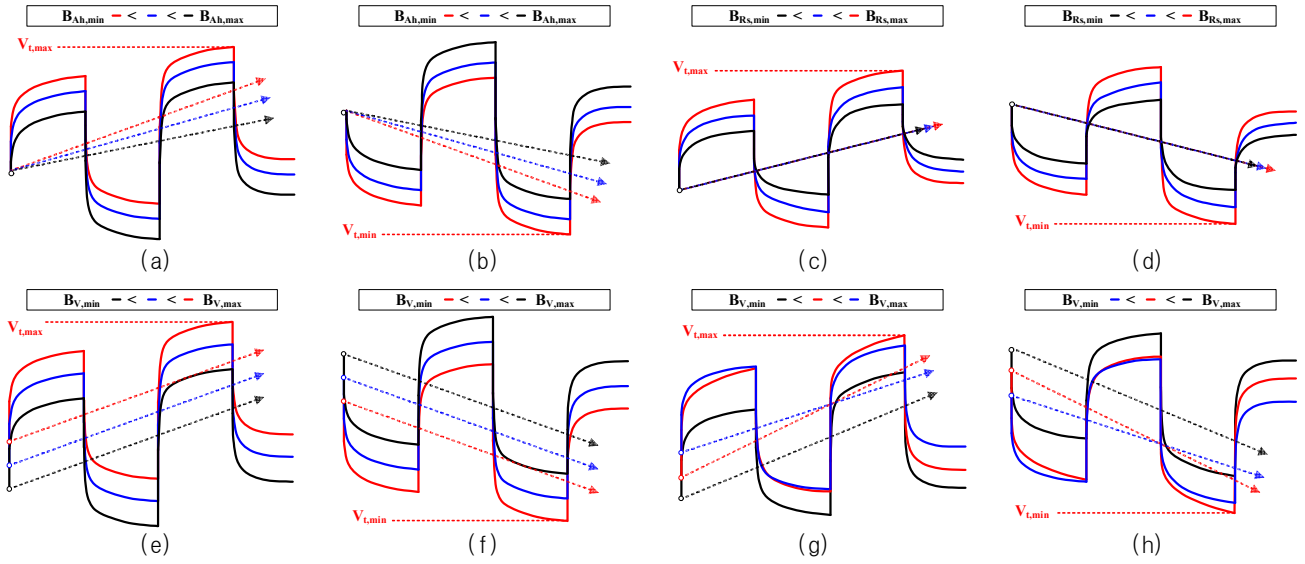


그림 2 배터리 충방전 시 셀간 편차에 따른 사례 분석  
Fig. 2 Case analysis due to cell deviations.

든 상태를 고려하여 8가지로 나타내고 있다. 그림 2(a)~(d)는 특정 시점을 기준으로 모든 셀의 전압이 일정하여 충·방전 시 각각 용량이 가장 작은 셀 ( $B_{Ah,min}$ )과 내부 저항이 가장 큰 셀 ( $B_{Rs,max}$ )이 상·하한 전압에 먼저 도달하는 것을 보여준다. 그림 2(e)~(f)는 용량과 내부 저항의 영향이 특정 시점에서 셀들이 갖는 전압 차이를 극복하지 못하는 경우, 충전 시에는 가장 높은 전압의 셀 ( $B_{V,max}$ )이 상한에 도달하고, 방전 시에는 가장 낮은 전압의 셀 ( $B_{V,min}$ )이 하한에 도달한다. 각 셀들의 전압을 실시간으로 센싱하며 SOH (State of Health) 정보를 보유하고 있다고 가정할 때, 위 6가지 상황에 대해서는 SOF 알고리즘에 적용될 셀을 간단하게 선별할 수 있다.

그러나 그림 2(g)~(h)에서와 같이 용량이 가장 작지도, 내부 저항이 가장 크지도 않으며, 전압도 최대값이나 최소값을

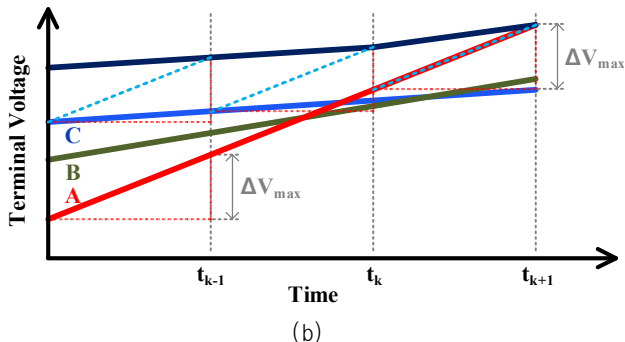
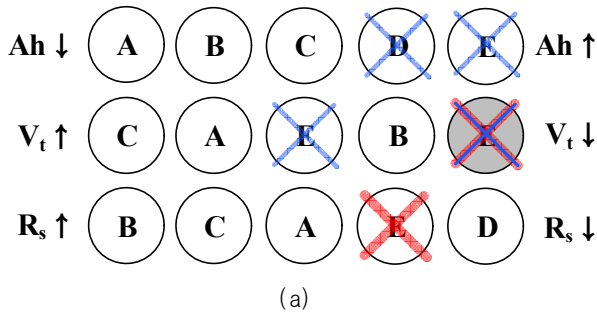


그림 3 SOF를 위한 셀 스크리닝 알고리즘  
Fig. 3 Cell screening algorithm for SOF.

갖지 않는 특정 셀이 충·방전 시 가장 먼저 닿는 경우가 존재한다. 따라서 이러한 셀들을 선별하기 위해서는 적절한 알고리즘이 적용되어야 하며, 배터리 동작의 안전성을 확보하는, 즉 어떠한 셀도 안전 사용 영역을 벗어나지 않도록 하는 최소한의 셀 선별 이루어져야 배터리 관리의 효율성을 높일 수 있다.

## 2.2. 셀 스크리닝 알고리즘 설계 및 셀 선별 과정

제안하는 셀 스크리닝 알고리즘은 세 단계로 구성한다. 본 절에서는 충전을 기준으로 알고리즘의 단계를 설명하며, 방전에도 그대로 적용시킬 수 있다. 첫 번째 단계에서는 그림 3(a)와 같이  $B_{Ah,min}$ 보다 용량이 크며 전압이 낮은 셀 후보군 A와  $B_{Rs,max}$ 보다 내부 저항과 전압이 모두 낮은 셀 후보군 B를 분류한다. A와 B 셀들은 각각  $B_{Ah,min}$ 와  $B_{Rs,max}$ 를 알지러 상한 전압에 도달할 수 없으므로 A와 B의 교집합에 해당하는 셀들은 SOF를 위한 셀 선별에서 제외시킬 수 있다. 이러한 소거 방법은 그림 4의 A 영역과 같이 배터리의 노화에 따라 용량의 감소 및 내부 저항의 증가가 선형적인 경향을 보일 때 보다 강력하게 작용한다.

두 번째 단계에서는 남은 셀들의 상호 비교를 통하여 첫 번째 단계에서 이루어진 논리를 동일하게 적용시킨다. 셀 후보군 A와 B에 동시에 포함되지 않는 셀들 중에서 상한 전압에 닿을 가능성이 없는 셀들이 이 단계에서 추가적으로 제외된다. 그러나 그림 4의 B 영역과 같이 배터리의 용량 감소와 내부 저항

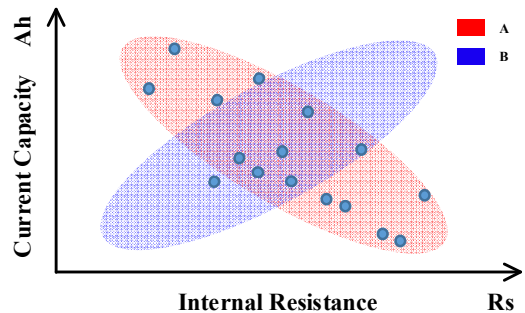


그림 4 노화 셀의 용량 및 내부저항 경향 분포  
Fig. 4 Capacity and internal resistance distribution of aged cells.

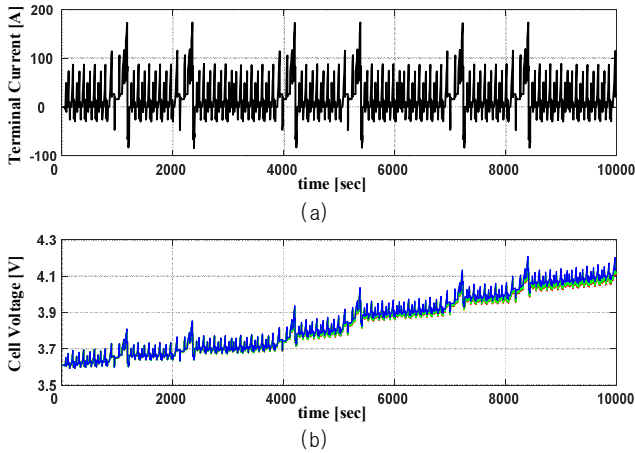


그림 5 NEDC 주행 전류 인가에 따른 배터리 셀 전압  
Fig. 5 Result of cell voltage by NEDC profile.

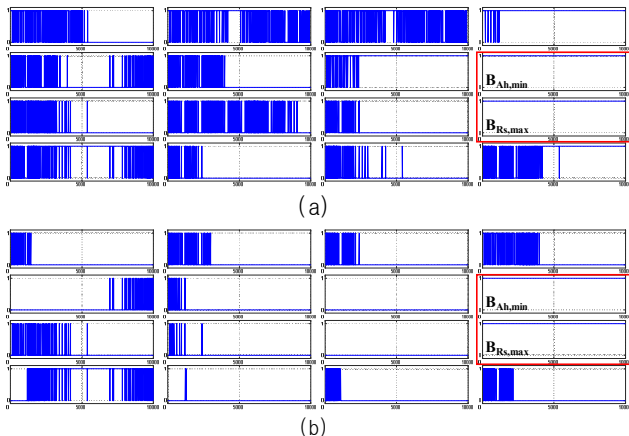


그림 6 실시간 셀 스크리닝 동작  
Fig. 6 Real-time cell screening behaviors.

의 증가 양상이 한 쪽으로만 치우친 비이상적인 경우에는, 앞선 두 단계의 논리에 부합되는 셀들이 대폭 줄어들기 때문에 그만큼 많은 셀들을 선별하여 관리해야하는 문제점이 발생한다.

따라서 마지막 단계에서는 관리해야 할 셀들이 증가함에 따라 발생하는 BMS의 부담을 줄이기 위하여, 그림 3(b)와 같이 가장 전압이 높은 배터리 셀을 실시간으로 선택하고 그 셀에 최대 전압 편차의 경향성을 부여하는 방법으로 가상의 배터리 셀을 생성한다. 선별된 셀과 최대 전압 편차를 갖는 셀은 일치하거나 그렇지 않을 수 있지만, 이 가상의 배터리 셀 하나만으로 SOF 알고리즘에 적용하여 전체 배터리 팩을 안전한 동작 영역에서 사용할 수 있다.

### 3. 검증

셀 스크리닝 알고리즘의 검증은 시뮬레이션을 통하여 진행한다. 실제 NMC (Nickel Manganese Cobalt) 배터리의 등가 회로 파라미터를 추출하여 모델링하고, 그림 4와 같이 노화도에 따른 용량 및 내부 저항의 변화 양상을 고려하여 배터리 팩을 구성한다. 이때, 초기 전압은 실제 셀들이 갖는 전압 편차와 유사하도록 무작위로 설정한다. 그림 5(a)와 같이 전기자동차의 NEDC (New European Driving Cycle) 주행 전류 프로파일을 인가하여 개별 셀들의 단자 전압을 얻고 이를 기반으로 셀 스

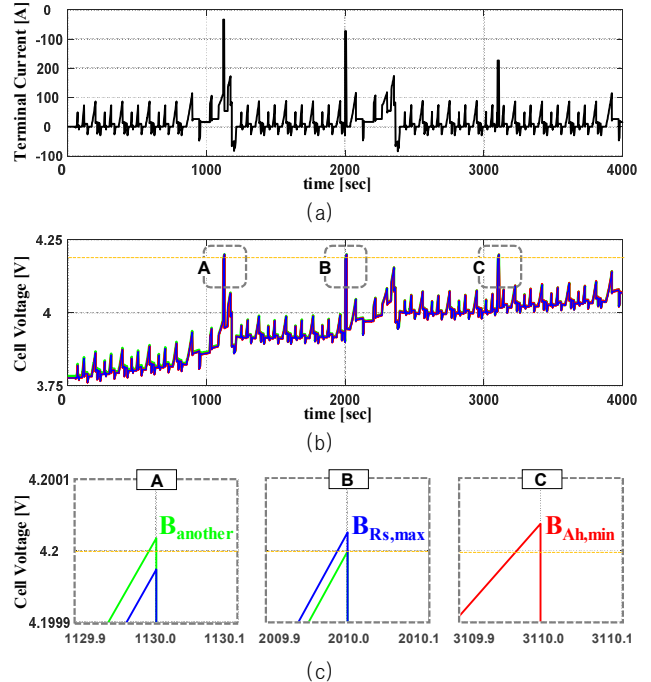


그림 7 셀 스크리닝 알고리즘 검증 시뮬레이션 결과  
Fig. 7 Result of cell screening algorithm simulation.

크리닝 알고리즘의 동작 및 유효성을 검증한다.

그림 6(a), 그림 6(b)와 같이 실시간으로 관리해야 할 셀들이 첫 번째 단계와 두 번째 단계를 거치면서 각각 소거되며, 결과적으로  $B_{Ah,min}$ 와  $B_{Rs,max}$ , 그리고  $B_{V,max}$ 를 제외한 셀들이 대부분 소거되는 것을 확인할 수 있다. 실제 배터리 팩은 수백 개의 직·병렬 셀들로 구성되므로 셀 스크리닝 알고리즘은 BMS의 연산량 감축에 효과적으로 작용한다.

그림 7(c)는 특정 시점에서 배터리에 최대 허용 전류를 초과하는 전류가 인가되는 상황에서도 셀 스크리닝 알고리즘을 통하여 관리하는 셀들 중 하나가 가장 먼저 상한 전압에 도달하는 것을 나타낸다. 이때, 나머지 셀들은 모두 안전한 전압 영역에서 동작하며 결과적으로 배터리의 안전성이 검증된다.

### 4. 결론

본 논문에서는 전기자동차의 배터리 팩을 구성하는 셀들의 안전한 동작을 위하여 SOF 알고리즘의 관점에서 필수적으로 관리해야 할 셀을 선별하는 셀 스크리닝 알고리즘을 설계하였다. 제안된 알고리즘을 통하여 선별된 특정 셀들만 SOF에 적용함으로써 안전성을 확보함과 동시에 연산량을 줄여 BMS의 부담을 완화하고 관리의 효율을 증대한다.

### 참고 문헌

- [1] 허성준, 이재형, 노태원, 안정훈, 이병국, "배터리 가용 에너지 증대를 위한 최대 출력 전류 추정 알고리즘." 전력전자학술대회논문집, 2018, pp. 234-236.
- [2] X. Han, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, Y. Zheng, and Z. Li., "A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification," *Journal of Power Sources*, vol. 251, pp. 38-54, Apr. 2014.