

# 전기자동차 배터리 팩 SOC 추정 기반 Buck-Boost 능동형 셀 밸런싱

남은택, 이세진, 권용성\*  
한동대학교 기계제어공학부

## Buck-Boost Active Cell Balancing Based on SOC Estimation for Battery Pack in Electric Vehicles

Euntaek Nam, Sejin Lee, Youngsung Kwon\*  
Department of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

**요약** 배터리 관리 시스템(BMS: Battery Management System)은 전기자동차 배터리 팩 내에 발생하는 에너지 불균형을 개선하기 위해 셀 간의 에너지 밸런싱을 수행한다. 기존의 연구에서 에너지 밸런싱을 위해 주로 사용한 배터리 셀의 단자전압 정보나 미리 맵핑된 배터리 충전상태(SOC: State of Charge)와 개방회로전압(OCV: Open Circuit Voltage)표는 실제 배터리의 충전상태를 반영하지 못하므로 정확한 셀 밸런싱을 수행했다고 보기 어렵다. 본 논문은 확장 칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter) 기반의 SOC 추정을 통해 셀 밸런싱을 수행하고 기존의 전압기반 밸런싱 방법과의 비교분석을 통해 BMS의 효과적인 밸런싱 운용 방법을 제시한다. EKF 기반의 알고리즘 설계를 위한 등가회로 모델링과 단계별 파라미터 추출을 진행했고, SOC 추정 결과는 초기 짧은 구간을 제외한 SOC의 전 구간에서 1% 미만의 낮은 오차를 보였다. 추정된 SOC 정보를 바탕으로 셀 간의 에너지 밸런싱을 수행하기 위해 buck-부스트 컨버터를 설계했고, 밸런싱 결과는 셀 간의 전압이 균등해지는 시점의 SOC가 3.97%의 편차를 보임으로써, 밸런싱으로 인한 전압의 균등화와 실제 SOC의 균등화가 다소 차이가 있는 것을 확인했다. 본 논문에서 제안한 EKF 활용 SOC 추정 기반의 셀 밸런싱은 실제 SOC 기반 밸런싱의 분석 및 영향에 기여함으로써 BMS의 배터리 운용의 신뢰성을 향상시킬 것으로 기대된다.

**Abstract** A BMS performs energy balancing between cells to reduce energy imbalance that occurs in a battery pack in electric vehicles. In previous studies, terminal voltage information or a pre-mapped SOC-OCV table was mainly used for energy balancing but cannot show accurate cell balancing because balancing was not performed based on an actual battery's charge state. This paper proposes an effective balancing operation method of BMS by performing cell balancing through SOC estimation based on an EKF and a comparative analysis with existing voltage-based balancing methods. Modeling of a battery's equivalent circuit and step-by-step parameter extraction were performed for EKF-based algorithm design, and the SOC estimation results showed low error of less than 1% in all sections of SOC except for the initial stage. Based on the estimated SOC, a buck-boost converter was designed to perform energy balancing between cells. The balancing result showed that SOC at the time of equalizing voltage between cells had a deviation of 3.97%, which confirms that equalization of voltage due to balancing is slightly different from equalization of the actual SOC. The method proposed in this paper can improve the reliability of BMS operation by contributing to the analysis and impact of actual SOC-based balancing.

**Keywords** : BMS, Battery, SOC, Extended Kalman Filter, Energy Balancing

본 논문은 한국수력원자력(주)의 지원으로 수행된 연구임.

\*Corresponding Author : Youngsung Kwon(Handong Global Univ.)

email: youngsungkwon@handong.edu

Received December 21, 2022

Revised January 17, 2023

Accepted February 3, 2023

Published February 28, 2023

## 1. 서론

친환경 전기자동차와 리튬이온 배터리 시장의 성장은 전 세계적으로 발생하는 온실가스와 대기오염을 줄일 수 있는 기회로 여겨진다[1]. 전기자동차와 배터리의 수요가 증가함에 따라 BMS의 중요성이 높아지고 있으며, BMS는 배터리 팩의 수명을 개선하고 안정성과 운용 효율을 높이기 위해 배터리의 건강상태(SOH: State of Health) 및 SOC에 대한 추정정보를 제공한다[2].

원통형 배터리 셀로 구성된 전기자동차 배터리 팩은 수백 개 또는 수천 개의 리튬이온 셀이 직·병렬로 연결된다[3]. 배터리 팩은 팩 내에 셀의 수가 증가함에 따라 제조 공정의 불완전성, 노화, 온도, 그리고 충·방전 사이클 등의 영향으로 인해 셀 간의 전압과 용량 편차가 필연적으로 발생한다[4]. 이러한 셀 간의 편차를 최소화하기 위해 BMS는 에너지 밸런싱을 수행하며, 밸런싱 방법은 수동형과 능동형으로 구분된다.

수동형 밸런싱은 높은 에너지의 셀들이 가장 낮은 에너지를 가지는 셀의 충전량과 일치할 때까지 저항을 통해 열을 방출하는 방법으로 느린 밸런싱 속도, 열 발산, 그리고 에너지 낭비라는 단점을 가지고 있다[5]. 능동형 밸런싱은 스위칭 동작을 통해 에너지가 높은 셀에서 낮은 셀로 전달하는 방법이며, 에너지를 전달하는 방식에 따라 커패시터, 인덕터, 변압기 및 이들의 조합 기반의 밸런싱 방법으로 구분된다[6]. 능동형 밸런싱은 전달되는 에너지의 손실이 거의 없다는 장점이 있지만, 큰 부피, 높은 비용, 그리고 복잡한 제어 방식으로 인해 상용화 및 높은 신뢰성을 보장하기에 어렵다는 단점이 있다. 가격과 신뢰성 면에서 경쟁력을 높이기 위해서는 밸런싱 회로의 부피, 소자의 개수, 그리고 제어의 복잡성을 줄이는 것이 필요하다.

배터리 에너지 밸런싱은 배터리 셀의 단자전압과 SOC를 이용한 방법으로 나눌 수 있다[7]. 기존의 단자전압 기반의 밸런싱은 배터리의 비선형적인 출력특성을 나타내는 점과 셀 간에 서로 다른 전기화학적 특성을 나타낸다는 점에서 각 셀의 정확한 충전상태를 나타낼 수 없다[8]. SOC 기반의 에너지 밸런싱은 배터리의 실제 충전상태를 기반으로 수행되어 단자전압을 이용한 밸런싱보다 우수한 밸런싱 성능을 나타낸다. 하지만, 정확한 SOC 추정을 위한 알고리즘이 설계가 필요하며, 전기자동차 배터리 팩에서 SOC 상태를 직접 측정하는 것은 불가능하므로, 배터리의 단자전압과 전류를 이용해 간접적으로 SOC를 추정해야 한다[9].

일반적으로 사용되는 SOC 추정 방법으로는 OCV방법, 전류 적산법(Ampere Hours Counting Method), 그리고 모델기반의 추정방법인 칼만 필터 알고리즘(Kalman Filter Algorithm)이 있다. OCV 방법과 전류 적산법은 모델기반의 추정방법보다 구현이 비교적 간단하다. 하지만, OCV 방법은 배터리 별로 SOC-OCV관계가 다르고 배터리 내부상태 안정화를 위한 휴지기가 요구되며, 전류 적산법은 초기 SOC 값 설정에 따른 오차누적이 발생할 수 있다[10]. EKF는 칼만 필터 알고리즘에 자코비안(Jacobian) 함수를 이용한 추정 방법으로, 노이즈에 강인하고 빠른 연산속도로 인해 비선형시스템에서 대표적인 추정기법으로 사용된다. EKF 기법은 배터리의 충·방전 시 나타나는 비선형적인 입·출력 특성에도 불구하고, 자코비안 함수를 통해 매시간 비선형구간을 선형화시킴으로써 SOC를 추정할 수 있다. 하지만, EKF 알고리즘은 배터리 셀의 등가회로 모델 파라미터, 전압, 전류, 그리고 필터 파라미터의 영향을 받으며, 이에 대해 발생하는 오차는 SOC 추정 정확도를 감소시킬 수 있다[11].

본 논문에서는 배터리 팩을 관리하는 BMS의 셀 밸런싱 정확도와 신뢰성을 향상시키기 위해 SOC 추정 기반의 셀 밸런싱 방법을 제안한다. 셀 밸런싱 관련 이전의 연구들은 단자전압 기반 또는 SOC-OCV 관계 기반의 방법으로 이루어졌다. 하지만, 본 논문은 보다 신뢰성 높은 SOC 밸런싱을 위해, 단계별 파라미터 추출을 바탕으로 EKF 알고리즘을 설계하여 SOC를 정확히 추정한 후 이를 기반으로 셀 밸런싱을 수행한다. EKF 기반의 SOC 추정결과, 초기단계를 제외한 전체구간에서 1% 미만의 추정오차로 높은 정확도를 보였다. 또한, 추정된 SOC를 바탕으로 셀 간의 불균형을 개선하기 위해 벅-부스트 컨버터 토폴로지를 선정하여 밸런싱 회로를 설계했고, 밸런싱 결과는 셀 간의 전압이 균등해지는 시점에서 추정된 SOC의 편차가 3.97%로, 전압의 균등화와 SOC의 균등화의 차이가 존재함을 보였다. 본 논문에서 제안한 SOC 추정 기반의 셀 밸런싱은 배터리 셀의 SOC에 대한 정확한 정보를 제공할 수 있고, 실제 SOC 기반의 밸런싱 분석에 기여함으로써 BMS의 효율성과 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

본 논문의 2장에서는 배터리 등가회로 모델 수립과 파라미터 추출 그리고 EKF 알고리즘 활용 SOC 추정방법을 설명한다. 다음으로 3장에서는 능동형 밸런싱 회로 및 밸런싱 운용 전략에 대해 설명하며, 4장에서는 SOC 추정과 에너지 밸런싱 결과 분석을 기술한다. 마지막으로 5장에서는 연구에 대한 결론을 내린다.

## 2. 배터리 SOC 추정

### 2.1 배터리 셀 등가회로 모델링

EKF 알고리즘은 모델링 기반의 SOC 추정 방법으로 SOC 추정 시, 배터리의 정적 및 동적 특성을 반영하는 등가회로 모델 수립이 선행되어야 한다. 배터리 등가회로 모델에는 테브닌(Thevenin), 린트(Rint), PNGV(PNGV: Partnership for a New Generation of Vehicle), 그리고 다중 차수 모델(Multi-order model) 등이 있지만, 본 논문에서는 비교적 구조가 간단하고 배터리의 전기적 동작 특성을 반영하여 구현하기 쉬운 테브닌 1차 등가회로를 선정한다.

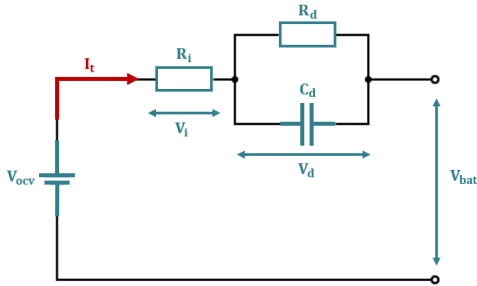


Fig. 1. First-order equivalent circuit model

Fig. 1은 본 논문에서 선정한 배터리 등가회로 모델을 나타내며, 내부저항  $R_i$ , 병렬 RC 회로를 구성하는 확산 저항  $R_d$  및 확산커패시턴스  $C_d$ , 그리고 리튬이온 배터리의 개방회로 전압을 나타내는  $V_{ocv}$ 로 구성된다.  $V_{bat}$ 은 배터리의 단자전압을 나타내며,  $I_t$ 는 부하 연결 시 방전되는 전류를 나타낸다.

Eq. (1)과 Eq. (2)는 Fig. 1의 등가회로 모델을 키르히호프(Kirchhoff)의 전류 법칙을 이용하여  $V_d$ 와  $V_{bat}$ 의 식으로 나타낸 것이다. Eq. (1)과 Eq. (2)는 EKF의 상태 공간 및 관측 모델을 구성하는 동적 모델 수립에 사용된다.

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{I_t}{C_d} - \frac{V_d}{R_d C_d} \quad (1)$$

$$V_{bat} = V_{ocv} - V_i - V_d \quad (2)$$

Where  $V_{ocv}$  denotes the open circuit voltage of the battery,  $V_{bat}$  denotes the terminal voltage of the battery, and  $V_i$  denotes the voltage applied to the internal resistance  $R_i$ , and  $V_d$  denotes the diffusion voltage applied to the RC network, and

$I_t$  denotes the input current, and  $R_d$  denotes the diffusion resistance, and  $C_d$  denotes the diffusion capacitance

### 2.2 파라미터 추출시험

본 논문에서 배터리 파라미터 추출에 사용한 장비는 Fig. 2와 같다. 3,350 mAh의 정격용량과 4.2 V의 최대 충전전압을 가지는 삼성 SDI 18650 리튬이온 배터리를 사용하고, 배터리에 부하 전류를 인가하기 위한 전자부하기(LF10000-C)와 센서(Sensing stage)에 전원을 공급하는 전원 장치를 사용한다. 센서에는 데이터 측정 시 누설 전류를 최소화하기 위해 듀얼 연산증폭기(TLE2072CP)가 사용된다. 배터리의 전압과 전류를 실시간으로 측정하기 위해 2개의 DAQ(Data Acquisition) 보드를 차동 연결하며, 데이터는 소프트웨어 MATLAB R2020b를 이용해서 출력한다.

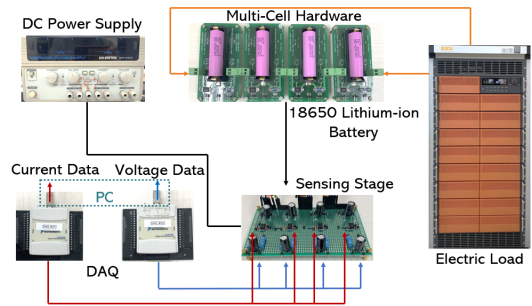


Fig. 2. Equipment for parameter extraction

EKF 활용 SOC 추정 시 배터리 셀 내부 파라미터가 반영되어야 하며, Fig. 3은 멀티 셀 내부 파라미터 추출을 위한 플로우차트(Flow Chart)를 나타낸다. 플로우차트의 순서에 따라 직렬 연결된 멀티 셀 하드웨어에 전자부하기를 이용하여 0.5 C-rate로 360 s동안 전류를 인가하고, 배터리의 히스테리시스(Hysteresis) 현상을 고려하여 3000 s동안 휴지기를 부여한다[12]. 멀티 셀 1회 완전 방전동안 SOC를 20회 구간으로 나누어 한 사이클 동안의 파라미터 추출을 진행했다. 본 논문에서는 배터리의 SOC가 변화할 때마다 발생하는 파라미터의 편차를 정밀하게 추출하기 위해 전체 SOC의 5 % 구간마다 내부 파라미터 값을 업데이트했다[11]. Table 1은 SOC의 5 %마다 추출한 멀티 셀 내부 파라미터의 값을 나타내며, SOC가 변화할 때 발생하는 파라미터 값의 편차 정도를 확인할 수 있다.

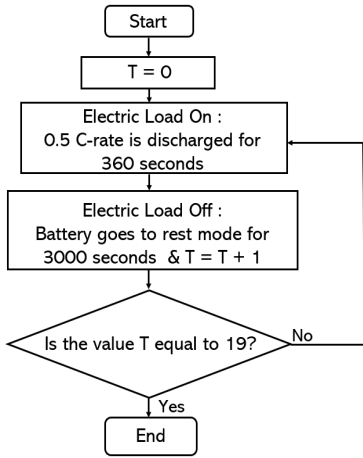


Fig. 3. Flowchart of battery parameter extraction

Table 1. Multi-cell parameter average values

SOC[%]	$R_i[\Omega]$	$R_d[\Omega]$	$C_d[F]$
5	0.069637	0.040366	15089.58
10	0.066582	0.021491	29858.44
15	0.062788	0.029504	20747.38
20	0.059515	0.025450	24423.33
25	0.062542	0.029572	22729.07
30	0.056350	0.032339	19210.38
35	0.059898	0.038188	15830.97
40	0.060583	0.035682	16889.47
45	0.060076	0.028120	21685.50
50	0.061487	0.024409	25097.55
55	0.061911	0.024203	25552.22
60	0.059515	0.028915	21437.41
65	0.060775	0.038435	15744.57
70	0.059871	0.034093	17862.40
75	0.062076	0.034901	17330.59
80	0.060843	0.039393	15387.52
85	0.060665	0.030778	19746.34
90	0.062624	0.021792	28285.77
95	0.063857	0.021792	28285.77

### 2.3 SOC 추정을 위한 EKF 설계

EKF는 비선형 동적 시스템에서 상태 추정 기법으로 사용되며, 재귀적 형태의 알고리즘을 통해 비선형적 모델을 추정한다. 배터리 상태 추정에 EKF 알고리즘을 적용하기 위해서는 배터리 셀의 상태 공간 및 관측 모델이 필요하며, Eq. (3)과 Eq. (4)는 각각 이산시간  $k+1$  시점에서의 상태벡터  $x_{k+1}$ 와  $k$  시점에서의 관측벡터  $y_k$ 를 행렬로 나타낸다.  $k$  시점에서의 상태벡터  $x_k$ 는 Fig. 1의 RC 병렬회로에 걸리는 확산전압  $V_d$ 와 SOC를 포함하며,  $y_k$ 는  $V_{bat}$ 을 나타낸다. Eq. (4)의  $h(x_k)$ 는 SOC 추

정 시 SOC-OCV 곡선을 나타내며,  $U$ 는 시스템에 인가되는 전류  $I_t$ ,  $w$ 는  $x_k$ 의 불확실성으로 인해 발생하는 시스템의 프로세스 노이즈, 그리고  $v$ 는 배터리의 단차전압 측정 시 발생하는 노이즈를 나타낸다.

$$x_{k+1} = A_k x_k + BU + w \quad (3)$$

$$y_k = h(x_k) + DU + v \quad (4)$$

Where  $A_k$  denotes the transition matrix relating to step  $k$  to the step  $k+1$ , and  $B$  denotes the control matrix, and  $x_k$  denotes the state vector at time  $k$ , and  $y_k$  denotes the measurement vector, and  $h_k(x_k, u_k)$  denotes the nonlinear measurement matrix, and  $D$  denotes the internal resistance  $R_i$ , and  $U$  denotes the  $I_t$ ,  $\omega_k$  denotes the process noise,  $w$  denotes the system process noise, and  $v$  denotes the measurement noise

$k+1$  시점에서의 SOC는 전류 적산법을 통해 Eq. (5)로 유도되고,  $x_{k+1}$ 와  $y_k$ 는 Eq. (1)과 Eq. (2)를 통해 Eq. (6)와 Eq. (7)로 표현할 수 있다. Eq. (5)-(11)는 상태 공간 및 관측 모델의 파라미터를 나타낸다[11].

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{I_t}{C_n} \Delta t \quad (5)$$

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ V_{d_{k+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_d C_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{d_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_d} \end{bmatrix} I_t \quad (6)$$

$$y_k = V_{bat} \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_d C_d} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_d} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$D = -R_i, \quad U = I_t \quad (9)$$

$$h(x_k) = OCV(SOC_k) - V_d \quad (10)$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial h(SOC)}{\partial SOC} - 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Where  $\Delta t$  denotes the sampling time between  $k$  and  $k+1$ ,  $C_n$  denotes the available maximum capacity of the battery

EKF는  $k-1$  시점의 상태예측값  $\hat{x}_{k-1}$ 와 상태예측 오차공분산  $P_{k-1}$ 을 이용해 현재 추정값  $\hat{x}_k$ 와  $P_k$ 을 예측하고,  $k$  시점의 추정값  $\hat{x}_k$ 과  $P_k$ 을 업데이트하는 과정으로 실행된다. Eq. (12)-(13)은 EKF의 예측 단계(Prediction Update)를 나타내고, Eq. (14)-(16)은 관측 단계(Measurement Update)를 나타낸다[13].

$$\hat{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) + BI_t \quad (12)$$

$$P_k = A_k P_{k-1} A_k^T + Q_k \quad (13)$$

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad (14)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (y_k - H_k \hat{x}_k) \quad (15)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k \quad (16)$$

Where  $K_k$  denotes the Kalman filter gain, and  $R_k$  denotes the covariance matrix of the measurement noise, and  $Q_k$  denotes the covariance matrix of the process noise, and  $I$  denotes the unit matrix

Fig. 4는 EKF 알고리즘을 이용한 SOC 추정원리를 보여준다. 시스템 입력  $I_t$ 가 인가되면, 관측 벡터  $y_k$ 의 출력전압  $V_{bat}$ 이 측정되고, 배터리 등가회로 모델의 전압은 SOC-OCV 관계로부터 SOC 추정값에 해당하는  $V_{ocv}$ 가 계산된다. 이후 관측 단계에서 두 전압의 오차 비교를 통해 칼만 이득  $K_k$ 와 다음 상태변수 및 오차 공분산이 갱신되고, 반복되는 과정을 통해 SOC 값이 추정된다. EKF 기반의 SOC 추정은 배터리 셀의 상태를 정확히 추정함으로써 셀 에너지 밸런싱의 정확도를 향상시킬 수 있다.

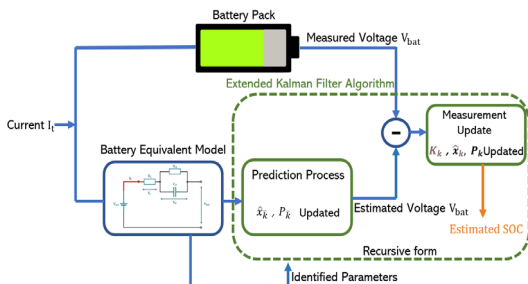


Fig. 4. The operation of EKF for SOC estimation

### 3. 능동형 셀 밸런싱 시스템

#### 3.1 벅-부스트 능동형 셀 밸런싱

본 논문에서는 기존의 벅-부스트 컨버터 토폴로지를 이용하여 능동형 셀 밸런싱 회로를 구성한다. 밸런싱 회로는 Fig. 5와 같이 셀의 개수에 따라 회로를 구성하는 스위치가  $2(n-1)$ 개, 인덕터가  $n-1$ 개씩 연결되며,  $n$ 은 셀의 개수를 의미한다. 벅-부스트 밸런싱은 다른 밸런싱 회로에 비해 회로를 구성하는 소자 수가 적고, 커패시터 기반의 밸런싱보다 균등화 속도가 빠르지만, 스위치 개수의 증가에 따라 많은 수의 셀을 제어하는 전략이 필요하다[14].

회로의 스위칭 동작을 위해 MOSFET(MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) 소자가 사용되며, MCU(MCU: Micro Controller Unit, MCU)로부터 생성되는 PWM(PWM: Pulse Width Modulation, PWM) 신호가 MOSFET의 게이트(Gate) 단자에 인가된다. 스위칭 동작에 따라, 높은 에너지 레벨의 셀이 인덕터를 통해 낮은 에너지 레벨의 셀로 에너지를 전달하는 셀투셀(Cell-to-Cell) 방식의 밸런싱이 수행된다. MCU는 셀 간의 에너지 편차에 따라 필요한 PWM의 듀티 사이클(Duty Cycle)을 조절함으로써, 밸런싱의 에너지의 흐름을 제어한다.

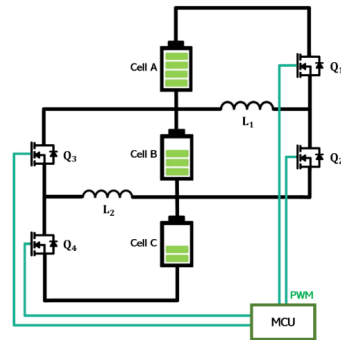


Fig. 5. Configuration of Buck-Boost converter balancing circuit

#### 3.2 Mode 별 동작 원리 분석

벅-부스트 밸런싱 방법을 사용한 셀 간의 에너지 전달은 MOSFET의 스위칭 동작을 통해 이루어진다. 밸런싱 동작은 스위치의 닫힌 상태(On state)와 열린 상태(Off state)로 구분되며, 각 셀의 SOC가 동일한 상태로 수렴하면 동작이 종료된다. Fig. 6은 Fig. 5의 MOSFET 게이

트 단자에 인가되는 PWM 신호를 나타내며,  $Q_1$ 과  $Q_3$ 에 인가되는 신호 S1은  $Q_2$ 와  $Q_4$ 에 인가되는 신호 S2와 위상이 반전된다. MOSFET에 PWM 인가 시  $Q_1$ 과  $Q_2$  또는  $Q_3$ 와  $Q_4$ 가 동시에 닫힌 상태가 되어 큰 전류가 흐를 수 있는 사고를 방지하기 위해 닫힌 상태와 열린 상태 사이에 데드 타임(Dead Time)이 설정된다.

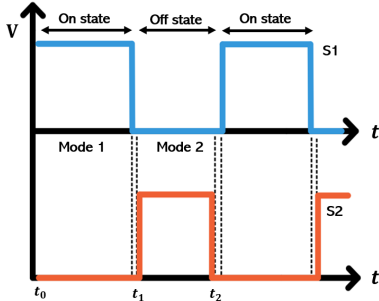


Fig. 6. Controlled PWM gate pulses

Fig. 7은 2개의 셀들로 구성된 밸런싱 회로의 동작원리를 Mode 별로 설명한다.

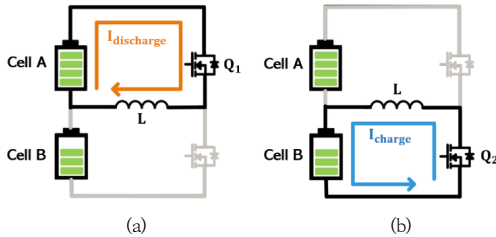


Fig. 7. Working principle of 2-cell balancing circuit (a) Mode 1 (b) Mode 2

Mode 1 ( $t_0 < t < t_1$ ): Fig. 7(a)는 MOSFET  $Q_1$ 스 위치가 닫힌 상태,  $Q_2$ 가 열린 상태로 배터리 셀 A와 인덕터 L를 둘러싼 폐루프가 형성된다. 전류는 셀 A로부터 L로 흐르며, L에 에너지가 저장된다.

$Q_1$ 이 닫힌 상태가 되면, 폐루프 회로 내 전류  $i_1(t)$ 가 흐르고, 기생 인덕턴스 저항  $R_L$ 과 MOSFET의 드레인 소스(Drain-Source) 사이의 저항  $R_{ds}$ 로 인해 전압강하가 발생한다. Eq. (17)은 회로의 등가 저항을 나타내며, Eq. (18)는 Eq. (17)을 고려한 셀 A의 전압을 나타낸다. Eq. (19)은 Eq. (18)로부터 계산된  $i_1(t)$ 의 식을 나타내며, Fig. 7(a)의  $I_{discharge}$ 는  $i_1(t)$ 를 나타낸다.

$$R = R_L + R_{ds} \quad (17)$$

$$V_{cell A} = L \frac{di_1(t)}{dt} + Ri_1(t) \quad (18)$$

$$i_1(t) = \frac{V_{cell A}}{R} (e^{-\frac{R}{L}t_1} - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (19)$$

Where  $R_L$  denotes the parasitic resistance of the L, and  $R_{ds}$  denotes the resistance of the drain-source, and  $R$  denotes the sum of  $R_L$  and  $R_{ds}$ ,  $i_1(t)$  denotes the discharge current in the closed loop of the Mode 1

Mode 2 ( $t_1 < t < t_2$ ): Fig. 7(b)에서  $Q_1$ 는 열린 상태,  $Q_2$ 는 닫힌 상태로 전환되고, L에 저장된 에너지는 셀 B로 전달된다. 이후, 설정된 데드 타임동안 모든 스위치가 열린 상태로 전환된다.

$Q_2$ 가 닫힌 상태로 전환되면 폐루프 내 전류  $i_2(t)$ 가 흐르며, Mode 1과 같이 전압강하가 발생한다. Eq. (20)는 셀 B의 전압을 나타내며, Eq. (21)는 Eq. (20)로부터 계산된  $i_2(t)$ 를 나타낸다. Fig. 7(b)는  $I_{charge}$ 는  $i_2(t)$ 를 나타내며,  $I_{discharge}$ 와 반대 방향의 부호로 표현된다.

$$V_{cell B} = -L \frac{di_2(t)}{dt} - Ri_2(t) \quad (20)$$

$$i_2(t) = -\frac{V_{cell B}}{R} (e^{-\frac{R}{L}t_1} - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (21)$$

Where  $i_2(t)$  denotes the charge current in the closed loop of Mode 2

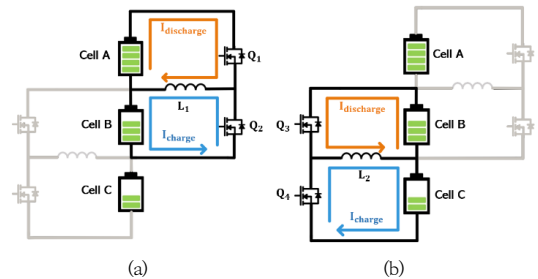


Fig. 8. Working principle of 3-cell balancing circuit (a) Mode 1 (b) Mode 2

Fig. 8은 3 개의 셀들로 구성된 밸런싱 회로의 동작원리를 Mode 별로 설명한다. 벡-부스트 밸런싱은 셀의

개수가 증가함에 따라 각 셀의 에너지 레벨 관계에 따른 스위칭 제어전략이 적용되며, Eq. (22)는 Fig. 8의 셀 별 에너지 레벨 관계를 나타낸다.

$$V_{cell\ A} > V_{cell\ B} > V_{cell\ C} \quad (22)$$

Mode 1: 셀 A의 에너지 레벨이 가장 크기 때문에  $Q_1$ 을 먼저 닫힌 상태로 전환하여 셀 A로부터 인접한 셀 B로 에너지 전달이 이루어지도록 제어된다. 이때  $Q_2$ 는 열린 상태이고,  $Q_3$ 와  $Q_4$ 는 셀 A에서 셀 B로의 밸런싱이 진행되는 동안 열린 상태로 유지된다. 셀 A는 셀 B와 셀 C의 평균 에너지 레벨과 동일해질 때까지 방전된다.

Mode 2: 셀 A가 셀 B와 셀 C의 에너지 레벨의 평균 값에 도달하면  $Q_1$ 과  $Q_2$ 가 열린 상태로 유지된다. 이후,  $Q_3$ 이 먼저 닫힌 상태가 되고,  $Q_4$ 가 열린 상태로 동작을 시작하도록 제어하면, 셀 B에서 셀 C로의 에너지 전달이 이루어진다. 셀 B와 셀 C의 에너지 레벨이 동일해지면, 모든 스위치가 열린 상태로 전환되고, 밸런싱이 종료된다.

## 4. SOC 추정 및 셀 밸런싱 결과

### 4.1 EKF 활용 SOC 추정

EKF를 활용한 멀티 셀의 SOC 추정은 완전히 충전된 배터리 셀들을 1 C-rate로 방전하며 진행했다. Fig. 9와 10은 멀티 셀의 전압과 SOC 추정결과를 보여주며, Fig. 11은 전류 적산법을 사용한 SOC의 참값과 비교한 추정 오차를 보여준다.

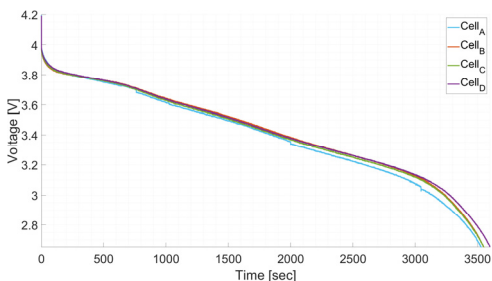


Fig. 9. Multi-cell voltage discharge

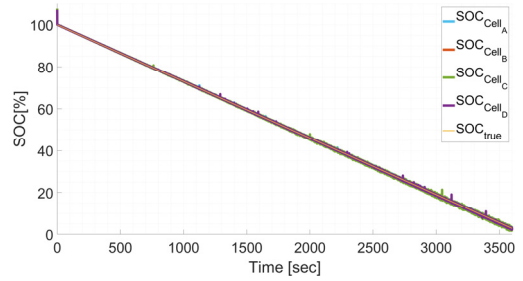


Fig. 10. SOC estimation result

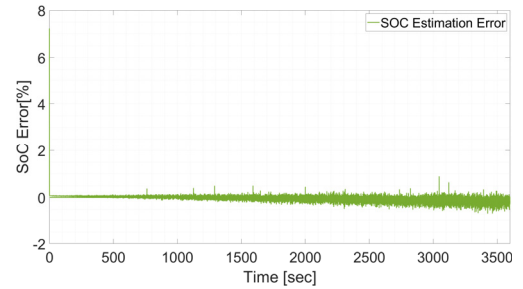


Fig. 11. SOC estimation average error

배터리 셀이 방전 중지전압(Discharge Cut-off Voltage)에 도달할 때까지의 전압과 SOC의 변화를 통해 방전 구간의 각각의 특성을 확인할 수 있다. 셀 전압 곡선은 SOC가 20 %미만인 구간과 80 %를 초과하는 구간에서 비선형적인 출력특성을 보이지만, 추정된 SOC는 전 구간에서 선형적인 특성을 보이며, SOC의 참값을 따라 추정됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 11에서와 같이 SOC의 추정 오차는 초기 단계를 제외한 전 구간에서 1 %미만의 오차를 보이는 우수한 SOC 추정 성능을 확인할 수 있다.

### 4.2 SOC vs 전압 기반 셀 밸런싱

Fig. 12는 SOC와 전압 기반 밸런싱 알고리즘의 순서

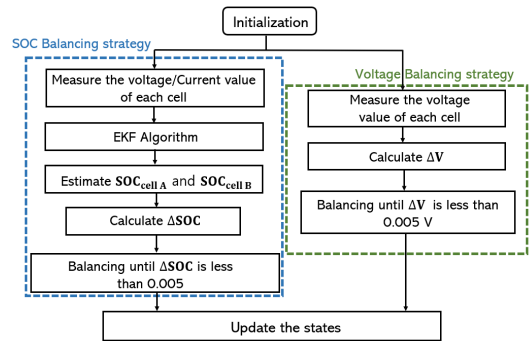


Fig. 12. Algorithm of SOC balancing and voltage balancing

도를 나타낸다. SOC 밸런싱은 측정된 셀의 전압과 전류로부터 EKF 알고리즘을 통해 각 셀의 SOC가 추정되고, 전압 밸런싱은 셀의 단자전압 정보를 바탕으로 이루어진다. 본 실험에서는 SOC와 전압 기반 밸런싱을 동시에 수행했으며, 설정된 셀 간의 편차가 0.5 %와 5 mV이내로 수렴할 때 밸런싱이 종료된다.

Table 2과 Fig. 13은 셀 밸런싱에 사용된 주요 소자의 사양과 장비 구성을 나타낸다. Fig. 13의 센서는 밸런싱 회로에서 측정된 전압과 전류 데이터를 PC로 전송하고, 오실로스코프(Oscilloscope)는 MOSFET의 스위칭 동작을 확인하는 용도로 사용했다. 실험에 사용된 배터리 셀의 전압은 각각 3.824 V와 3.572 V로, SOC의 경우 미리 맵핑된 SOC-OCV 테이블을 사용하여, 초기 SOC를 61.77 %와 33.81 %로 설정했다.

Table 2. Experimental parameters setup

Element		Parameter
Battery	Model	INR18650-35E
	Nominal capacity	3,350 [mAh]
Buck-Boost converter	MOSFET	FDPF20N50FT
	Gate driver	TLP250
	Inductance	100 [ $\mu$ H]
	Switching frequency	30 [kHz]

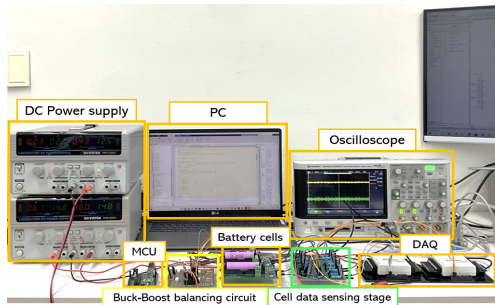


Fig. 13. Prototype circuit with experimental equipment

Fig. 14는 MOSFET의 게이트-소스(Gate-source) 전압 파형을 나타낸다. 밸런싱 회로는 스위칭 주파수 30 kHz에서 동작하며, Fig. 8의 스위치  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 동작에 따라 셀 A로부터 셀 B로 에너지가 전달된다. Fig. 15(a)와 Fig. 15(b)는 휴지기(Relaxation period)에서 4000 s동안 진행된 전압과 SOC 기반의 밸런싱 결과를 나타낸다. 실험 결과 셀 간의 전압은 3572 s에서 동일한 전압으로 균등해지지만, 실제 SOC는 에너지 불균형이 완전히 개선되지 않아 428 s의 소요시간이 더 발생함이 관찰

됐다. 밸런싱 종료 후 셀 간의 전압과 SOC는 3.684 V와 46.52 %로 수렴한 결과를 확인했다.

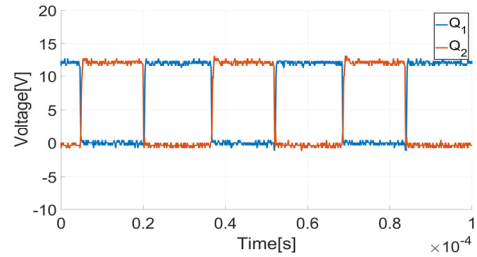
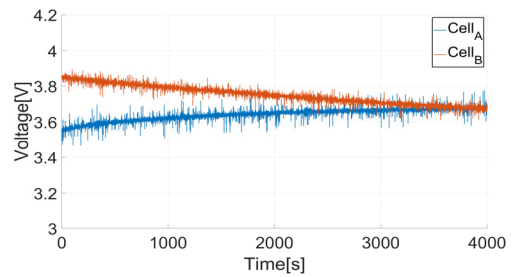
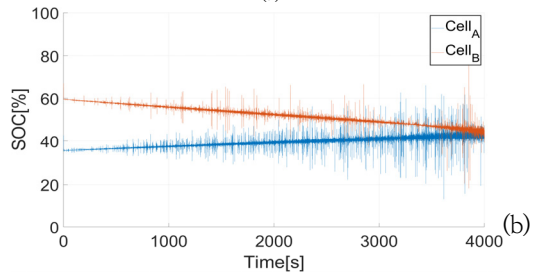


Fig. 14. Gate to source voltage



(a)



(b)

Fig. 15. Cell balancing results  
(a) Voltage-based balancing (b) SOC-based balancing

Table 3는 Fig. 15의 전압과 SOC 편차를 나타낸다. 셀 간의 전압 편차는 초기 252 mV로 측정되며, 3572 s에서 0.2 mV로 수렴한 결과를 보였다. 각 셀의 SOC는 추정 시 초기 SOC 편차가 27.96 %로 나타났지만, 셀 간의 전압이 균등해질 때 3.97 %의 SOC 편차가 관찰되며, 4000 s에서 0.4 %로 수렴한 결과를 보였다. 실험 결과를 통해 셀 간의 전압 균등화가 실제 셀 용량의 완전한 균등화를 나타내지 않으므로, 셀 간의 에너지 밸런싱 수행 시 단자전압 정보 기반이 아닌 SOC 추정 기반의 밸런싱이 수행되어야 정확한 밸런싱을 수행할 수 있음을 확인했다.



Table 3. Deviation of SOC and voltage

Balancing stage	$\Delta V$	$\Delta SOC$
Initial	252 [mV]	27.96 [%]
End of voltage balancing	2 [mV]	3.97 [%]
End of SOC balancing	2 [mV]	0.4 [%]

### 5. 결론

본 논문에서는 전기자동차 배터리 팩을 관리하는 BMS의 셀 밸런싱 정확도를 개선하기 위해 SOC 추정 기반의 밸런싱 방법을 제안했다. 기존의 단자전압 기반 셀 밸런싱은 실제 배터리의 충전상태를 반영하기 어려워 정확한 밸런싱을 수행하는데 한계가 존재한다. 본 논문은 배터리 충전상태 기반의 셀 밸런싱을 위해 EKF 알고리즘 기반 SOC를 추정했고, 추정 오차는 1% 미만으로 기존 연구들에 비해 높은 정확도를 보였다. 또한, SOC 추정의 에너지 밸런싱을 위해 벡-부스트 밸런싱 회로를 설계했고, 실험을 통해 셀의 전압이 균등해질 때 추정된 SOC는 3.97%의 편차가 존재하며 전압의 균등화가 SOC의 균등화를 나타내지 않음을 확인했다.

향후 본 논문에서 제안한 SOC 추정 기반의 능동형 밸런싱 방법을 기반으로 다수의 셀을 밸런싱하는 연구를 진행할 예정이다. 제안된 방법은 EKF 기법을 이용하여 배터리의 SOC를 보다 정확히 추정하며 밸런싱하므로, BMS의 셀 밸런싱 정확도 및 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### References

[1] G. Pierpaolo, A. Gargiulo, P. C. Brambilla, "A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol.20, pp.1127-1142, May 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0903-x>

[2] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, M. Y. Chow, "Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol.7, no.2, pp.4-16, June 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2250351>

[3] J. Zhang, L. Zhang, F. Sun, Z. Wang, "An Overview on Thermal Safety Issue of Lithium-ion Batteries for

Electric Vehicle Application," *IEEE Access*, vol.6, pp.23848-23863, May 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824838>

[4] A. Turksoy, A. eke, A. Alkaya, "A Comprehensive Overview of the Dc-Dc Converter-based Battery Charge Balancing Methods in Electric Vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.133, pp. 10274-10294, Nov. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110274>

[5] Z. B. Omariba, L. Zhang, D. Sun, "Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol.7, pp.129335-129352, Sep. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940090>

[6] Y. Li, J. Xu, X. Mei, J. Wang, "A Unitized Multiwinding Transformer-Based Equalization Method for Series-Connected Battery Strings," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.34, no.12, pp.11981-11989, Dec. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2910205>

[7] T. Wu, F. Ji, L. Liao, C. Chang, "Voltage-SOC Balancing Control Scheme for Series-Connected Lithium-ion Battery Packs," *Journal of Energy Storage*, vol.25, pp.100895-100905, Oct. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100895>

[8] J. H. Kim, J. W. Shin, C. Y. Jeon, B. H. Cho, "Stable Configuration of a Li-Ion Series Battery Pack Based on a Screening Process for Improved Voltage/SOC Balancing," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.27, no.1, p.411-424, June 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2158553>

[9] W. Zhou, Y. Zheng, Z. Pan, Q. Lu, "Review on the Battery Model and SOC Estimation Method," *Processes*, vol.9, no.9, pp.1685-1708, Sep. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9091685>

[10] R. Zhang, B. Xia, B. Li, L. Cao, Y. Lai, W. Zheng, H. Wang, W. Wang, "State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles", *Energies*, Vol.11, No.7, pp.1820-1856, July 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en11071820>

[11] E. T. Nam, U. H. Jung, Y. S. Kwon, "SOC Estimation of Cylindrical Lithium-Ion Multi-Cell Based on Extended Kalman Filter for Improving the Life of EV Battery Pack," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol.23, no.10, pp.728-737, Oct. 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.10.728>

[12] I. S. Kim, "The Research on the Modeling and Parameter Optimization of the EV Battery," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, vol.25, no.3, pp.227-234, June 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2020.25.3.227>

[13] J. H. Kim, C. S. Yoo, "Using Extended Kalman Filter for Real-time Decision of Parameters of Z-R Relationship", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.47, No.2, pp.119-133, Feb. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.2.119>

- [14] S. Hemavathi, "Overview of Cell Balancing Methods for Li-ion Battery Technology," *Energy Storage*, vol.3, no.2, pp.1-12, Aug. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/est2.203>
- 

남 은 택(Euntaek Nam)

[준회원]



• 2016년 3월 ~ 현재 : 한동대학교  
기계제어공학부

<관심분야>  
전력변환

---

이 세 진(Sejin Lee)

[준회원]



• 2017년 3월 ~ 현재 : 한동대학교  
기계제어공학부

<관심분야>  
전력변환

---

권 용 성(Youngsung Kwon)

[정회원]



• 2012년 8월 : University of  
Texas at Austin (공학석사)  
• 2015년 8월 : University of  
Texas at Austin (공학박사)  
• 2015년 10월 ~ 2018년 8월 : LG  
전자 VC사업본부 선임연구원  
• 2018년 9월 ~ 현재 : 한동대학교  
기계제어공학부 조교수

<관심분야>  
전력변환, 전력계통 등