

# 셀 간 편차와 팩 구성방식을 고려한 리튬이온 배터리 팩 등가회로 모델링

이재형, 김나리, 안정훈, 이병국†  
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Lithium-Ion Battery Pack Modeling Considering Cell-to-Cell Variation and Packaging

Jaehyung Lee, Nari Kim, Jung-Hoon Ahn, and Byoung Kuk Lee†  
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문은 리튬이온 배터리 셀 등가모델을 기반으로 하여 동특성을 예측하기 위한 배터리 팩 등가회로 모델링을 제안한다. 셀 간 용량편차에 따른 셀의 직·병렬 구성방식과 배터리 팩 파라미터 분석을 통해 배터리 팩 모델링 방법을 제시한다. 모델링의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 1. 서론

전기자동차 및 ESS (Energy Storage System) 등의 어플리케이션에서 높은 에너지 밀도와 내구성을 가지는 리튬이온 배터리의 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 안전하고 효율적인 배터리 운용을 위해 높은 정확도의 배터리 모델이 요구된다.

기존 배터리 팩 모델링에 관한 연구는 다음과 같이 세 가지의 접근으로 이루어진다<sup>[1]</sup>. 첫 번째 방식은 셀 모델을 단순히 연결한 것을 배터리 팩 모델로 구성하는 방법으로 모델링 결과가 복잡하여 동특성을 파악하기 어렵다. 두 번째 방식은 실제 배터리 팩을 이용하여 모델링하는 방법이다. 이 방식은 배터리의 동특성을 효과적으로 파악할 수 있지만 팩이 제조되기 전에는 팩 모델의 예측이 불가능하다는 단점을 가진다.

세 번째로는 배터리 셀 정보를 이용하여 팩을 셀과 동일한 모델로 등가화 시키는 방법이다<sup>[2]</sup>. 이러한 방식은 팩 모델을 통해 동특성을 파악하기 용이하며 모델의 단순함으로 인해 빠른 시뮬레이션이 가능하다. 또한 배터리 팩을 설계하기 전 셀 모델만을 이용하여 셀 간 편차와 구성방식에 따른 배터리 팩의 특성을 미리 예측할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 이상적인 배터리 팩을 수식적으로 모델링한 후 셀 간 편차와 팩 구성방식을 고려한 배터리 팩 모델링을 제시한다. 모델링의 타당성은 시뮬레이션 통해 검증한다.

## 2. 배터리 팩 등가회로 모델링

### 2.1. 셀 조합에 따른 배터리 팩 모델링

셀 간 편차가 존재하지 않을 때 2차 RC ladder 기반 배터리 셀 조합에 따른 배터리 팩 모델링은 다음과 같이 수행된다.

#### 2.1.1. 배터리 셀 직·병렬 (직렬 n개, 병렬 m개)

동일한 RC ladder가 직렬 n개 혹은 병렬 m개로 연결되어 있을 때 임피던스 계산은 각각 식(1), (2)와 같다.

$$Z_{series} = \frac{n}{\frac{1}{R} + j\omega C} = \frac{1}{\frac{1}{nR} + \frac{j\omega C}{n}} \quad (1)$$

$$Z_{parallel} = \frac{1}{m} \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} = \frac{1}{\frac{m}{R} + j\omega m C} \quad (2)$$

OCV (Open-Circuit Voltage)는 병렬로 연결될 때에는 일정하고 직렬로 연결될 때에는 그 수만큼 증가한다. 이를 바탕으로 용량편차가 없는 경우 그림 1으로 등가화 시킬 수 있다.

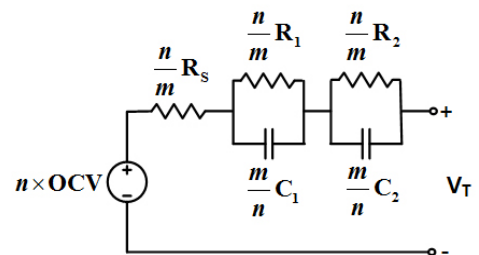


그림 1 용량편차가 없을 때의 배터리 팩 등가회로  
 Fig. 1. Battery pack modeling in ideal case.

### 2.2. 셀 조합에 따른 배터리 특성 분석

셀 간 편차를 고려하였을 시 배터리 팩 모델의 파라미터 분포를 확인하고 이를 바탕으로 그림 2에서 셀 조합에 따른 배터리 팩의 용량과 OCV, 충·방전 손실, ladder parameter를 분석한다. 시뮬레이션은 NCM (Nickel-Cobalt-Manganese) 계열의 27Ah 배터리 셀로 진행한다. (c)~(h)에서의 SOC (State-of-Charge)는 평균용량을 가진 셀의 SOC를 기준으로 한다. 분석 시 다음 두 가지를 가정한다.

- (1) SOC에 따른 셀의 파라미터는 동일
- (2) 셀의 용량편차는 정규분포의 형태로 존재

#### 2.2.1. 셀 간 편차에 의한 파라미터 분포

용량편차가 정규분포로 존재할 경우 각 셀 간 SOC 차이가 발생하여 편차가 있는 팩의 파라미터는 편차가 없는 팩의 파라미터가 위로 불록하면 그보다 아래로 내려오고, 밑으로 불록하면 그보다 위로 올라가는 경향이 있다. 용량편차가 커짐에 따라 팩을 구성하는 셀들의 SOC 차이가 증가하므로 앞서 언급한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타난다.

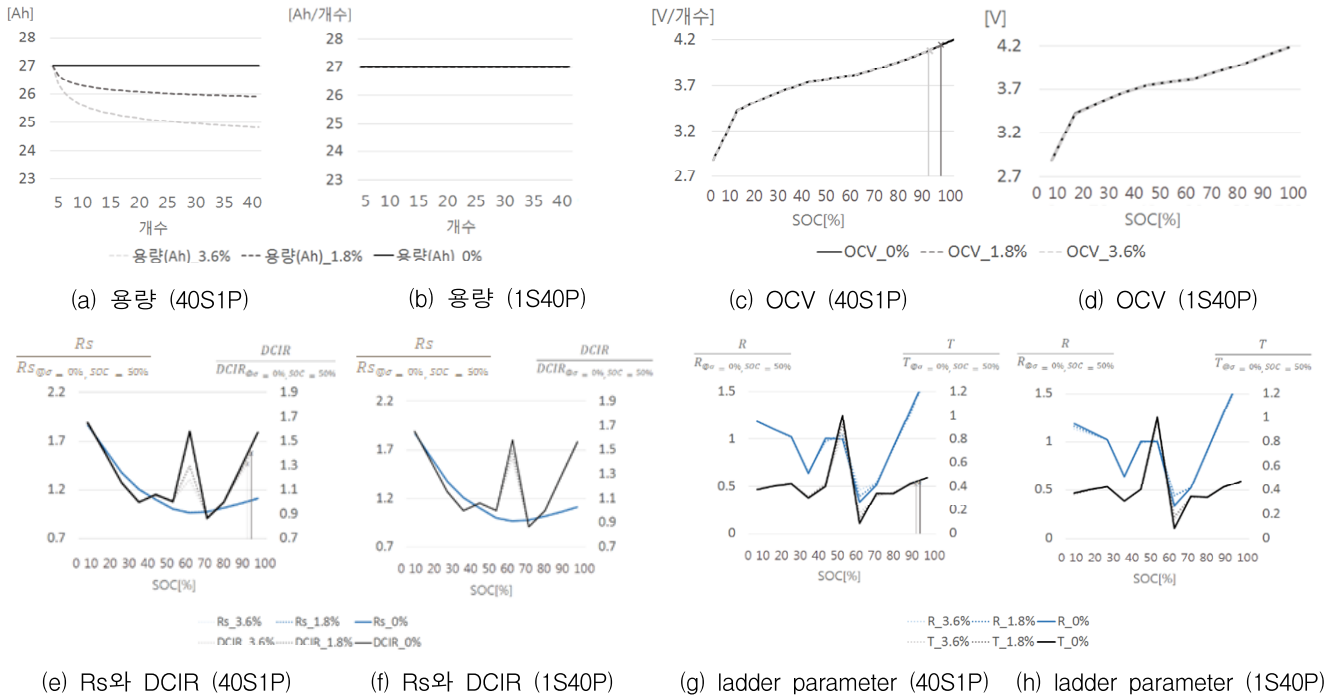


그림 2 직·병렬에 따른 배터리 특성  
Fig. 2. Battery characteristics in series-parallel connection.

### 2.2.2. 용량과 OCV

그림 2의 (a)~(d)는 40개의 셀을 직렬과 병렬로 연결시켰을 때 팩의 용량과 OCV이다. 셀이 직렬인 경우 팩의 용량은 가장 낮은 용량을 가진 셀로 결정되므로 팩의 용량과 최대 OCV는 감소한다. 셀이 병렬인 경우 팩의 용량은 정규분포의 용량편차에 의해 일정하고 OCV는 용량차이에 의한 셀 밸런싱에 의해 용량편차의 영향이 거의 없다.

### 2.2.3. Rs와 DCIR에 의한 충·방전 손실

그림 2의 (e), (f)는 셀이 직렬과 병렬로 각각 연결된 배터리 팩의 Rs와 DCIR를 정규화한 것이다. 이상적일 때 배터리 팩을 1C-rate로 충·방전시킬 때 발생하는 손실은 직렬과 병렬로 연결되어있는 팩이 같다. 직렬로 연결된 팩의 경우 셀 밸런싱에 의해 용량편차에 따른 저항값은 병렬로 연결된 팩의 경우보다 2.2.1.절에서 언급한 경향이 커서 손실이 작게 나타난다.

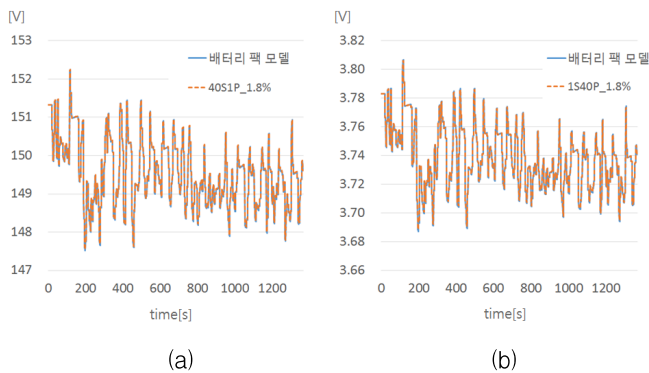


그림 3 UDDS 시뮬레이션 검증  
Fig. 3. Verification for pack model in UDDS simulation.

### 2.2.4. 동특성 분석

그림 2의 (g), (h)는 RC ladder의 저항 (R)과 시정수 (T)를 정규화한 것이다. 시정수가 동일할 때 저항은 동일시간 ladder의 전압변동 크기와 비례하고 시정수는 전압변동이 일어나는 시간과 비례하므로 각 SOC에서의 동특성을 예측할 수 있다.

그림 3은 SOC 50%에서 용량편차가 1.8%인 40개의 셀을 직렬, 병렬로 구성한 것과 팩 모델의 UDDS (Urban Dynamic Driving Schedule) 시뮬레이션 결과이다. 평균오차는 각각 0.0121%, 0.00751%로 높은 모델링 정확도를 나타낸다.

## 3. 결론

본 논문에서는 배터리 셀 모델을 이용하여 배터리 팩을 모델링 하는 방법을 제시하였고 셀의 직·병렬 구성에 따른 배터리 팩의 특성을 분석하였다. 배터리 팩을 제작하기 전에 팩의 용량, OCV, 충·방전 손실, 동특성을 미리 예측하여 어플리케이션에 적절한 배터리 팩 설계에 도움을 줄 수 있다.

이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행한 녹색산업선도형이차전지기술개발 사업(No.10053710)입니다.

## 참고 문헌

[1] Li, Jianwei, and Michael S. Mazzola, "Accurate battery pack modeling for automotive applications," *Journal of Power Sources*, vol. 237, pp. 215-228, September. 2013.  
[2] Dubarry, Matthieu, Nicolas Vuillaume, and Bor Yann Liaw, "From single cell model to battery pack simulation for Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 186, no. 2, pp. 500-507, January. 2009.