

이중 확장 칼만 필터 기반 고정밀 SOC/용량 추정을 통한 폐배터리 충/방전 최대 출력 추정 알고리즘 연구

박진형*, 김건우*, 김종훈*

충남대학교*

A Study on Estimation Algorithm of Maximum Charge/Discharge Power Based on High-accuracy SOC/Capacity Estimation through DEKF

Jinhyeong Park*, Gunwoo Kim*, Jonghoon Kim*

Chungnam National University*

ABSTRACT

본 논문은 이중 확장 칼만 필터를 통한 SOC (State of charge) 및 용량 추정과 배터리 모델 파라미터를 이용한 폐배터리의 최대 출력을 추정하는 방법을 연구 및 제안한다. 배터리의 단순 전압 측정을 통해 상태를 진단할 경우, 부하 조건에 따라 급격한 전압 상승 및 강하로 인해 정밀한 안전 진단 및 운용에 어려움이 따르지만, 폐배터리는 일반 배터리에 비해 전압 변동율이 크기 때문에 상태 진단에 큰 어려움이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 폐배터리의 정밀한 안전 진단을 하기 위해 SOC 영역 및 충/방전에 따른 최대 출력을 계산하여 사전에 배터리의 상태를 진단할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 또한, 배터리의 노화도에 따른 최대 출력을 실험 및 시뮬레이션을 통해 결과를 제시하여 유효한 방식임을 검증한다.

1. 서론

최근 환경 규제에 따른 전기자동차 시장이 급격히 성장하면서 전기자동차에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 전기 자동차의 급격한 성장에 맞춰, 전기자동차에서 회수되는 폐배터리의 처리 문제 및 활용 방안을 국/내외적으로 큰 관심 분야가 되고 있다^[1]. 폐배터리를 화학적으로 처리하기 위해서는 막대한 비용이 요구되고, 처리하는데 있어 환경오염의 문제가 발생한다. 따라서, 최근 세계 자동차 기업들은 전기 자동차에서 회수된 폐배터리를 재활용하는 방안에 대해 강구하고 있다. 특히 폐배터리 모듈을 다시 조합하여 에너지 저장 장치 시스템을 구축하는데 많은 연구가 진행되고 있다. 폐배터리 모듈을 사용하여 ESS (Energy Storage System)를 설계할 때, 많은 비용을 차지하는 배터리를 재활용 배터리로 사용함으로써 큰 비용 절감이 가능하다.

일반적으로 폐배터리는 초기 배터리 용량의 80%가 되는 지점부터 폐배터리로 정의하며, 일반 사용 영역에서의 배터리에 비해 내부 저항 증가 및 특성이 더욱 비선형적인 경향성을 나타내기 때문에 상태 추정에 큰 어려움이 존재한다. 따라서 폐배터리를 사용할 경우, 초기 배터리 상태에 비해 내부 저항이 크게 증가함에 따라 내부 발열이 증가하여 안전에 대한 주의가 더욱 요구된다. 또한, 저항이 증가함에 따라 순간적인 전압 강하가 발생하여 초기 배터리 보다 과충전 및 과방전의 위험이 있어 일반적인 단순 전압 모니터링만으로는 배터리의 안전 영역에서의 운용에 큰 어려움이 따른다. 이러한 리튬 이온 배터리의 특성에 따라 내부의 배터리의 정보를 실시간으로 모니터링하여 사전에 안전상의 문제점을 파악하는 연구가 폐배터리 재활용 시장에서 가장 큰 이슈 사항이다.

따라서 본 논문에서는 폐배터리를 활용하여 구축한 ESS를 사용자가 안전하게 구동할 수 있는 모니터링 요소를 최대 출력으로 선정하여, 사전에 배터리의 운용방안을 마련하기 위한 연구를 진행하였

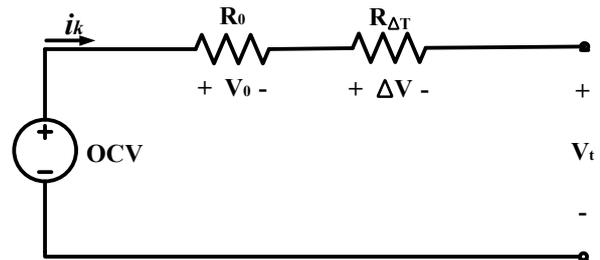


그림 1 최대 출력 계산을 위한 단순화된 전기적 배터리 등가회로 모델
Fig. 1 Simplified battery equivalent circuit model for estimating

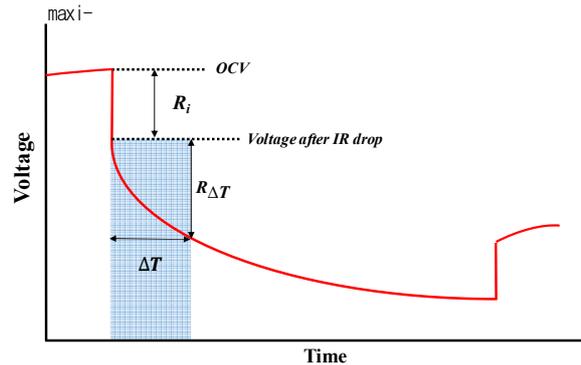


그림 2 배터리 방전 곡선 및 저항 추출 방법
Fig. 2 Battery voltage curve and resistance extraction method at discharge period

다. 최대 출력을 계산하기 위하여 실시간으로 추정되는 SOC (State of charge) 및 용량값이 요구되어, 이중 확장 칼만 필터 알고리즘을 적용하여 정확한 SOC 및 용량값을 기반으로 알고리즘을 구성하였다. 이러한 값들을 기반으로 최대 출력 모델에 적용하여 노화도에 따라 최대 출력 특성을 시뮬레이션을 하고, 이 결과를 바탕으로 폐배터리의 운용방안을 제시한다.

2. 배터리 최대 출력을 위한 배터리 모델 및 알고리즘

2.1 적응형 배터리 등가회로 모델

배터리의 실시간 최대 출력은 측정 장비로 직접적인 측정이 불가능하여, 그림 1의 배터리 등가회로 모델의 파라미터를 통해 계산한다. 배터리의 OCV (Open Circuit Voltage)는 식 (1)과 (2)와 같이 파라미터 측정 관측기를 통해 OCV를 추정하였고^[2], 내부 직렬 저항은 이산 전압/전류 신호를 활용하여 식 (3)과 같은 옴의 법칙을 통해 계산하였다. 모든 배터리 모델의 파라미터는 SOC에 의한 함수로 정의되고, 전류 적산법은 기본적으로 식 (4)과 같이 전류 적산법을 기반

표 1 노화도에 따른 배터리 용량 비교

Table 1 Comparison of capacity according to aging

	1 cycle	230 cycle	480 cycle
Capacity(Ah)	2.3582	1.9766	1.4906

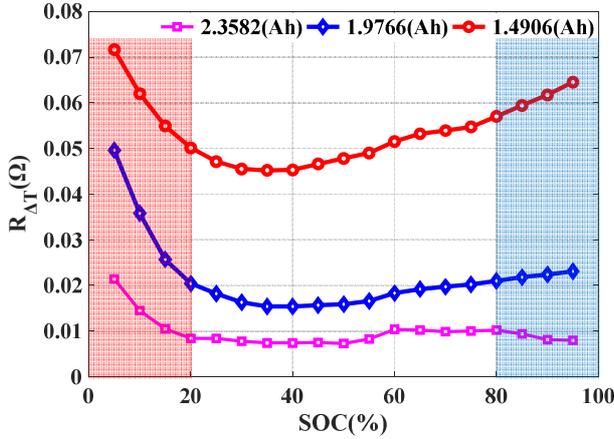


그림 3 노화도에 따른 SOC-저항 관계 그래프

Fig. 3 SOC- $R_{\Delta T}$ relationship curve according to aging

으로 계산한다. 배터리의 단자 전압은 OCV와 직렬 저항을 통해 식 (5)를 통해 계산하며, $R_{\Delta T}$ 는 최대 전력 계산할 경우에만 적용한다.

본 논문에서 제안하는 충/방전 최대 출력을 계산하기 위하여, OCV 측정 실험에서 그림 2와 같이 특정 시간에 방전하는 전압 강하를 통해 $R_{\Delta T}$ 을 추출하여 알고리즘에 적용한다. $R_{\Delta T}$ 은 SOC 5% 간격으로 측정하였으며, 노화 정도에 따라 OCV를 실험을 기반으로 추출된 $R_{\Delta T}$ 을 노화도에 따라 알고리즘에 적용하였다. ΔT 는 일반적으로 배터리 사용 설명서에서 배터리의 출력을 전류를 10초 동안 인가하였을 때로 정의하여 동일하게 추출하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\delta}}_1 \\ \dot{\hat{\delta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 V_0 (V_0 - \hat{V}_0) \\ \alpha_2 (V_0 - \hat{V}_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$OCV = \hat{\delta}_2 / \hat{\delta}_1 \quad (2)$$

$$R_{0,k} = (V_{t,k} - V_{t,k-1}) / (i_k - i_{k-1}) \quad (3)$$

$$SOC_k = SOC_{k-1} + \int idt / C_n \quad (4)$$

$$V_t = OCV_k (SOC_k) + I_k R_0 \quad (5)$$

2.2 배터리 충/방전에 따른 최대 출력 계산식

배터리의 허용 가능한 전류를 계산하기 위하여 식 (5)와 같이 일반적인 전류적산법의 식을 역산하여 배터리의 최대 허용 전류를 식 (6)와 (7) 같이 충/방전에 따라 정의하고, SOC와 용량을 기반으로 계산한다. 식 (7)과 (8)에서의 최대/최소 SOC 값은 각각 만충/만방 기준 SOC인 1과 0으로 설정한다. 최종 배터리의 최대 출력을 계산하는 식은 최대 충전 출력의 경우 식 (8)과 같이 정의하고, 최대 방전 출력의 경우 식 (9)와 같이 정의한다. 이 식에서의 OCV와 저항 값의 경우 그림 1의 배터리 등가 모델의 파라미터를 활용하여 실시간으로 적용하게 된다. 배터리의 충/방전에 따른 허용 전류의 값이 다르기 때문에 식 (7)처럼 배터리 최대 전류 계산식에 N_c 와 같이 충/방전 최대 허용 전류의 비를 통해 계수를 설정하여 전류의 값에 제한을 설정한다.

$$i_{max}^{char,SOC} = N_c (SOC_k - SOC_{max}) / (\Delta T / C_n) \quad (7)$$

$$i_{max}^{dis,SOC} = (SOC_k - SOC_{min}) / (\Delta T / C_n) \quad (8)$$

$$P_{max}^{char,SOC} = i_{max}^{char,SOC} (OCV(SOC_k) - i_{max}^{char,SOC} (R_i + R_{\Delta T})) \quad (9)$$

$$P_{max}^{dis,SOC} = i_{max}^{dis,SOC} (OCV(SOC_k) - i_{max}^{dis,SOC} (R_i + R_{\Delta T})) \quad (10)$$

표 2 이중 확장 칼만 필터 알고리즘 개념도

Table 2 Dual extended Kalman filter algorithm

비선형 시스템

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) + w_{k-1}^x, y_k^x = z(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) + w_{k-1}^y \\ \theta_k = \theta_{k-1} + w_{k-1}^\theta, y_k^\theta = z(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) + w_{k-1}^\theta \end{cases} \quad (11)$$

$$w^x \sim N(0, Q^x), v^y \sim N(0, R^y) \quad (12)$$

$$w^\theta \sim N(0, Q^\theta), v^\theta \sim N(0, R^\theta)$$

시스템 변수 정의

$$A_k = \left. \frac{\partial f(x_k, u_k, \hat{\theta}_k)}{\partial x} \right|_{x_k = \hat{x}_k^-, H_k = \left. \frac{\partial z(x_k, u_k, \hat{\theta}_k)}{\partial x} \right|_{x_k = \hat{x}_k^-} \quad (13)$$

$$C_k = \left. \frac{dz(\hat{x}_k^-, u_k, \theta)}{d\theta} \right|_{\theta = \hat{\theta}_k^-}$$

초기값 선언 ($t=0$)

$$\hat{x}_0 = 0, P_0 = E[(x - \hat{x}_0)(x - \hat{x}_0)^T] \quad (14)$$

$$\hat{\theta}_0 = E(\theta_0), S_0 = 0$$

Step 1: 용량 및 오차 공분산 예측 및 갱신

$$\hat{\theta}_{k+1}^- = \hat{\theta}_k^+, S_{k+1}^- = S_k^+ + Q^\theta \quad (15)$$

Step 2: SOC 및 오차 공분산 예측 및 갱신

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k^+, u_k, \hat{\theta}_{k+1}^-), P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + Q^x \quad (16)$$

Step 3: 칼만 이득 계산 및 SOC 추정

$$\begin{cases} K_k^x = P_{k+1}^- H_k^T (H_k P_{k+1}^- H_k^T + R^x)^{-1} \\ \hat{x}_{k+1}^+ = \hat{x}_{k+1}^- + K_k^x (z_k - \hat{z}_k), P_{k+1}^+ = (I - K_k H_k) P_{k+1}^- \end{cases} \quad (17)$$

Step 4: 칼만 이득 계산 및 용량 추정

$$\begin{cases} K_k^\theta = S_{k+1}^- C_k^T (C_k S_{k+1}^- C_k^T + R^\theta)^{-1} \\ \hat{\theta}_{n,k+1}^+ = \hat{\theta}_{n,k+1}^- + K_k^\theta (z_k - \hat{z}_k), S_{k+1}^+ = (I - K_k H_k) S_{k+1}^- \end{cases} \quad (18)$$

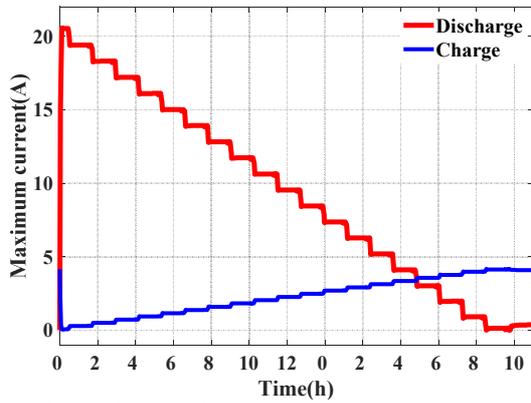
2.3 최대 출력 적용 파라미터

본 논문에서는 배터리의 노화도에 따른 SOC 및 용량 추정 값을 기반으로 2.2절에서 나타낸 식 (9)와 (10)을 사용하여 충/방전 최대 전력을 계산한다. 표 2는 배터리의 노화도에 따른 용량값을 나타낸 표이며, 초기 용량 대비 230Cycle의 용량은 약 83%로 수명이 다하였다. 추가 노화를 통해 480Cycle이 되었을 때 초기 용량 대비 약 63%가 된 것을 확인할 수 있다. 노화도에 따른 $R_{\Delta T}$ 의 실험 데이터는 그림 3에 나타내었다. 배터리의 노화가 진행됨에 따라 전반적인 저항값이 증가하지만, 배터리의 운용 중 과충/방전의 문제가 생길 수 있는 영역인 SOC 20% 이하 및 80% 이상의 영역에서 저항 값이 노화가 진행됨에 따라 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 순간적인 부하의 출력 상황에 따라, 노화가 진행될수록 전압만으로 모니터링하기 어려움을 나타낸다.

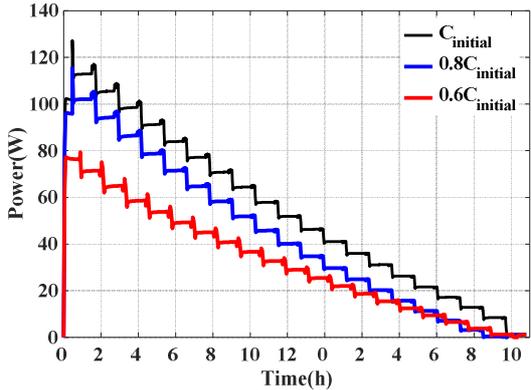
3. 이중 확장 칼만 필터 알고리즘

본 논문의 2.1절에서 설명한 전압을 기반으로 하는 출력 계산식의 경우, 비교적 2.2절의 전류 기반의 방법에 비해 SOC 및 용량 정보가 부정확 하여도 최대 출력을 계산할 수 있는 장점이 있다. 하지만 배터리의 OCV 정보와 내부 저항에 대한 정확한 데이터가 필요하다. 전류 기반의 정보를 통해 최대 출력을 계산할 경우 정확한 SOC 및 용량의 정보가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 이중 확장 칼만 필터 알고리즘을 통해, SOC 및 용량을 추정하여 이를 기반으로 배터리의 최대 출력을 노화에 따라 계산하는 방법을 제안한다.

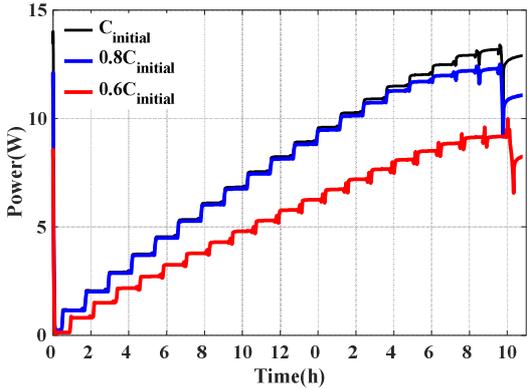
이중 확장 칼만 필터는 배터리의 상태를 나타내는 파라미터중 상이한 특성을 가지는 SOC와 용량값을 동시에 추정하고 제어기의 안정성을 향상하기 위하여 병렬 구조로 두개의 칼만 필터를 구동하는 방식의 알고리즘이며, 표 1을 통해 전반적인 알고리즘의 구동



(a) 충/방전 최대 전류 추정 결과



(b) 최대 방전 출력 추정 결과



(c) 최대 충전 출력 추정 결과

그림 4 노화도에 따른 배터리 충/방전 최대 출력 시뮬레이션 결과
Fig. 4 1 Per unit values of the system parameters

순서를 나타내었다. 알고리즘을 구동하기 위하여 배터리의 상태 방정식과 측정 방정식이 요구되며, 식 (11)과 같이 두개의 상태를 관측하기 위해서 두개의 상태 방정식과 측정 방정식을 정의한다. SOC를 나타내는 상태 방정식은 식 (4)에서 나타낸 전류 적산법을 기반으로 정의하고 용량의 경우 정확한 모델링이 어렵기 때문에 일정한 값에 노이즈 값을 더하는 식으로 정의한다. 두 상태 변수의 측정 방정식은 그림 1의 배터리 모델의 단자 전압 식으로 정의한다. 배터리의 비선형적인 특성을 알고리즘에 반영하기 위해서 식 (12)와 같이 각 상태 변수의 상태 방정식과 측정 방정식을 상태 변수로 편미분을 하여 선형화된 값을 알고리즘에 적용한다. 모델 및 변수의 정의가 완료되면 알고리즘이 구동하게 되는데, 알고리즘의 초기 값으로써 SOC, SOC의 오차 공분산, 용량 및 용량의 오차 공분산을 식 (13)과 같이 정의한다. SOC의 초기 값은 0으로 설정하며, 초기 SOC에 따라 오차 공분산을 계산한다. 용량 값의 경우 사전에 측정된 용량 값을 기반으로 설정하고, 초기 값을 알고있다고

가정하여 용량의 오차 공분산의 초기값은 0으로 설정한다. Step 1의 식 (14)에서 용량의 값과 오차 공분산을 갱신하여 식 (15)에 적용하여 SOC값과 오차 공분산의 값을 갱신한다. 갱신된 SOC의 값을 보정하기 위해서 식 (16)의 칼만 필터 식을 통해 칼만 게인값을 계산하고 이를 기반으로 SOC 값을 보정한다. 보정된 SOC에 따라 오차 공분산도 새로 갱신하게 된다. 식 (17)은 Step 3의 과정과 동일하며, 보정되는 값은 배터리의 용량 값이다.

4. 시뮬레이션 및 검증

본 논문에서 제안하는 최대 출력을 검증하기 위해 NCA 계열 리튬 이온 배터리 (3.6V, 2.5Ah)를 사용하였다. 실험에서 사용한 배터리의 최대 충전 전류는 4A이며 최대 방전 전류는 25A이다. OCV 측정 프로파일을 각 노화도 (63%, 83% 및 100% 용량)에 따라 적용하여, 최대 출력 추정시뮬레이션 결과를 비교하였다.

최대 출력은 충/방전 최대 허용 전류를 기반으로 계산되기 때문에 중요한 파라미터이기 때문에 그림 4. (a)에 나타내었다. 식 (7)을 사용하여 방전 전류를 계산하였으며, SOC 100%에서의 최대 방전 전류는 약 21A로 데이터시트에서 명시된 25A에 근접하는 결과를 나타내었다. SOC 0%에서의 최대 충전 전류는 약 4A로 데이터 시트에서 나타낸 최대 충전 전류에 거의 근접하는 결과를 나타내었다. 그림 4. (b)는 최대 방전 출력을 나타낸 그래프로서, 방전이 진행됨에 따라 방전 출력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. SOC 100% 영역에서 최대 출력의 값은 노화도에 따라 초기 용량대비 각각 9.52%, 32.02% 감소한다. 그림 4. (c)의 충전 출력의 경우 방전 허용 전류에 비해 작기 때문에 최대 출력 또한 방전시에 비해 작은 값을 나타낸다. SOC 0%구간에서의 노화에 따른 최대 충전 전력에 경우에도 각각 약 14.18%, 35.45%로 노화가 진행됨에 따라 최대 전력이 감소하며, 특히 폐배터리 상태 (초기 용량의 60%)에서 변화율이 커지는 것을 확인할 수 있다. 최대 출력의 경우 일반 셀에서는 노화에 따라 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 하지만 초기 용량 대비 60%인 폐배터리의 경우 급격한 출력 감소 현상이 나타났다. 이는 수명이 다한 셀 (초기 용량 대비 80% 이하)의 경우, 폐배터리의 그림 3에서 나타낸 내부 저항이 일반 배터리의 상태에 비해 급격하게 증가했기 때문에 급격한 전압 변화에 따른 결과이다.

4. 결론

본 논문은 폐배터리를 활용하여 에너지 저장 장치를 위한 관리 시스템의 초석을 다지는 연구로서, 안전 기준을 확립하기 위하여 최대 출력을 관점으로 연구를 진행하였다. 일반 배터리에 비해 폐배터리의 경우 내부 저항의 급격한 증가로 인해 최대 출력이 크게 감소하여 더욱 제어 및 안전 로직에 대한 연구가 요구된다. 본 논문에서 제시한 충/방전에 따른 최대 출력 정보를 사용할 경우 부하를 연결하기 전에 배터리의 상태를 간접적으로 판별이 가능하기 때문에 보다 안전한 배터리 관리가 가능하다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. ((No. 20182410105280))

참고 문헌

[1] Tsai-Hsiang Chen, Ting-Yen Hsieh, Nien-Che Yang, Jin-Shyr Yang, and Ching-Jung Liao, "Evaluation of advantages of an energy storage system using recycled EV batteries", International Journal of an energy storage systems, Vol. 45, Issue. 1, pp. 264-270, 2013, February.

[2] Bo Ning, Binggang Cao, Bin Wangm, Zhongyue Zou, "Adaptive sliding mode observers for lithium-ion battery state estimation based on parameters identified online," Energy, vol. 153, pp. 732-742, 2018.