

다중모델 추정기법을 이용한 HEV/EV용 리튬이온전지의 잔존충전용량 추정

논 문
60-1-23

Multiple Model Adaptive Estimation of the SOC of Li-ion battery for HEV/EV

정 해 봉* · 김 영 철†
(Hae-Bong Jung · Young-Chol Kim)

Abstract - This paper presents a new state of charge(SOC) estimation of large capacity of Li-ion battery (LIB) based on the multiple model adaptive estimation(MMAE) method. We first introduce an equivalent circuit model of LIB. The relationship between the terminal voltage and the open circuit voltage(OCV) is nonlinear and may vary depending on the changes of temperature and C-rate. In this paper, such behaviors are described as a set of multiple linear time invariant impedance models. Each model is identified at a temperature and a C-rate. These model set must be obtained a priori for a given LIB. It is shown that most of impedances can be modeled by first-order and second-order transfer functions. For the real time estimation, we transform the continuous time models into difference equations. Subsequently, we construct the model banks in the manner that each bank consists of four adjacent models. When an operating point of cell temperature and current is given, the corresponding model bank is directly determined so that it is included in the interval generated by four operating points of the model bank. The MMAE of SOC at an arbitrary operating point (T °C, $I_{bat}[A]$) is performed by calculating a linear combination of voltage drops, which are obtained by four models of the selected model bank. The demonstration of the proposed method is shown through simulations using DUALFOIL.

Key Words : Li-ion battery, State of charge, SOC estimation, Battery model, Open circuit voltage(OCV), C-rate, multiple model adaptive estimation.

1. 서 론

친환경 교통수단의 필요에 따라 최근 하이브리드 전기자동차(hybrid electric vehicle: HEV)와 전기자동차(electric vehicle: EV)는 전 세계적으로 큰 관심이 되었다[1]. 2차 전지 시스템은 이러한 자동차의 핵심 부품 중 하나이며, 특히 리튬이온전지(lithium-ion battery: LIB)는 큰 에너지 밀도와 수명을 가지고 있어 가장 주목받는 에너지 저장시스템이다. 그런데 리튬이온전지의 수명을 길게 유지시키기 위해서는 전지 셀의 충전상태를 3.4~3.8V 범위에서 동작해야 한다. 만일 이 범위를 벗어나게 되면, 리튬이온전지의 수명이 매우 짧아지게 되며 화학적 성질을 잃게 될 수 있다. 따라서 리튬이온전지는 사용 시 SOC를 항상 감시하여야 한다.

리튬이온전지의 SOC를 추정하는 방법에는 여러 가지가 있다[3]. 전류적산방법(Coulomb counting method)은 리튬이온전지의 충전과 방전 시 흐르는 전류를 적산하여 추정하는 방법으로, 간단하여 쉽게 사용할 수 있다. 그러나 초기 값을 설정할 때 발생하는 오차와 전류측정오차로 인한 적분 누적 오차 때문에 장시간 추정 시 오차가 상당히 커지는 문제점이 있다. 전기화학적 모델링 방법은 셀 내의 화학적 반응과

정을 분자 수준에서 고려한다[3, 4, 7]. 또 다른 방법으로 전기적 등가회로모델을 이용하는 것이다[4, 6, 7]. 이 접근방법의 기존의 결과들은 고정된 파라미터 값을 갖는 하나의 R-C회로를 사용한다. 리튬이온전지의 단자 전압은 SOC 값에 따라 비선형적인 특성을 가지며, 온도와 전류의 변화에 따라 변한다. 더욱이 리튬이온전지는 충방전 횟수가 증가함에 따라 용량이 점차 감소하게 된다. 만일 등가회로 모델에 고정된 파라미터를 사용하게 되면 넓은 범위의 운전 조건에서 리튬이온전지의 SOC를 정확하게 추정하는 것은 어렵다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 전기적 등가회로의 다중 모델을 이용한 SOC 추정 방법을 제안하고자 한다. 우선, SOC 범위를 셀의 개방 시 전압(open circuit voltage: 이하 OCV로 표기)과 SOC사이의 비선형성을 고려하여 3 영역으로 분할하였다. 높은 SOC쪽 두 영역은 선형 동적 동작(linearly dynamic behavior) 구간이고(그림 2의 영역 A, B 참조), 낮은 SOC 쪽 영역(그림 2의 영역C)은 정적 비선형성(nonlinearly static behavior) 구간이다. 세 영역에서 단자전압과 OCV사이의 관계는 28개의 동작점에 대응하는 임피던스 모델로 나타내었다. 여기서, 동작점은 전류의 동작범위(1~40A)를 4개로 분할하고, 온도 동작범위(-20~60°C)를 7개로 분할하여 각각 횡축과 종축에 표시하였을 때 교차하는 28개의 점으로 정하였다 (그림 3 참조). 결과적으로 세 영역에서 각각 28개의 동작점에 대응하는 임피던스 모델로 나타나게 된다. 한 동작점에서의 등가회로모델은 전지에 의사이진난수열(pseudo random binary sequence: PRBS) 형태의 충방전 전류를 인가하여 얻어진 단자전압과

* 준 회원 : 충북대학교 전자공학과 석사과정
† 교신저자, 시니어회원 : 충북대학교 전자공학부 교수
E-mail : yckim@cbu.ac.kr
접수일자 : 2010년 9월 7일
최종완료 : 2010년 12월 10일

OCV 데이터를 사용하여 수행된다. 전지관리시스템 (battery management system: BMS)을 이용하여 매 샘플시간마다 측정되는 온도, 전류, 단자전압 데이터를 사용해 SOC를 실시간으로 추정하기 위해 연속계 임피던스 모델은 이산치계 전달함수 형태로 변환한다. 모델 파라미터들은 온도와 전류, SOC영역에 따라 크게 달라지는 것을 보일 것이다. 특히, 낮은 SOC 영역에서 단자전압과 OCV사이의 전압강하는 강한 비선형성으로 인해 선형 임피던스 모델로 모델링하기 어려움을 보인다. 다중 임피던스 모델들을 얻은 후, 모델들의 부분집합을 구성하였다. 각 부분집합은 인접한 4개의 모델들을 포함한다. 이 부분집합을 모델뱅크(model bank)라 정의한다. 리튬이온전지의 온도와 전류가 변하더라도 임의의 동작점을 포함하는 모델뱅크를 바로 결정할 수 있다. 주어진 운전 조건에서 OCV는 모델뱅크를 이용하여 MMAE 방법에 의해 비교적 정확하게 추정할 수 있다. OCV가 추정되면 SOC는 실험곡선 또는 OCV 대 SOC의 모델방정식에 의해 결정된다. 제안된 방법의 타당성은 DUALFOIL[2]의 시뮬레이션 결과를 통하여 검증한다.

2. 다중모델적응추정기법을 이용한 SOC 추정

본 장에서는 다중모델적응추정기법을 이용한 리튬이온전지의 SOC 추정에 대해 기술한다. 기본적으로 전지 내부의 기전력과 단자전압의 관계를 전기적 임피던스 등가회로 모델로 표현하는 방식에서 출발한다. 특히, 전지의 동작조건에 따라 모델 파라미터가 무시할 수 없을 만큼 변동하는 문제를 고려하기 위해 등가 임피던스의 파라미터를 동작점을 나타내는 온도와 전류의 함수로 표시하게 된다. 이 모델을 구하기 전에 고려해야 하는 또 다른 특성은 리튬이온전지의 등가임피던스 모델을 SOC 수준에 따라 선형전달함수로 나타낼 수 있는 영역과 비선형 모델로 나타낼 수 있는 영역이 있다는 것이다. 이러한 특성은 다수의 리튬이온전지에서 대부분 발견되는 현상이다. 본 논문에서는 이러한 성질을 세 영역(그림 2의 A, B, C 영역)으로 분할하여 고려하는 방식을 보인다. 전지관리시스템에서 매 샘플시간마다 측정하게 되는 온도와 전류를 동작점으로 고려하고, 전지의 허용동작범위(예, 온도는 -20~60 °C, 전류는 C-rate 조건) 내에서 각각 유한 개수로 나누어 생성되는 동작점을 기준동작점으로 정의하게 된다. 본 논문에서는 한 예로서 전류는 4개, 온도는 7 개로 나누어 총 28개의 기준동작점을 생성하는 것을 보인다. 따라서 이 경우에는 세 영역별로 각각 28개의 기준동작점에 대응하는 임피던스 모델 셋이 정의된다. 이러한 다중모델 정의에 기초하여 SOC 추정은 크게 두 단계로 구성된다. 하나는 전지의 다중 모델 셋을 모델링하고 파라미터를 식별하는 개방루프테스트(open loop test) 단계이고, 다른 하나는 식별된 모델 셋으로부터 효과적으로 실시간 SOC를 추정하는 다중모델적응추정 단계이다. 모델링 단계에서는 각 동작점에서 먼저 연속계 전달함수 또는 다항식을 식별하고 이를 이산치계로 변환한다. 이렇게 하는 이유는 BMS에 따라 샘플링 시간이 달라지더라도 모델링을 다시 하지 않아도 되기 때문이다. 두 번째 단계에서는 BMS에서 측정된 온도와 전류의 값에 의해 임의의 동작점이 정해지면 이 동작점을 둘러싸는 4개의 기준동작점을 선택하게 된다.

이 4개의 동작점에서의 이산화 임피던스 모델을 모델뱅크로 정의하고 주어진 동작점에서의 개방전압을 이 모델뱅크 모델의 선형결합으로 결정하는 방식을 제시한다. 최종적으로 샘플 시간에서의 SOC는 OCV와 SOC의 관계로부터 구해짐을 보인다.

2.1 리튬이온전지의 등가회로 모델

리튬이온전지의 내부 기전력과 단자전압의 관계를 그림 1의 등가회로 모델로 고려한다.

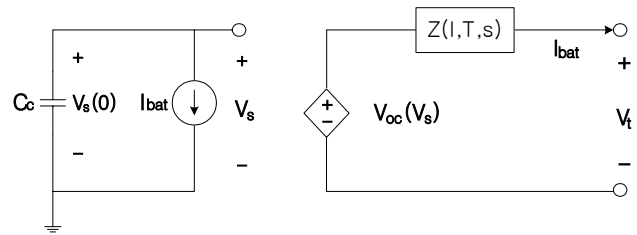


그림 1 리튬이온전지의 등가회로모델

Fig. 1 An equivalent circuit model of Li-ion battery

커패시터 C_C 는 전지의 만 충전 시 충전용량을 나타내며

$$C_C = Capacity[Ah] \cdot f(cycle) \cdot 3600 \quad (1)$$

로 정의된다. 여기서, $Capacity$ 는 전지의 공칭용량이고, $f(cycle)$ 은 충방전 사이클 수에 따라 감쇠특성을 나타내는 인수이다. 리튬이온전지의 SOC를 전압으로 나타내면

$$V_S(t) = V_S(0) - \frac{1}{C_C} \int_0^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (2)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 $V_S(0)$ 는 충전 또는 방전 시의 초기 전압이다. 하나의 리튬이온전지 셀이 완전히 충전되어 있다면 그 값은 4.2V이고, SOC가 0% 상태라면 3.2V이다. 리튬이온전지 셀의 개방 시 전압 OCV는 전압제어전압전원(voltage controlled voltage source), $V_{OC}(V_S)$ 로 표현될 수 있다. $V_t(t)$ 와 $I_{bat}(t)$ 는 각각 단자전압과 충전/방전 전류이다. $Z(I, T, s)$ 는 온도와 전류의 동작점에서 식별될 등가회로 모델이다. 본 논문에서는 리튬이온전지의 온도와 전류에 대한 동특성과 SOC 수준에 대한 비선형성에 중점을 두기 위해 충방전 사이클 수에 다른 용량감소 특성과 셀 자체 방전 효과는 고려하지 않기로 한다.

그림 2는 SOC에 대한 OCV의 전형적인 곡선을 나타낸다. 이 곡선은 다음의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$SOC = b_1 e^{b_2 \cdot OCV} + a_6 OCV^6 + a_5 OCV^5 + a_4 OCV^4 + a_3 OCV^3 + a_2 OCV^2 + a_1 OCV + a_0 \quad (3)$$

(3)으로부터 만약 OCV가 추정된다면 이에 대응하는 SOC가 결정될 수 있음을 알 수 있다.

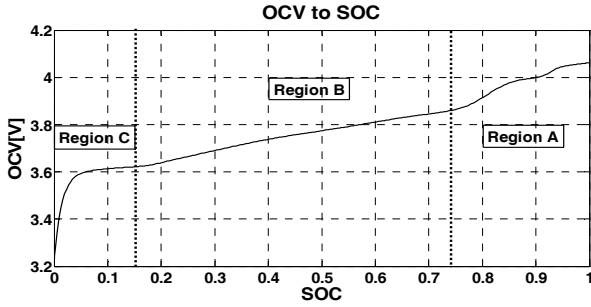


그림 2 SOC에 대한 OCV곡선과 세 영역
Fig. 2 OCV vs SOC curve and three regions

LIB의 OCV와 SOC사이의 관계가 어떤 영역에서는 비선형성을 갖는다는 것은 무시할 수 없는 특성이다. 등가회로 모델을 더욱 정확하게 식별하기 위해 SOC 수준에 따라 두 개의 선형동작영역(Region A, B)과 한 개의 비선형영역(Region C)로 나누었고, 그림 2에 나타내었다. 한 예로, 그림 2의 경우는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Region A} &: 3.85 < \text{OCV} \leq 4.06 \\ \text{Region B} &: 3.62 \leq \text{OCV} \leq 3.85 \\ \text{Region C} &: 3.23 \leq \text{OCV} < 3.62 \end{aligned}$$

리튬이온전지의 단자 전압과 OCV 사이의 전압강하는 온도와 전류에 따라 변한다. 이것을 고려하기 위해 각각 몇 개씩 나눌 수 있는데, 한 예로 전지의 온도를 작동 범위인 -20℃부터 60℃까지 -20, -10, 0, 10, 24, 40, 60℃의 7개의 포인트로 분할하였다. 비슷한 방법으로 전류를 1A부터 40A까지 1, 10, 20, 40[A]의 4개의 포인트로 분할하였다.

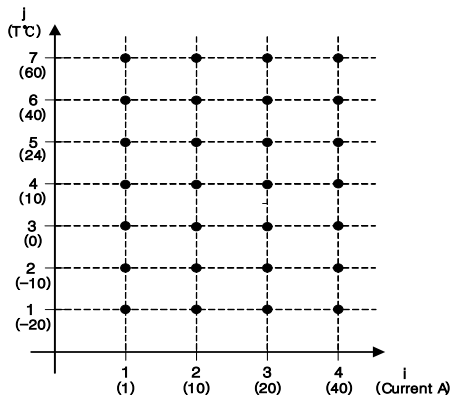


그림 3 28개의 기준동작점
Fig. 3 28 reference operating points

이렇게 분할된 온도와 전류를 각각 종축과 횡축에 배열하였을 때 나타나는 28개의 교차점을 전지의 기준동작점(reference operating points)으로 정의하고 그림 3에 나타내었다. 즉, 교차점 (i, j)=(2, 4)는 전류 10A, 온도 10℃에서의 임피던스 모델을 나타낸다. 이러한 동작점의 수의 결정은 LIB의 제조사에 따라 또 모델에 따라 다를 수 있다.

2.2 임피던스 모델 및 식별(identification)

앞서 설명한 바와 같이 그림 2의 영역 A와 영역 B에서는 임피던스 모델을 선형 전달함수로 나타낼 수 있으나, 영역 C는 비선형성이 강하기 때문에 선형 임피던스 함수로 모델링하기 어렵다. 이러한 이유로 모델링은 선형 영역과 비선형 영역으로 구분하여 수행하기로 한다.

(A) 선형 동적 동작영역에서의 모델링

영역 A와 영역 B의 모든 동작점에서 그림 1의 $Z(I, T, s)$ 는 여러 제작사의 리튬이온전지의 모델 특성을 모의실험을 통해 조사한 결과 다음과 같이 1차 또는 2차 연속계 전달함수로 식별될 수 있음을 확인하였다.

$$\begin{aligned} Z(I, T, s) &= \frac{V_t(s) - V_{OC}(s)}{I_{bat}(s)} \\ &= \frac{b_{nb}(I, T)s^2 + \dots + b_1(I, T)s + b_0(I, T)}{a_{na}(I, T)s^2 + \dots + a_1(I, T)s + a_0(I, T)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$nb \leq 2, na \leq 2$$

(4)의 모델파라미터는 전지에 대해 개방회로테스트를 수행하여 리튬이온전지의 전류(I_{bat}), 단자 전압(V_t), V_{OC} 의 샘플링 데이터를 취득하여 식별하게 된다. 전달함수 모델의 입출력 관계는 (5)로 표현할 수 있으며, 그림 4는 (5)에 대한 블록선도를 나타낸다.

$$y(s) = V_t(s) - V_{OC}(s) = Z(s)|_{I=T=I_{bat}} I_{bat}(s) \quad (5)$$

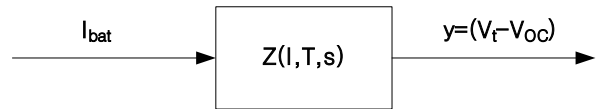


그림 4 전달함수 모델의 입출력 관계에 대한 블록선도
Fig. 4 Block diagram for input-output of transfer function model

파라미터 식별을 위해 가장 일반적으로 사용하는 테스트 입력신호는 PRBS 형태이다 [9]. 그림 5는 잘 검증된 소프트웨어인 DUALFOIL [2]의 Bellcore사 리튬이온전지에 대해 모델링을 위해 인가한 PRBS 시험입력(충방전 전류)이고, 그림 6은 출력응답인 V_t 와 V_{OC} 를 나타낸다. 그림 5와 6에서 전류는 10A, 온도는 24℃이다. 이렇게 얻어진 입출력 샘플 데이터로부터 다음과 같이 Garnier 등의 방법[9]을 적용하면 연속계 모델을 식별할 수 있다. 우선, (4)와 (5)를 시간영역의 미분연산자($p = d/dt$)를 이용하여 다시 쓰면 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} y(t) &= V_{OC}(t) - V_t(t) = \frac{B(p)}{A(p)} I_{bat}(t) \\ B(p) &= b_2(I, T)p^2 + b_1(I, T)p + b_0 \\ A(p) &= p^2 + a_1(I, T)p + a_0 \end{aligned} \quad (6)$$

이를 임의의 샘플 시간 $t = kT_s$ 에서 회귀방정식 형태로 다시 쓰면 (7)로 나타낼 수 있다.

$$y(k) = \phi^T(k)\theta \quad (7)$$

$$\phi^T(k) = [-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad I_{bat}(k) \quad I_{bat}(k-1) \quad I_{bat}(k-2)]$$

$$\theta^T = [a_1(I, T) \quad a_0(I, T) \quad b_2(I, T) \quad b_1(I, T) \quad b_0(I, T)]$$

(7)의 θ 는 Matlab CONTSID toolbox [9]의 srvc 함수를 사용하여 얻을 수 있다.

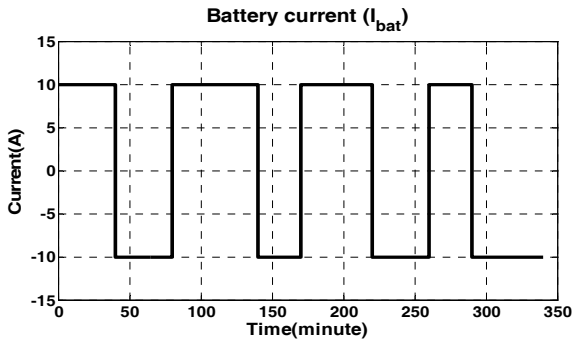


그림 5 PRBS 시험 입력(충방전 전류)
Fig. 5 PRBS test input (charge/discharge current)

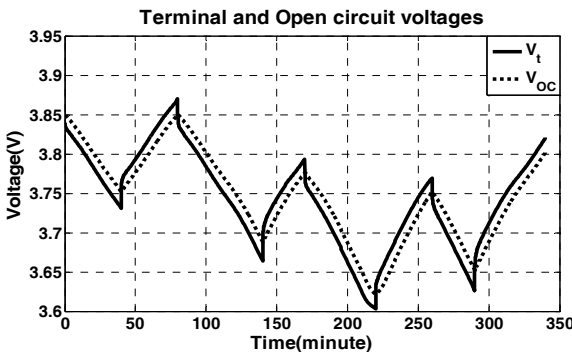


그림 6 전지의 출력응답(단자전압 V_t 과 개방 전압 V_{OC})
Fig. 6 Output response of battery(Terminal voltage V_t and Open circuit voltage V_{OC})

한 예로, DUALFOIL [2]의 Bellcore사 리튬이온전지에 대해 이렇게 구한 모델 파라미터를 부록의 표 2~표 3에 보였다. 표 2는 영역 B에서 10A 전류 동작점과 7개의 다른 온도 동작점에서 식별한 (4)의 모델 파라미터이고, 표 3은 전지 셀 온도를 -20°C 로 유지하면서 4개의 전류 동작점에서 구한 모델 파라미터이다. 그림 7은 표 2의 모델 파라미터들을 도시한 것으로, 등가임피던스 모델의 파라미터가 동일 전류에서 온도변화에 따라 상당히 변하는 것을 보여준다. 그림 8은 표 3의 모델 파라미터들을 도시한 것으로, 모델의 파라미터가 전류의 변화에 따라 무시할 수 없을 만큼 변하는 것을 보여준다. 그림 7과 8로부터, 만일 고정된 하나의 모델을 그림 1의 등가회로에 사용 된다면, OCV(또는 SOC)를 정확하게 추정하기 어렵다는 것을 입증한다.

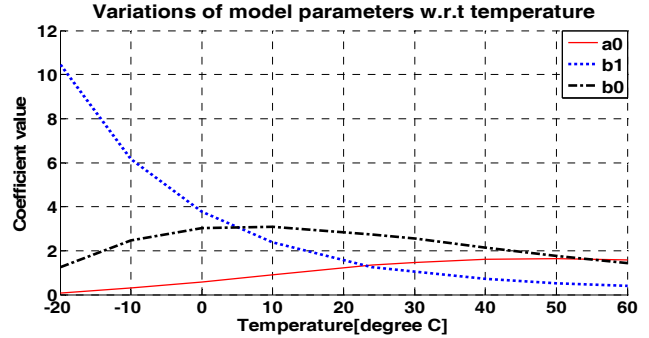


그림 7 온도변화에 따른 모델파라미터의 변화(영역B, 전류 10A)
Fig. 7 Variation of model parameters w.r.t. temperature change(when current of 10A in Region B)

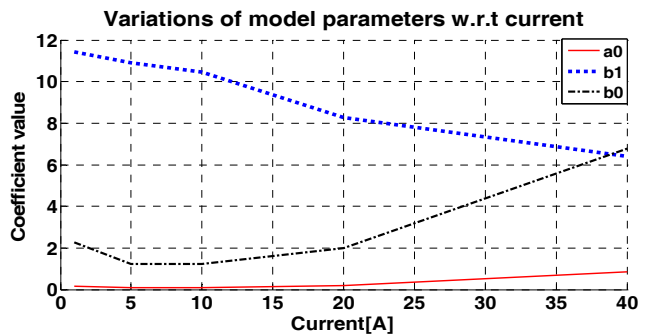


그림 8 전류변화에 따른 모델파라미터의 변화(영역B, 온도 -20°C)
Fig. 8 Variation of model parameters w.r.t. current change (when constant temperature at -20°C in Region B)

(B) 비선형 영역에서의 모델링

여러 제작사의 리튬이온전지의 모델 특성을 모의실험을 통해 조사한 결과 영역 C에서는 다음과 같이 $Z(I, T, V_t)$ 를 2차 또는 3차 다항식으로 식별할 수 있음을 확인하였다.

$$Z(I, T, V_t) = c_{nc}(I, T) V_t^{nc} + \dots + c_1(I, T) V_t + c_0(I, T), \quad nc \leq 3 \quad (8)$$

영역 C에서는 전지의 비가역성이 무시할 수 없을 만큼 나타나기 때문에 영역 A, B와 달리 (8)의 모델은 충전 모드와 방전 모드를 별개로 구하기로 한다. (8)의 모델 파라미터는 리튬이온전지의 전류(I_{bat}), 단자 전압(V_t), V_{OC} 의 샘플링 데이터를 사용하여 식별된다. 파라미터 식별에 사용되는 입출력 데이터는 전지에 일정한 충방전 전류를 인가하여 얻는다. (5)처럼 (8)의 입출력 관계를 (9)로 표현할 수 있다.

$$y(t) = V_t(t) - V_{OC}(t) = Z(I, T, V_t) I_{bat}(t) \quad (9)$$

(9)를 샘플 데이터를 바탕으로 벡터형태로 다시 쓰면

$$y(k) = \phi^T(k)\theta \quad (10)$$

$$\phi^T(k) = [V_t^3(k) I_{bat}(k) \quad V_t^2(k) I_{bat}(k) \quad V_t(k) I_{bat}(k) \quad I_{bat}(k)]$$

$$\theta^T = [c_3(I, T) \quad c_2(I, T) \quad c_1(I, T) \quad c_0(I, T)]$$

로 나타낼 수 있다. 모델 파라미터인 θ 는 (11)의 LSE(Least Square Estimation)방법을 사용하여 얻었다.

$$\theta = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T y \quad (11)$$

한 예로, DUALFOIL [2]의 Bellcore사 리튬이온전지에 대해 이렇게 구한 모델 파라미터를 부록의 표 4와 표 5에 보였다. 10A 전류 동작점과 7개의 온도 동작점에서 식별한 (8)의 다항식 모델 파라미터이며, 표 4는 방전모드, 표 5는 충전모드의 파라미터이다. 이 결과는 충전 모드와 방전 모드의 모델이 상당히 다르다는 것을 보여준다

2.3 MMAE를 이용한 SOC 추정

앞 절에서 SOC 수준별로 세 영역으로 구분하고 개방루프테스트를 통해 각 영역에서 기준동작점에 대응하는 임피던스 모델을 식별하는 과정을 기술하였다. 본 절은 두 번째 단계로서 전지의 다중모델 셋이 구해졌다고 가정하고 이들 모델 셋으로부터 어떻게 OCV 또는 SOC를 추정하는가 하는 문제를 다룬다.

대용량 리튬이온전지는 대부분 BMS에 의해 관리되기 때문에 매 샘플시간마다 전류, 단자전압, 온도 등이 측정된다. 이 때 얻어진 온도와 전류의 값을 매 샘플 시간에서의 동작점으로 정의하기로 한다. 그리고 그림 9에서처럼 임의의 동작점(Z_i : 온도 T_z , 전류 I_{batZ} 일 때의 등가임피던스)을 둘러싸는 4개의 기준동작점의 모델 셋 $\{Z_{i,j}, Z_{i,j+1}, Z_{i+1,j}, Z_{i+1,j+1}\}$ 을 모델뱅크 $B_{i,j}$ 라 정의한다. 이 정의를 따르면 모델뱅크 $B_{i+1,j+1}$ 은 그림 9와 같이 임피던스 모델 셋 $\{Z_{i+1,j+1}, Z_{i+1,j+2}, Z_{i+2,j+1}, Z_{i+2,j+2}\}$ 를 나타낸다. 임의의 동작점이 그림 9의 가장자리 부근이나 귀퉁이에 놓일 때는 모델뱅크는 2 또는 1개의 모델로 구성될 수도 있다. 본 논문에서 제시하고자 하는 SOC 추정을 위한 MMAE는 전체 모델 셋 중에서 주어진 동작점을 포함하는 하나의 모델뱅크를 선택하고 이 모델뱅크에 포함된 부분 모델 셋에 의해 OCV를 추정하게 된다.

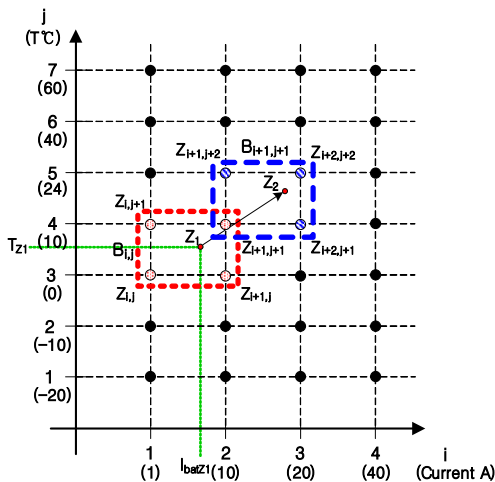


그림 9 28개의 임피던스 모델과 모델뱅크
Fig. 9 28 impedance models and model banks

예를 들어, 그림 9에서 동작점 Z_1 (온도 7°C, 전류 7A)에서 동작점 Z_2 (온도 18°C, 전류 17A)로 변화했다고 하면 모델뱅크는 $B_{1,3}$ 에서 $B_{2,4}$ 가 된다.

한편, SOC 추정을 실행하는 BMS는 일반적으로 디지털 시스템으로 구현되기 때문에 SOC 추정도 디지털 알고리즘으로 나타낼 필요가 있다. 따라서 연속계 모델을 이산치계 모델로 변환하기로 한다. 모델링 과정에서 직접 이산치계 모델을 구할 수도 있으나 전지와 BMS에 따라 샘플링 시간은 달라질 수 있기 때문에 샘플링 시간이 변하더라도 모델링을 다시 해야 할 필요가 없도록 연속계 모델을 구한 것이다. BMS의 데이터 샘플링 시간을 T_s 라 할 때, Tustin 근사화법을 이용하면 (4)에 대한 이산치계 모델인 (12)를 구할 수 있다. 즉, (4)의 복소변수 s 를 $s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1}$ 로 치환하여 구한다.

$$Z_{i,j}(z) = \frac{V_{z,i,j}(z)}{I_{bat}(z)} = \frac{\hat{b}_{nb}z^2 + \dots + \hat{b}_1z + \hat{b}_0}{z^2 + \dots + \hat{a}_1z + \hat{a}_0}, \quad nb \leq 2 \quad (12)$$

영역 C의 등가임피던스의 이산치계 모델은 (5)에서 단자전압을 샘플치로 치환하여 (13)과 같다.

$$Z_{i,j}(k, V_t(k)) = \hat{c}_{nc}(I, T) V_t(k)^3 + \dots + \hat{c}_1(I, T) V_t(k) + \hat{c}_0(I, T) \quad (13)$$

$nc \leq 3$

BMS에서 매 샘플시간마다 전지에 흐르는 충전 또는 방전 전류가 측정되면 (12), (13)으로부터 $SOC(k-1) \in A, B$ 영역 일 때, 그림 1의 등가임피던스 양단의 전압강하는 샘플시간 k 에서 (14)로 계산되고

$$V_{z,i,j}(k) = -\hat{a}_1 V_{z,i,j}(k-1) - \hat{a}_0 V_{z,i,j}(k-2) + \hat{b}_2 I_{bat}(k) + \hat{b}_1 I_{bat}(k-1) + \hat{b}_0 I_{bat}(k-2) \quad (14)$$

$SOC(k-1) \in C$ 영역 일 때는 다음 (15)로 계산된다.

$$V_{z,i,j}(k) = I_{bat}(k) Z_{i,j}(k, V_t(k)) = I_{bat}(k) [\hat{c}_{nc}(I, T) V_t(k)^3 + \dots + \hat{c}_1(I, T) V_t(k) + \hat{c}_0(I, T)] \quad (15)$$

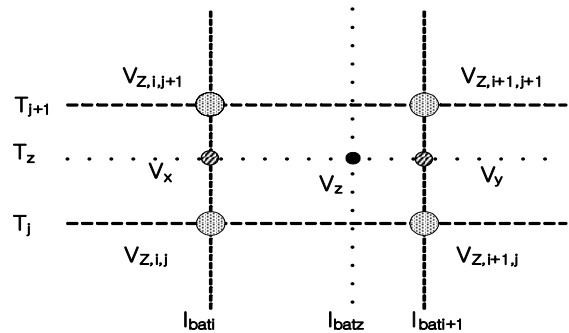


그림 10 모델뱅크 $B_{i,j}$ 내에 존재하는 V_z 의 다중모델 추정
Fig. 10 Multiple model adaptive estimation of V_z , which exists in the area of model bank $B_{i,j}$

이제 다중모델적응SOC추정 알고리즘을 기술하기로 한다. 본 추정알고리즘의 기본 개념은 현재 동작점에 대응하는 등가임피던스의 전압강하를 이 동작점을 둘러싸는 모델뱅크의 4개 모델의 전압강하의 선형결합(linear combination)으로 결정한다는 것이다. 일반성을 잃지 않으므로, 현재 동작점이 그림 10의 $(T_z, I_{bat,z})$ 에 있다고 하면 이 동작점에 대응하는 등가임피던스의 전압강하(V_z)의 추정 값은 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{V}_z &= \lambda \hat{V}_x + (1-\lambda) \hat{V}_y \\ &= \mu \lambda \hat{V}_{Z,i,j}(k) + (1-\mu) \lambda \hat{V}_{Z,i,j+1}(k) \\ &\quad + \mu(1-\lambda) \hat{V}_{Z,i+1,j}(k) + (1-\mu)(1-\lambda) \hat{V}_{Z,i+1,j+1}(k) \\ &= h_{i,j} \hat{V}_{Z,i,j}(k) + h_{i,j+1} \hat{V}_{Z,i,j+1}(k) \\ &\quad + h_{i+1,j} \hat{V}_{Z,i+1,j}(k) + h_{i+1,j+1} \hat{V}_{Z,i+1,j+1}(k) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서

$$\hat{V}_x = \mu \hat{V}_{Z,i,j}(k) + (1-\mu) \hat{V}_{Z,i,j+1}(k), \quad 0 \leq \mu \leq 1 \quad (17)$$

$$\hat{V}_y = \mu \hat{V}_{Z,i+1,j}(k) + (1-\mu) \hat{V}_{Z,i+1,j+1}(k) \quad (18)$$

μ 는 온도에 대한 가중인수(weighting factor)이고, λ 는 전류에 대한 가중인수이다. 예를 들어, 온도 동작점 $T_z = 7^\circ\text{C}$ 이면, 인접 기준동작점 온도가 0°C 와 10°C 이므로 $\mu = 0.3$ 로 선택된다. 마찬가지로 전류 동작점 $I_{bat,z} = 6.4$ 이면, 인접 기준동작점 전류가 1A와 10A이므로 $\lambda = 4/9 = 0.444$ 로 선택된다. h 는 μ 와 λ 값으로부터 계산된다. 현재 동작점에서의 임피던스의 전압강하가 추정되면 개방전압의 추정 값 $\hat{V}_{OC}(k)$ 는 (19)에 의해 결정된다.

$$\hat{V}_{OC}(k) = \hat{V}_z(k) + V_t(k) \quad (19)$$

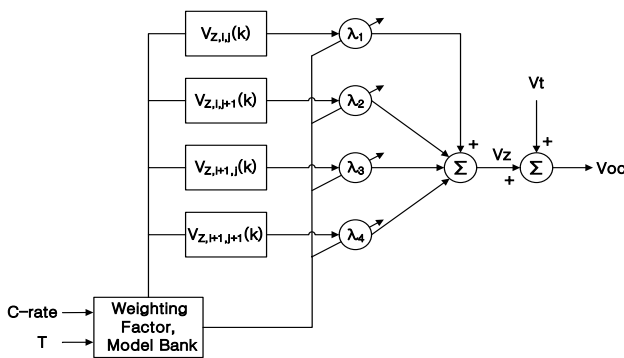


그림 11 다중 모델을 적용한 V_{OC} 추정방법의 블록선도
Fig. 11 A multiple model adaptive scheme for V_{OC} estimation

여기서 $V_t(k)$ 는 전지의 단자전압으로 매 샘플시간 마다 측정되는 값이다. 그림 11은 다중모델적응추정기법을 이용한 개방전압(OCV) 추정 알고리즘을 보여주는 블록선도이다. 결과적으로, (19)를 통해 V_{OC} 가 추정되면 (3)으로부터 SOC를 계산할 수 있으며, 또는 그림 2의 V_{OC} 대 SOC 실험곡선으로도 결정할 수 있다.

3. 시뮬레이션

2장에서 제시한 다중모델적응기법을 이용한 SOC 추정 방법을 시뮬레이션으로 검증하기 위해 국제적으로 잘 알려진 소프트웨어 프로그램인 DUALFOIL [9]의 Bellcore 사 LIB에 적용하여 수행하였다. 상기 충방전 상황을 고려하기 위해, 영역 A와 B에서 PRBS 형태의 충방전 전류를 고려하였으며, 2.2절에서 기술한 방법으로 표 2 ~5와 같은 모델 셋을 구하였다. SOC 추정 성능을 비교하기 위해 다음 동작 조건을 고려하였다.

- (i) 0부터 140분까지 전지 온도는 7°C 로 유지하는 동안 LIB에 8A의 충방전 전류를 인가한다.
- (ii) 140분부터 220분까지는 18A의 충방전 전류가 인가하고, 온도가 140분에서 20°C 로 변환 후 유지한다.

V_{OC} 는 처음 140분 동안은 모델뱅크 $B_{1,3}$ 가 선택되며 $\lambda = 0.222, \mu = 0.3$ 와 (14)~(18)를 사용하여 추정되며, 140분 경과 후 80분 동안은 모델뱅크 $B_{2,4}$ 가 선택되며 $\lambda = 0.2, \mu = 0.286$ 를 사용하여 추정되었다. 그림 12는 DUALFOIL의 Bellcore 사 LIB 모델의 V_{OC} 와 추정된 \hat{V}_{OC} 의 곡선을 나타낸 것이다. V_{OC} 의 최대추정오차는 5.3 mV로 SOC로 환산하면 2% 이내의 오차를 보였다. 이 결과는 제안한 SOC 추정방법이 고려한 동작 조건 전 범위에서 정밀한 추정 성능을 가짐을 입증해주고 있다.

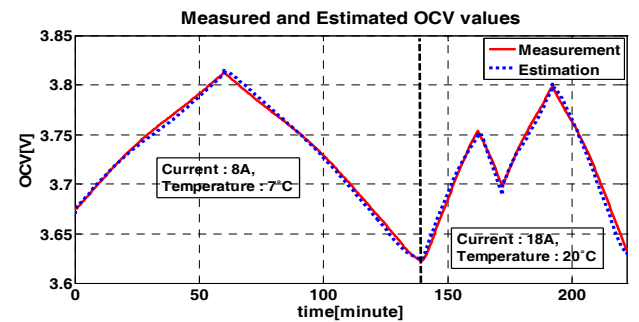


그림 12 MMAE로 추정된 V_{OC}와 측정된 V_{OC}의 비교
Fig. 12 Comparison of its MMAE and measured V_{OC}

성능을 비교하는 다른 예로서, 현재 동작점을 둘러싸는 모델뱅크의 4개 모델을 각각 하나씩만 사용하여 V_{OC} 를 추정하는 것은 충분하지 않다는 것을 보이고자 한다. 이를 위해 상기 LIB 모델에 B영역에서 8A의 충방전 전류를 흘리고 온도는 7°C 로 유지하는 동작 조건을 고려하였다. 이 경우 동작점을 둘러싸는 모델뱅크는 $B_{1,3} = \{Z_{1,3}, Z_{1,4}, Z_{2,3}, Z_{2,4}\}$ 가

된다. 그림 13은 이 모델뱅크의 4개 모델을 각각 하나씩만 사용하여 V_{OC} 를 추정한 결과를 보여주고 있다. 표 1은 이 경우의 SOC의 최대 추정오차를 비교한 결과이다. 이 시뮬레이션 결과 또한 본 논문에서 제시한 추정방법의 정밀한 추정 성능을 잘 보여주고 있다.

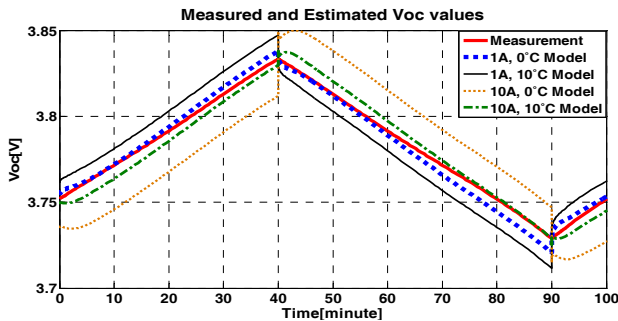


그림 13 각각 다른 모델을 사용하여 V_{OC} 를 추정한 결과
 Fig. 13 Estimation results of V_{OC} using different models

표 1 최대 추정오차의 비교

Table 1 Comparisons of the maximum estimation errors

구 분	SOC 최대추정오차
모델 $Z_{1,3}$ 사용 시	4%
모델 $Z_{1,4}$ 사용 시	6.6%
모델 $Z_{2,3}$ 사용 시	8.6%
모델 $Z_{2,4}$ 사용 시	3%
MMAE method 사용 시	1.76%

4. 결 론

본 논문에서는 대용량 리튬이온 리튬이온전지의 새로운 잔존충전용량(SOC) 추정방법을 제안하였다. LIB의 전기적 등가회로 모델에 근거하였으며, 두 가지 난제인 (1) 리튬이온전지의 내부 기전력과 단자전압 사이의 비선형성, (2) 등가 모델 파라미터의 온도와 전류의 변동에 따른 변화를 해결하기 위해 다중모델적용추정기법을 도입하였다. LIB의 고유 특성인 SOC 수준에 따라 다르게 나타나는 선형구간과 비선형 구간을 3개의 블록으로 분류하였으며, 온도와 전류를 동작점으로 정의하고 허용동작범위 내에서 유한 개수로 분할한 기준동작점을 생성하는 방법을 고려하였다. 이러한 개념에서 추정알고리즘은 두 단계로 구성된다. 먼저, 각 영역의 기준동작점에 대응하는 모델 셋을 식별하는 개방루프 테스트 단계와 식별한 모델 셋으로부터 현재 동작점 부근의 부분 모델 셋인 모델뱅크를 정의하여 이 모델뱅크를 구성하는 최대 4개의 모델로부터 OCV를 추정하는 단계이다. 선형구간의 임피던스 모델은 2차 전달함수로 모델링하면 충분함을 제시하였으며, 비선형구간에서는 단자전압의 3차 (또는 2차) 다항식 모델로 나타낼 수 있음을 제시하였다. 추정알고리즘은 BMS와 연계하여 실시간 추정이 가능하도록 고려되었으며, 잘 알려진 LIB 소프트웨어인 DUALFOIL을 사용한 시뮬레이션을 통해, 제안한 SOC 추정 방법이 상시 충방전 상황에서 매우 정밀한 추정성능(시뮬레이션 조건에서

SOC 추정오차 2% 이내)을 가짐을 보였다. 이 방법은 각 제조사별로 다른 리튬 이온 배터리의(LIB)의 등가모델이 한번 구해지고 나면 이후로 등가 모델을 다시 구할 필요가 없으며, 매 샘플시간마다 이용되는 모델은 항상 4개 이내이기 때문에 계산이 간단하고 구현이 용이한 장점을 갖는다. 다중 모델 수를 몇 개로 하는 것이 최적인가 하는 문제는 LIB 모델과 제조방법에 따라 다를 수 있으며 충분히 나누어 모델을 식별한 후 각 모델의 차이를 비교하여 축소하는 것도 권장할 만하다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2009-(C1090-0904-0007))

참 고 문 헌

[1] C.C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles", Proc. of the IEEE, vol. 90, pp.247-275, 2002.
 [2] P. Albertus and J. Newman, "Introduction to Dualfoil 5.0," <http://www.cchem.berkeley.edu/jsngrp/fortran.html>, Aug. 2007
 [3] V. Pop, H.J. Bergveld, D. Danilov, P.P.L. Regtie, and P.H.L. Notten, *BatteryManagementSystems*, Springer, 2008.
 [4] G.L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification," *J. of Power Sources*, vol.134, pp.262 - 276, 2004.
 [5] P. Rong and M. Pedram, "An Analytical Model for Predicting the Remaining Battery Capacity of Lithium-Ion Batteries," *IEEE Trans. VLSI Systems*, vol.14, no.5, pp.441-451, 2006.
 [6] B. Schweighofer, K.M. Raab, and G. Brasseur, "Modeling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System," *IEEE Trans. Instr. And Meas.*, vol.52, no.4, pp.1087-1091, 2003.
 [7] M. Chen and G.A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.21, no.2, pp.504-511, 2006.
 [8] Haebong Chung, Lihua Jin, Yongsang Lee and Young Chol Kim, "Modeling of Li-ion Battery for the SOC Estimation", in proceedings of ICMIT 2009, Kwangju, Korea, December 2009.
 [9] H. Garier, M. Gilson, T. Bastogne, and M. Mensler, "The CONTSID Toolbox: A Software Support for Data-based Continuous-time Modeling," in Identification of Continuous-time Models from

Sampled Data, edited by H. Garnier and L. Wang, Springer, 2008.

부 록

표 2 영역 B에서 충방전 전류 10A, 7개의 온도에서 모델 $Z_{ij}(s)$ 의 파라미터

Table 2 Parameters of Model $Z_{ij}(s)$ in Region B when a constant current 10A and different temperatures

T ^{°C}	a ₁	a ₀	b ₁ *e-3	b ₀ *e-3
-20	1	0.0883	10.44	1.248
-10	1	0.2995	6.173	2.478
0	1	0.5803	3.782	3.033
10	1	0.8977	2.376	3.089
24	1	1.351	1.266	2.735
40	1	1.61	0.7225	2.138
60	1	1.588	0.3945	1.435

표 3 영역 B에서 온도 -20^{°C}, 5개의 전류로 충방전했을 때의 모델 $Z_{ij}(s)$ 의 파라미터

Table 3 Parameters of Model $Z_{ij}(s)$ in Region B when a constant temperature -20^{°C} and different currents

Current	a ₁	a ₀	b ₁ *e-3	b ₀ *e-3
1A	1	0.099	11.36	1.45
5A	1	0.08601	10.91	1.245
10A	1	0.0883	10.44	1.248
20A	1	0.1746	8.277	1.986
40A	1	0.855	6.772	6.772

표 4 영역 C에서 전류 10A, 방전모드, 7개의 온도에서의 모델 $Z_{ij}(s)$ 의 파라미터

Table 4 Parameters of Model $Z_{ij}(s)$ in Region C when discharge mode, a constant current of 10A, and different temperatures

T ^{°C}	c ₂	c ₁	c ₀
-20	0.0015	-0.0834	0.2857
-10	0.0011	-0.0811	0.2811
0	0.001	-0.0807	0.2798
10	0.0009	-0.0806	0.2792
24	0.0009	-0.0805	0.2787
40	0.0009	-0.0805	0.2786
60	0.0009	-0.0805	0.2785

표 5 영역 C에서 전류 10A, 충전모드, 7개의 온도에서의 모델 $Z_{ij}(s)$ 의 파라미터

Table 5 Parameters of Model $Z_{ij}(s)$ in Region C when charge mode, a constant current of 10A, and different temperatures

T ^{°C}	c ₃	c ₂	c ₁	c ₀
-20	-0.9257	9.4464	-32.0472	36.1577
-10	-1.116	11.3527	-38.4096	43.2303
0	-1.1511	11.6293	-39.0776	44.6823
10	-1.182	11.8893	-39.7776	44.2721
24	-1.1954	11.9766	-39.9105	44.242
40	-1.1889	11.8792	-39.478	43.641
60	-1.1809	11.7792	-39.0798	43.1265

저 자 소 개



정 해 봉 (丁 海 奉)

1983년 12월 21일생. 2009년 충북대 전자공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.
Tel : 043-273-3968
Fax : 043-272-2475
E-mail : poripo44@cbnu.ac.kr



김 영 철 (金 永 喆)

1981년 고려대학교 전기공학과(공학사), 1983년 서울대학교 전기공학과(공학석사), 1987년 서울대학교 전기공학과(공학박사), 1988년~현재 충북대학교 전자공학부 교수. 1992년~1993년 미국 Texas A&M Univ. Post-Doctoral Fellow. 2001~2002년 미국 Vandervilt Univ./Tennessee State Univ. 객원교수. 2009-2010년 대한전기학회 정보 및 제어 부문회 회장.
Tel : 043-261-2475
Fax : 043-272-2475
E-mail : yckim@cbu.ac.kr