

# 불확실성을 갖는 RC 모델 기반의 리튬이온 배터리 SOC 추정을 위한 강인한 고이득 관측기 설계

## Robust High-Gain Observer Based SOC Estimator for Uncertain RC Model of Li-Ion Batteries

이종연 · 김원호 · 현창호<sup>†</sup>

Jong-Yeon Lee, Wonho Kim, and Chang-Ho Hyun<sup>†</sup>

공주대학교 전기전자제어공학부

<sup>†</sup> Division of Electrical Electronic and Control Engineering, Kongju National University

### 요 약

본 논문에서는 모델의 불확실성을 갖는 RC 배터리 모델의 State-of-Charge(SOC)를 추정하기 위한 강인한 고이득 관측기를 설계한다. 일반적으로 SOC를 추정하기 위해 사용하는 RC 배터리 모델은 실제 배터리 셀과 정확하게 일치하지 않고 거기에 따른 모델의 불확실성이 존재하게 된다. 이렇게 불확실성이 존재할 때 그 영향을 최소화하고 보다 정확한 SOC를 추정할 수 있는 강인한 관측기를 설계하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 실제 배터리 셀과 RC 배터리 모델 사이에 모델 불확실성이 존재하더라도 정확한 SOC 추정을 위하여 강인한 고이득 관측기를 설계한다. 하지만 이러한 강인한 고이득 관측기는 높은 이득으로 발생하는 톱 현상(peaking phenomenon)과 출력 측정오차에 민감하게 반응하여 발생하는 진동(perturbation)이 존재하는 단점이 있다. 그래서 이를 보완하기 위해 슬라이딩 모드 기법을 사용하여 강인한 고이득 관측기를 설계한다. 마지막으로 성능 검증을 위하여 선형 관측기, 고이득 관측기를 이용한 SOC 추정결과를 비교한다.

**키워드** : 불확실성, 리튬이온 배터리, SOC추정, 강인성, 고이득 관측기

### Abstract

This paper proposes the robust high-gain observer based SOC estimator for uncertain RC model of Li-Ion batteries. In general, RC battery model has inevitable uncertainties and it cause some negative effect to estimate the accurate SOC of Li-Ion batteries. The proposed estimator overcomes such weakness with two techniques; high-gain observer design technique and sliding mode control technique. A high-gain observer provides the robustness against model uncertainties to the proposed estimator. A sliding mode control technique helps the proposed estimator by reducing the side effect of adopting a high-gain observer such as peaking phenomenon and perturbation. The performance of the proposed estimator is verified by some simulation.

**Key Words** : Uncertainties, Lithium-Ion Batteries, SOC estimator, Robustness, High-Gain Observer

## 1. 서 론

최근 신재생에너지 중 풍력 또는 태양광 등에서 생산되는 전력을 저장하는 장치로서 배터리의 중요성이 커지고 있다. 배터리의 수명은 충방전 횟수에 따라 크게 달라지기 때

문에 SOC를 정확히 추정하여 배터리의 상태를 파악하는 것이 중요하다.

배터리의 SOC를 추정하는 많은 기법들이 그동안 많이 연구되어 왔다. 전기화학적 모델링 방법은 셀 내의 화학적 과정을 분자 수준에서 고려하는 방법이고 전류적산 방법은 전류만을 고려한 접근방법으로 단순하고 쉬운 방법이지만 초기값 오차와 전류적산의 누적 오차가 발생하는 문제를 가지고 있다. 또 대체로 고정된 하나의 RC회로가 사용되는 등가회로 모델을 이용하는 방법이 있다. 리튬 이온 배터리의 단자 전압은 SOC 레벨에 따라 비선형적인 특성을 가지며 온도와 전류의 변화에 따라 변한다. 또한 배터리는 충방전 횟수가 증가할수록 용량이 감소하게 된다. 만약 고정된 파라미터의 전기적 등가회로모델을 사용하게 되면 환경에 따라 그 특성이 달라지는 배터리의 SOC를 정확하게 추정하는 것은 어렵다.[1-13]

모델을 선택하는 과정에서 발생하는 불확실성을 모델 불확실성이라고 한다. 일반적으로 SOC 관측기의 설계를 보

접수일자: 2013년 4월 10일

심사(수정)일자: 2013년 6월 2일

게재 확정일자: 2013년 월 일

+ 교신저자

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

면 주로 선형화된 모델인 RC 배터리 모델을 사용하고 있다. 이러한 RC 배터리 모델은 실제 배터리 셀이 가지고 있는 비선형적인 부분을 선형화시켜 근사화한 것이므로 실제 배터리와 그 성능이 유사하지만 같다고 할 수 없다. 그렇기 때문에 선형화된 모델인 RC 배터리 모델은 불확실성을 갖는 모델이라고 할 수 있고 이러한 불확실성은 정확한 SOC를 추정하는데 어려움을 준다[14-22].

본 논문에서는 모델의 불확실성을 갖는 RC 배터리 모델의 SOC를 추정하기 위한 강인한 고이득 관측기를 설계한다. 2장에서는 위와 같이 불확실성을 갖게 되는 모델의 정확한 SOC 추정을 위해서 RC 배터리 모델을 설계하고 설계된 모델에 불확실성을 추가하여 불확실한 모델로 가정한다. 그리고 3장에서는 정확한 SOC추정을 위해 빠른 응답성을 보이며 불확실성과 외란에 대해 강인한 특성을 갖는 고이득 관측기를 설계한다. 하지만 이러한 고이득 관측기는 높은 이득의 사용에 따른 뒹 현상과 진동이 발생하는 단점이 있으며 이러한 현상의 존재는 정확한 SOC 추정에 좋지 않은 영향을 준다. 그렇기 때문에 4장에서 고이득 관측기의 단점인 뒹 현상과 진동을 극복하기 위해서 포화함수(saturation function)을 이용하는 슬라이딩 모드기법을 사용하여 강인한 고이득 관측기를 설계하고 SOC를 추정시킨다. 마지막으로 5장에서는 제안된 관측기는 일반적인 선형 관측기, 고이득 관측기와 모의실험 결과를 통하여 그 성능을 비교분석 한다.

### 2. 배터리 모델링

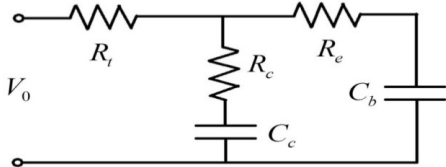


그림 1. ADVISOR의 RC 배터리 모델  
Fig. 1. RC battery model of ADVISOR

그림1은 ADVISOR의 RC 배터리 모델을 나타낸 것이다. 위 그림에서 보는 것처럼 ADVISOR의 RC 배터리 모델은 두 개의 캐패시터( $C_c, C_b$ )와 세 개의 저항( $R_t, R_e, R_c$ )으로 이루어져 있다. 캐패시터  $C_c$ 는 표면 캐패시터(surface capacitor)라 부르며 이것은 작은 캐패시턴스를 갖고 주로 셀의 표면 효과를 나타낸다. 캐패시터  $C_b$ 는 대용량 캐패시터(Bulk Capacitor)라 부르며 이것은 매우 큰 캐패시턴스를 갖고 충전을 화학적으로 저장하기 위한 배터리의 샘플 능력을 나타낸다. SOC는 대용량 캐패시터의 전압에 의해 결정될 수 있다. 저항  $R_t, R_e$ 와  $R_c$ 는 각각 터미널 저항, 종단저항 그리고 캐패시터 저항이다.

배터리의 동역학은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_b = \frac{-V_b}{C_b(R_b + R_c)} + \frac{V_c}{C_b(R_e + R_c)} - \frac{R_c}{C_b(R_e + R_c)} I \quad (1)$$

$$\dot{V}_c = \frac{V_b}{C_c(R_e + R_c)} - \frac{V_c}{C_c(R_e + R_c)} - \frac{R_c}{C_c(R_e + R_c)} I \quad (2)$$

그리고 식(1)과 (2)는 아래와 같이 상태공간표현법으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

$$y = Cx + Du \quad (4)$$

여기서  $x \in R^2 = [V_b \ V_c]^T$ 는 상태벡터이고  $u \in R^2 = [I]$ 는 입력벡터, 그리고  $A \in R^{2 \times 2}, B \in R^{1 \times 2}, C \in R^{2 \times 1}, D \in R^2$ 은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_c + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_c + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_c + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_c + R_c)} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_c + R_c)} \\ -R_e \\ \frac{R_c}{C_c(R_c + R_c)} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} -R_t - \frac{-R_c R_c}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix}$$

$V_b$ 와  $V_c$ 는 각각 대용량 캐패시터의 전압과 표면 캐패시터의 전압이며  $V_o$ 와  $I$ 는 각각 출력전압과 전류를 의미하고 능동 전류는 방전을 의미한다.

### 3. 고이득 관측기 설계

3장에서는 고이득 관측기의 설계에 대하여 설명한다. 고이득 관측기는 비선형 시스템의 모델 불확실성에 강인하며 빠른 과도응답 성능을 가짐으로써 관측기의 실용성을 가져온다.

우선 관측가능 여부를 판단하기 위해 가관측행렬의 선형 독립을 알아본다.

$$Q = [C \ CA \ CA^2]^T$$

$Q$ 는 가관측행렬이다. 여기서  $A$ 와  $C$ 는 각각 식(3)과 식(4)의 시스템행렬과 출력행렬이며 이 가관측행렬이 모두 선형 독립이라는 조건이 성립하면 관측이 가능하며 비로서 관측기를 설계할 수 있다. 고이득 관측기의 구조는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (5)$$

$$y = C\hat{x} \quad (6)$$

여기서  $L = E[L_1 \ L_2 \ \dots \ L_n]^T$ 는 관측이득행렬이다.

$$E = \begin{bmatrix} \frac{1}{\epsilon} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\epsilon^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\epsilon^n} \end{bmatrix} \in R^{n \times n} \quad (7)$$

고이득 관측기의 장점을 확인하기 위해 다음과 같은 2차 비선형 시스템을 고려하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\phi(x, u) \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서  $x = [x_1 \ x_2]^T$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $B = [0 \ 1]^T$  그리고  $\phi(x, u)$ 는 불확실한 비선형 함수이며 관측기 이득은  $H = [h_1 \ h_2]^T$ 이고 오차방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -h_1 & 1 \\ -h_2 & 0 \end{bmatrix} e + B\delta(x, \hat{x}, u) \tag{9}$$

여기서  $\delta(x, \hat{x}, u) = \phi(x, u) - \phi(\hat{x}, u)$ 는 외란이며  $\phi_0(x, u)$ 는  $\phi(x, u)$ 의 공칭 모델이다. 그리고 오차 수렴을 위한  $H$ 는 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1}{\epsilon} & \frac{\alpha_2}{\epsilon} \end{bmatrix} \tag{10}$$

또한 고이득 관측기의 외란 제거 특성은  $\eta_1 = \frac{e_1}{\eta}$ ,  $\eta_2 = e_2$  로의 대등한 변환에 의해 볼 수 있으며 이 새로운 변수로 다시 오차방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\epsilon \dot{\eta} = \begin{bmatrix} -h_1 & 1 \\ -h_2 & 0 \end{bmatrix} \eta + B\epsilon\delta(x, \hat{x}, u) \tag{11}$$

이 방정식은  $\epsilon$ 의 감소가 외란을 줄어들키게 하는 것을 명확하게 보여주고 있다. 또한 오차 수렴속도가 증가하는 것을 보여준다. 하지만 이러한 고이득 관측기는 높은 이득으로 생기는 톱 현상과 오차를 빠르게 극복하려는 성질에 의해서 생기는 진동의 문제를 가지고 있다. 따라서 이러한 4장에서는 문제점을 극복하기 위해 강인한 고이득 관측기를 설계한다.

#### 4. 강인한 고이득 관측기 설계

고이득 관측기는 빠른 상태추정과 외란에 대한 강인성이 좋은 장점이 있지만 높은 이득에 의하여 나타나는 고이득 관측기 고유의 문제인 톱 현상과 진동을 발생시키는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점은 정확한 SOC값을 추정하는데 방해요소로 작용한다. 또한, 배터리의 등가회로로 사용되는 RC 배터리 모델이 갖는 모델 불확실성도 SOC 추정의 정확도에 영향을 준다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 강인한 고이득 관측기를 제안하고 있으며, 본 절에서는 설계과정을 설명한다. 우선 RC배터리 모델 기반 배터리 셀의 비선형 동역학식을 다음과 같이 쓴다.

$$\dot{x}(t) = (A(x, t) + \Delta A(x, t))x(t) + (B + \Delta B(t, x, u))u + f(t, x, u) \tag{12}$$

여기서  $A(x, t)$ 와  $B$ 는 선형화된 식이다. 그리고 위의 식이 선형화 후 불확실성과 잡음이 정합조건을 만족한다고 가정하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta A(x, t) &= Bh(t, x, u) \\ \Delta B(t, x, u) &= Bw(t, x, u) \\ f(t, x, u) &= Bd(t, x, u) \end{aligned}$$

그러면 아래와 같이 식을 다시 정리할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu + B(h(t, x, u)x(t) + w(t, x, u) + d(t, x, u))$$

그리고  $B(h(t, x, u)x(t) + w(t, x, u) + d(t, x, u)) \rightarrow f(t)$ 로 놓고 우리는 다음과 같이 간략하게 상태공간 방정식을 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu + f(t) \tag{13}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{14}$$

여기서  $f(t)$ 는 시간에 따라 변하는 불규칙 외란인 불확실성을 갖는 함수이며 모델링 오차이다.

관측기를 설계하는 것은 두 모델간의 오차를 0으로 만드는 것으로 관측기의 상태를  $\bar{x}(t)$ , 출력을  $\bar{y} = C\bar{x}$ 로 놓으면 추정오차는  $\tilde{x}(t) := x(t) - \bar{x}(t)$ 과 같고 강인한 고이득 관측기의 상태공간 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + Bu + H(y - \bar{y}) + h \text{sat}(y - \bar{y}) \tag{15}$$

$$\bar{y}(t) = C\bar{x}(t) \tag{16}$$

여기서  $H$ 는 고이득 관측기의 관측이득이며  $h$ 는 스위칭 이득이 되고 이러한 스위칭 이득은 충분히 큰 값을 갖는다. 그리고 두 시스템사이의 오차를 0으로 만들어주기 위해 식 (8), (9)와 식(10), (11)을 가지고 오차방정식을 다음과 같이 쓴다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= A\tilde{x}(t) - HC\tilde{x} + f(t) - h \text{sat}(y - \bar{y}) \\ &= (A - HC)\tilde{x} + f(t) - h \text{sat}(y - \bar{y}) \end{aligned} \tag{17}$$

$$y_e(t) = C(x(t) - \bar{x}(t)) = C\tilde{x}(t) \tag{18}$$

또한 리아푸노프 방정식은 다음과 같다.

$$P(A - HC) + (A - HC)^T P = -Q \tag{19}$$

여기서 행렬  $Q$ 와  $P$ 는 실 대칭 양 한정이며 리아푸노프 대 표함수를 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$V(\tilde{x}) = \tilde{x}^T P \tilde{x} \tag{20}$$

그리고 나서

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{\tilde{x}}^T P \tilde{x} \\ &= \tilde{x}^T ((A-HC)P + P(A-HC)^T) \tilde{x} \\ &\quad + (f-h \text{sat}(y_e)) \tilde{P} \tilde{x} + \tilde{x}^T P (f-h \text{sat}(y_e)) \\ &= -\tilde{x}^T Q \tilde{x} + 2\tilde{P} \tilde{x} (f-h \text{sat}(y_e)) \end{aligned} \quad (21)$$

식(16)의 우변에 첫 번째 항은 음수가 되지만 두 번째 항  $2\tilde{P} \tilde{x} (f-h \text{sat}(y_e))$ 를 음수로 만족시켜야 한다. 이를 만족시키기 위하여 불확실성을 나타내는 함수  $f$ 의 크기를 안다는 가정하에 스위칭 이득  $h$  값을 설정하여  $\dot{V}(x)$ 가 음의 한정 이도록 한다. 그렇다면 아래와 같은 조건을 만족시킨다.

$$\dot{V}(x) < 0 \quad (22)$$

$$\tilde{x}(t)|_{t \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (23)$$

### 5. 모의실험

RC 배터리 모델의 저항과 캐패시터의 값이 다음과 같을 때 열 여섯 개의 셀로 구성된 리튬이온 배터리 팩의 SOC 추정 실험을 진행한다. 추정값과 실제값을 비교하기 위해 실제 SOC값은 HPPC(Hybrid Pulse Power Characteristics)방법을 이용하여 측정하였다. [1]

$$\begin{aligned} C_c &= 65.04F \\ C_b &= 52360F \\ R_e &= 0.0091F \\ R_c &= 0.0091F \\ R_t &= 0.00445F \end{aligned}$$

각 전지는 3.6V의 공칭 전압과 105Ah의 공칭 용량으로 구성되어 있다. 또한 모의 실험에서 실제 배터리를 묘사하기 위해서 RC 배터리 모델에 백색잡음을 추가하여 실제 배터리와 RC 배터리 모델 사이의 불확실성으로 가정하였다.

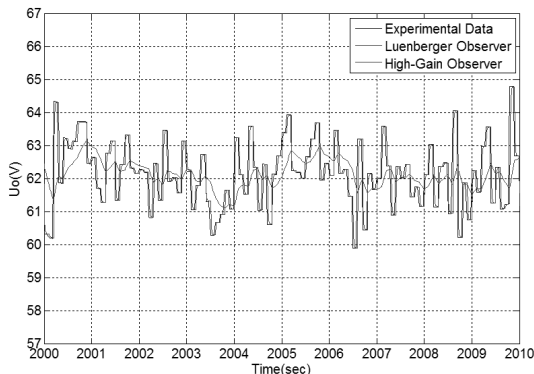
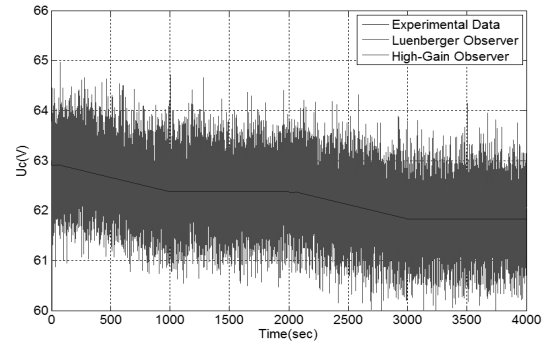


그림 2. Luenberger 관측기와 고이득 관측기의 시스템 출력( $\epsilon = 0.1$ )

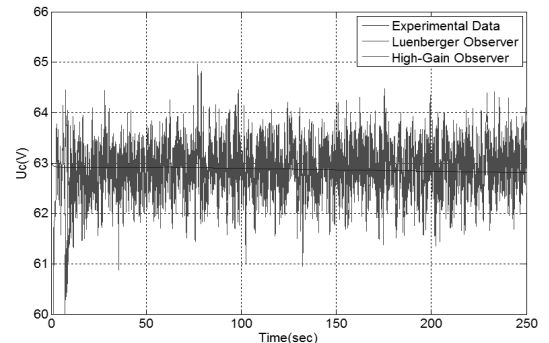
Fig. 2. System output of a Luenberger observer and a high-gain observer( $\epsilon = 0.1$ )

그림 2는  $\epsilon$ 을 0.1로 설정했을 경우 Luenberger 관측기와

고이득 관측기의 시스템 출력을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Luenberger 관측기는 실험 데이터를 잘 추정하지 못하는 반면 고이득 관측기의 경우 백색잡음의 영향에도 불구하고 실험 데이터를 잘 추정해 나아가는 것을 확인할 수 있다. 위 그림으로 고이득 관측기가 제어 대상에 불확실성이 존재하거나 외란이 발생하였을 경우, 그에 따른 강인성을 갖고 Luenberger 관측기보다 더 뛰어난 성능을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 3은 대용량 캐패시터에서의 전압 추정 결과를 보여준다. 백색잡음을 추가함으로써 Luenberger 관측기와 고이득 관측기 모두 심한 진동현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 이로 인해 실험 데이터를 제대로 추정해 나가지 못하는 것을 확인할 수 있다.



(a)4000sec



(b)250sec

그림 3. 대용량 캐패시터의 전압 추정( $\epsilon = 0.1$ )  
Fig. 3. Voltage estimation of a bulk capacitor( $\epsilon = 0.1$ )

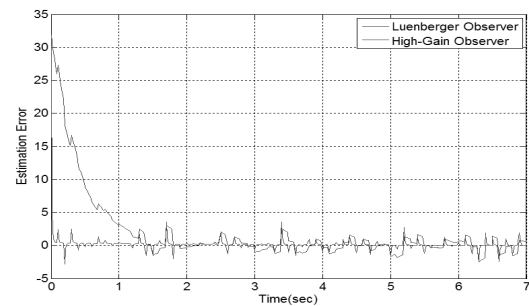


그림 4. Luenberger 관측기와 고이득 관측기의 추정오차( $\epsilon = 0.1$ )

Fig. 4. Estimation error of a Luenberger observer and a high-gain observer( $\epsilon = 0.1$ )

그림4에서는 Luenberger 관측기와 고이득 관측기의 추정오차를 비교하였다. 고이득 관측기는 Luenberger 관측기보다 더 빠르게 0으로 수렴하였고 외란에 의한 진동을 상당히 감소시켰다고 볼 수 있다. 이것은  $\epsilon$ 의 크기에 따라 외란의 영향이 작아지고 오차를 빠르게 감소시키는 고이득 관측기의 특성을 확인 할 수 있다.

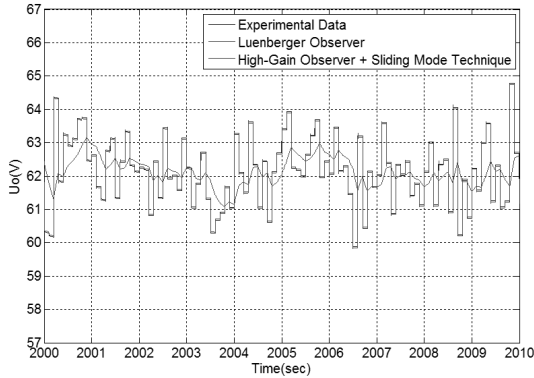
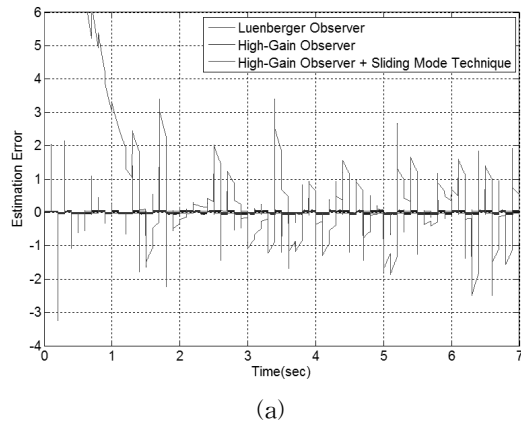
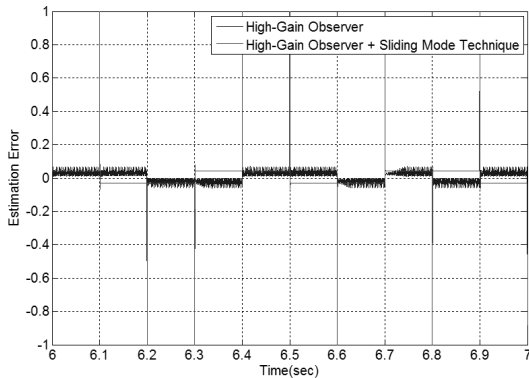


그림 5. Luenberger 관측기와 강인한 고이득 관측기의 시스템 출력( $\epsilon = 0.01$ )

Fig. 5. System output of a Luenberger observer and the proposed estimator( $\epsilon = 0.01$ )



(a)



(b)

그림 6. 고이득 관측기와 강인한 고이득 관측기의 추정오차( $\epsilon = 0.01$ )

Fig. 6. Estimation error of a high-gain observer and the proposed estimator( $\epsilon = 0.01$ )

그림 5는 본 논문에서 제안한 강인한 고이득 관측기를 Luenberger 관측기와 비교한 것이다. 고이득 관측기의  $\epsilon$ 의 값이 0.01일 때와 동일하게 보여진다. 그러나, 그림 6과 같이 추정오차를 확대하여 비교해 보면, 고이득 관측기의 높은 이득으로 발생하는 문제점인 진동이 제안한 방법인 강인한 고이득 관측기에서는 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 오차를 빠르게 극복하려는 특성에 의해 발생하는 퓌 현상은 여전히 존재하고 있음을 보인다.

### 5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 모델의 불확실성을 갖는 RC 배터리 모델의 SOC를 추정하기 위한 강인한 고이득 관측기를 제안하였다. RC 배터리 모델은 실제 배터리 셀을 간소화하여 표기한 것으로, 정확한 SOC를 추정하기 위해서는 모델의 불확실성을 고려해야 하기 때문에 이를 고려한 강인성을 갖는 SOC 추정기를 제안하였다. 제안한 관측기는 고이득 관측기 기반의 구조를 가지고 있지만, 고이득 관측기 자체가 갖고 있는 높은 이득으로 인해 발생하는 퓌 현상과 진동을 보완하기 위한 슬라이딩 모드 스위칭 기법을 적용하여 퓌 현상 제거와 진동을 줄이는데 성공하였음을 모의실험을 통하여 그 성능을 확인하였다. 그러나, 퓌 현상에 대해서는 잔존하는 현상에 대한 보다 심도있는 연구가 필요하다.

### References

- [1] S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications." *J. Power Sources*, pp. 113-120, 2001.
- [2] J.H. Aylor, B.W. Johnson, "A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs." *IEEE Trans. Ind. Electron*, pp. 398-409, 1992.
- [3] T.H. Liu, D.F. Chen, C.C. Fang, "Design and implementation of a battery charger with a state-of-charge estimator." *Int. J. Electron*, pp. 211-226, 2000
- [4] Y. adrc, Y. zkazan, "Microcontroller-based on-line state-of-charge estimator for sealed lead-acid batteries." *J. Power Sources*, pp. 330-342, 2004.
- [5] B.S. Bhangu, P. Bentley, "D.A. Stone, C.M. Bingham, Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles." *IEEE Trans. Veh. Tech*, pp. 783-794, 2005.
- [6] H. He, R. Xiong, J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach." *Energies*, pp. 582-598, 2011.
- [7] X. Hu, F. Sun, Y. Zou, "Estimation of state of charge of a lithium-ion battery pack for electric vehicles using an adaptive luenberger observer." *Energies*, pp. 1586-1603, 2010.
- [8] H. Chaoui, P. Sicard, "Accurate state of charge estimation for batteries using a reduced-order observer." *IEEE Int.l Con*, pp. 39-43, 2011.
- [9] J. Ciasson, B. Vairamohan, "stimating the state of

charge of a battery." *IEEE Trans. Con. Sys. Technology*, pp. 465-470, 2005.

[10] F. Zhang, G. Liu and L. Fang, "A battery state of charge estimation method using sliding mode observer." *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, Jun. 2008.

[11] F. Zhang and G. Liu, "Estimation of battery state of charge with  $H_\infty$  observer: applied to a robot for inspecting power transmission lines." *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 59, no 2, pp. 1086-1095, shenyang, China, Feb. 2012.

[12] K. Jang, G.-B. Chung, "A SOC Estimation using Kalman Filter for Lithium-Polymer Battery" *The Trans. of Korean Inst. of Power Electronics*, pp.222-229, 2012.

[13] K. Wipke, ADVISOR 3.2 Documentation, NREL: Golden, CO, USA, 2001.

[14] J. J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.

[15] H. J. Marquez, *NONLINEAR CONTROL SYSTEMS*, WILY, 2003.

[16] H.K. Khalil, *Nonlinear Systems 3rd ed*, Prentice Hall, 2002.

[17] C.-T. Chen, *Linear System Theory and Design 3rd ed*, Oxford University Press, 1999.

[18] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, WILY, 2008.

[19] H.-S. Jung, *MATLAB control system analysis and design*, Ajin, 2008.

[20] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Scitech, 2002.

[21] S.-H. Yoo, "A Nonlinear Observer Design for Estimating State-of-Charge of Lithium Polymer Battery", *J. of Korean Inst. of Intelligent Syst*, vol.22, no.3, pp. 300-304, 2012

[22] S.-H. Yoo, W. Xuedong, "A Fuzzy  $H_\infty$  Filter Design for State of Charge Estimation", *J. of Korean Inst. of Intelligent Syst*, vol.20, no.2, pp. 214-219, 2010

## 저 자 소 개



### 이 종 연 (Jong-Yeon Lee)

2011년: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 공학사  
2011년~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학과 석사과정 재학중

관심분야: 비선형제어, 퍼지제어, 적응제어, 로봇비전  
Phone : +82-41-521-9529  
E-mail : leejy@kongju.ac.kr



### 김원호 (Wonho Kim)

1985년: 경북대 전자공학 학사  
1987년: 경북대 전자공학 석사  
1999년: 충남대 전자공학 박사  
1989년 2월~1999년 8월:  
한국전자통신연구원 선임연구원  
1999년 8월~현재: 국립공주대학교  
전기전자제어공학부 교수

관심분야: 영상 및 통신 신호처리, 지능형영상감시, 멀티미디어위성통신  
Phone : +82-41-521-9177  
E-mail : whkim@kongju.ac.kr



### 현창호 (Chang-Ho Hyun)

1999년: 광운대학교 제어계측공학과 공학사  
2002년: 연세대학교 전기전자공학과 공학석사  
2008년: 연세대학교 전기전자공학과 공학박사

2008년 3월~2009년 8월: 삼성전자 책임연구원  
2009년~현재: 국립공주대학교 전기전자제어공학부 교수

관심분야: 퍼지제어, 비선형제어, 퍼지시스템, 지능로봇, 지능형자동차  
Phone : +82-41-521-9168  
E-mail : hyunch@kongju.ac.kr