

전류적산법과 OCV 방법을 결합한 Li-Ion 배터리의 충전상태 추정

(State of Charge Estimation of Li-Ion Battery Based on CIM
and OCV Using Extended Kalman Filter)

박정호* · 차왕철 · 조옥래 · 김재철**

(Joung-Ho Park · Wang-Cheol Cha · Uk-Rae Cho · Jae-Chul Kim)

Abstract

The Estimation of State of Charge(SOC) for batteries is an important aspect of a Battery Management System(BMS). A method for estimating the SOC is proposed in order to overcome the individual disadvantages of the current integral and Open Circuit Voltage(OCV) estimation methods by combining them using Extended Kalman filter(EKF). The non-linear characteristics of the Li-Ion RC battery model used in this study is also solved through EKF. The proposed method is simulated in a Matlab environment with a Li-Ion Kokam battery (3.7V, 1,500mAh). Results showed that there is an improvement in the estimation error when using the proposed model compared to the conventional current integral method.

Key Words : Li-Ion Battery, State of Charge, Open Circuit Voltage, Current Integral Method, Extended Kalman Filter, Parameter Tracking

1. 서 론

최근 화석 에너지의 고갈과 탄소배출로 인한 환경오염 문제를 해결하기 위해 친환경적인 에너지를 활용

* 주저자 : 송실대학교 전기공학과 박사과정

** 교신저자 : 송실대학교 전기공학과 교수

* Main author : Doctor course, Department of Electrical Engineering, Soongsil University

** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering, Soongsil University

Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2014년 8월 25일

1차심사 : 2014년 8월 29일

심사완료 : 2014년 9월 29일

하는 전력설비가 요구되고 있다. 그 중 배터리는 생산된 에너지를 저장하고 활용하기 위한 효과적인 보조 전력으로 주목 받고 있으며, 전력설비에 배터리를 활용하는 다양한 연구가 진행되고 있다[1-3].

특히 에너지 저장장치에 많이 사용되는 리튬 이온 배터리는 전기 에너지 저장을 위해 높은 에너지 밀도와 자기방전이 작다는 장점을 가지고 있으며, 방전 시 전압 변화가 적은 특성을 가지고 있어 전력설비에 적용이 용이하다. 하지만 충전특성상 4.2V의 전압을 요구하며 과충전 시 배터리 폭발이 발생할 수 있는 위험이 있기 때문에 과충전 문제를 해결하기 위한 리튬 이온 배터리 충전상태 파악이 중요한 요소로 대두되고 있다[4].

현재 배터리의 충전상태(SOC : State of Charge)를 추정하는 기존의 방식으로 개방회로 전압(OCV : Open Circuit Voltage)방식과 전류적산법(CIM : Current Integral Method)이 주로 사용되고 있다[5-6]. OCV방법을 이용한 잔존용량 추정은 Lookup Table (LUT)을 이용하여 SOC를 쉽게 측정할 수 있는 장점을 가진다[7]. 하지만 OCV 방식은 측정 전압과 잔존용량이 선형성을 가지고 있다는 가정이 전제되며, 배터리의 내부 상태가 안정화가 되었을 때 사용할 수 있기 때문에 실시간 SOC에 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다[8]. 배터리로 유입 및 유출되는 전류의 양을 측정하여 잔존용량을 추정하는 방법으로 간단한 알고리즘을 이용하여 실시간으로 사용이 가능하며 비교적 정확하다는 장점을 가진다[9]. 하지만 초기 SOC의 정확성에 따라 추정 신뢰성에 영향을 받고 전류 측정 오차 누적에 의하여 시간의 변화에 따라 SOC 추정 오차가 커지는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 SOC 추정 방식의 단점을 극복하고 정확한 SOC추정이 가능하도록 개방회로 전압 방법과 전류적산법을 결합한 방법을 제안한다. 확장 칼만 필터(EKF : Extended Kalman Filter)를 도입하여 개방회로 전압에서 사용하는 LUT를 정확하게 작성하며, 이를 기반으로 SOC를 추정하여 전류적산법의 정확성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

제안한 방법을 적용하여 정확한 SOC 추정이 가능하며, 다양한 전력보조 시스템을 요구하는 분야에 적용이 증가하고 있다.

2. RC 배터리 모델 선정 및 파라미터 분석

본 연구에서 배터리 잔존용량을 추정하기 위해 적용한 배터리 모델은 RC 배터리로 그림 1과 같다[10].

RC 배터리 모델은 SAFT Battery Company가 설계한 모델로서 두 개의 커패시터(C_{bulk} , $C_{surface}$)와 세 개의 저항(R_t , R_s , R_e)으로 구성된다. 그림 1의 파라미터는 다음과 같이 정의한다.

$C_{surface}$ 표면 커패시터(Surface Capacitor)

C_{bulk} 벌크 커패시터(Bulk Capacitor)
 R_t 단자저항(Terminal Resistance)
 R_s 표면저항(Surface Resistance)
 R_e 엔드저항(End Resistance)
 V_{Cb} , V_{Cs} , V_o 각 커패시터 전압, 단자전압

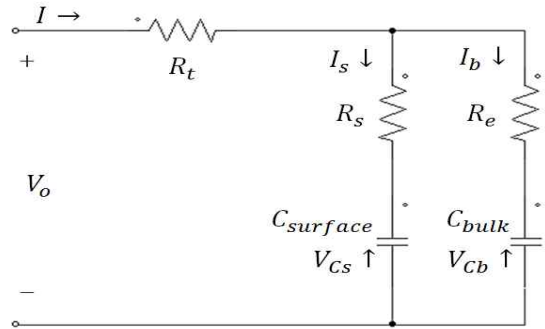


그림 1. RC 배터리 모델
 Fig. 1. RC Battery model

RC 배터리 모델의 내부 파라미터 계산식은 다음과 같다[5].

$$\dot{V}_{Cb} = -\frac{V_{Cb}}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{V_{Cs}}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{I R_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{Cs} = -\frac{V_{Cs}}{C_{surface}(R_e + R_s)} + \frac{V_{Cb}}{C_{surface}(R_e + R_s)} + \frac{I R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)} \quad (2)$$

$$\dot{V}_o = \left[-\frac{1}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)} \right] V_{Cb} + \left[\frac{1}{C_{bulk}(R_e + R_s)} - \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)} \right] V_o + \alpha I \quad (3)$$

where

$$\alpha = \frac{R_e + R_t}{C_{surface}(R_e + R_s)} - \frac{R_t}{C_{bulk}(R_e + R_s)}$$

여기에서 내부 저항 R_t , R_e , R_s 을 모델의 내부 상태

행렬에 포함하면 배터리 모델은 최종 6차 시스템이 된다. 본 연구에서 측정값은 단자 전압(V_o)과 입출력 전류(I)이며, EKF를 적용하여 추정하는 파라미터는 OCV(V_{Cb})이다. 즉 V_{Cb} 를 추정하여 SOC의 LUT를 작성하는데 적용된다. OCV 방법에서는 정확한 LUT를 기반으로 충전상태를 추정해야만 정확한 상태를 획득할 수 있기 때문이다.

3. SOC 추정 알고리즘

본 연구에서 제안한 방법의 과정을 그림 2에 나타내었다. 선정된 배터리 모델의 초기 파라미터를 유도 한 후 그 값을 적용하여 EKF를 통해 LUT 작성을 위한 V_{Cb} 값을 추정하는 과정을 반복하는 형태이다.

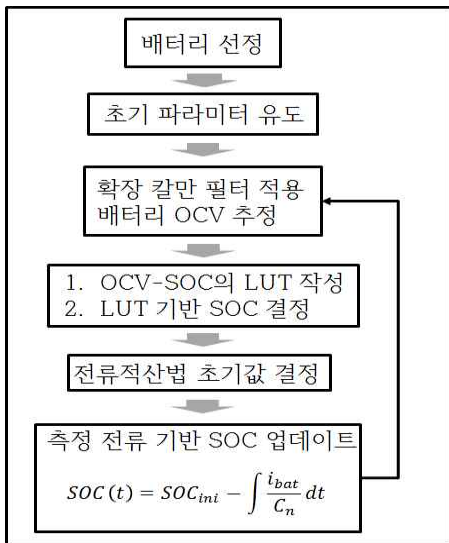


그림 2. SOC 추정 도식도
Fig. 2. Flow chart of SOC estimation

3.1 확장 칼만필터(EKF)

6차 배터리 모델은 비선형성을 가지기 때문에 본 연구에서는 비선형적인 모델에 적용이 가능하고 높은 추정능력을 보이는 EKF를 적용하였다. 비선형 모델에서 파라미터를 추정하기 위해서 EKF는 두 단계의 업데이트 과정을 가지며 그림 3과 같은 과정을 거친다 [11].

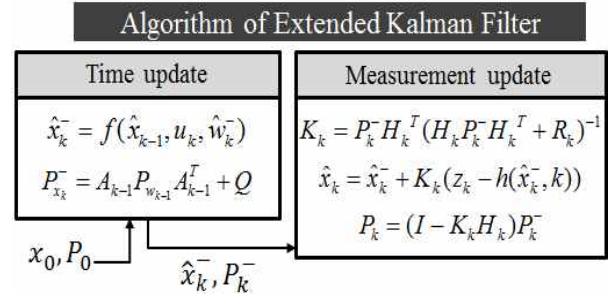


그림 3. 확장 칼만 필터 알고리즘
Fig. 3. Algorithm of extended kalman filter

여기에서 A, H 는 비선형 상태 방정식 행렬 및 측정 방정식 행렬의 Jacobian을 나타낸다.

\hat{x}_k 와 P_k 는 상태의 예측 평균값과 오차 공분산을 나타내며, K_k 는 시간 k 에서의 칼만 이득(Kalman Gain)이다. 행렬 A, H 는 다음과 같이 Jacobian 행렬을 계산함으로써 구할 수 있다.

$$A = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_k}, H = \frac{\partial h(x, k)}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_k} \quad (4)$$

$$x = [V_{Cs} \ V_{Cb} \ V_o \ R_t \ R_s \ R_e]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} & a_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, H = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{C_{bulk}(R_e + R_s)} \\ \frac{R_e}{C_{surface}(R_e + R_s)} \\ \frac{R_e + R_t}{C_{surface}(R_e + R_s)} - \frac{R_t}{C_{bulk}(R_e + R_s)} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기에서

$$a_{11} = -a_{12} = -\frac{1}{C_{bulk}(R_e + R_s)}, a_{15} = a_{16} = \frac{V_{Cs} - V_{Cb}}{C_{bulk}(R_e + R_s)^2}$$

전류적산법과 OCV 방법을 결합한 Li-Ion 배터리의 충전상태 추정

$$a_{21} = -a_{22} = -\frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)},$$

$$a_{25} = a_{26} = \frac{-V_{Cs} + V_{Cb}}{C_{surface}(R_e + R_s)^2}$$

$$a_{31} = -a_{33} = -\frac{1}{C_{bulk}(R_e + R_s)} + \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)}$$

$$a_{35} = -a_{36} = \frac{V_{Cs} - V_o}{C_{bulk}(R_e + R_s)^2} + \frac{V_o - V_{Cs}}{C_{surface}(R_e + R_s)^2}$$

이며, B 는 시스템 제어 행렬이다. 즉 EKF에 적용할 행렬 A, B 를 구하기 위해서는 RC 배터리 모델의 파라미터 값을 선정해야 한다. 이는 배터리 모델과 특성에 따라 달라진다. 3장에서는 본 연구에서 적용한 배터리 모델의 초기 파라미터 선정과 이를 적용하여 제안한 알고리즘을 적용하여 SOC를 추정하는 방법을 기술하였다.

3.2 초기 파라미터 설정

본 논문에서 SOC추정 연구에 적용한 배터리는 Kokam사 리튬이온 배터리 SLB 603870H 모델이며, 스펙은 3.70V와 1,500mAh를 가지고 있다. 각 파라미터를 계산하는 과정은 다음과 같다.

3.2.1 커패시터 C_{bulk}

커패시턴스 용량에 따라 결정되는 C_{bulk} 는 0.5A의 방전 실험을 적용하여 0%와 100%의 OCV 값을 통하여 구할 수 있다.

C_{bulk} 는 식(5)에 기초하여 방전실험을 통해 계산된 값을 적용하면 식(6)과 같이 나타내며, 그 값은 4900F이다.

$$V_{C_{bulk}} = \frac{1}{2} C_{bulk} V^2 = \frac{1}{2} C_{bulk} (V_{100\%SOC}^2 - V_{0\%SOC}^2) \quad (5)$$

여기에서 $V_{C_{bulk}}$ 는 배터리의 Ampsec-용량을 나타낸다.

$$V_{100\%SOC} = 4.28V, \quad V_{0\%SOC} = 3V \text{이다.}$$

C_{bulk} 의 초기값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_{bulk, initial} = \frac{rated(Ampsec) V_{100\%SOC}}{\frac{1}{2}(V_{100\%SOC}^2 - V_{0\%SOC}^2)} \quad (6)$$

3.2.2 커패시터 $C_{surface}$

커패시터 $C_{surface}$ 는 방전 펄스에 대한 출력 전압의 결과를 통해 구할 수 있다, 계산을 위하여 1A를 방전 펄스로 방전하는 시뮬레이션을 수행하였고, $C_{surface}$ 를 계산하기 위해 필요한 변수는 다음과 같다.

$$V_1 = 4.278, \quad V_2 = 4.252, \quad V_3 = 4.262, \quad V_4 = 4.266$$

위 값을 적용한 시정수를 다음과 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$V_{no-load} = V_1 = V_3 + (V_4 - V_3)(1 - e^{1/\tau}) \quad (7)$$

τ 로 정리하여 다시 쓰면,

$$\tau = -\ln\left(1 - \frac{V_4 - V_3}{V_1 - V_3}\right) = 0.2876s \quad (8)$$

$C_{surface}$ 를 포함한 시정수 계산식은 다음과 같다.

$$\tau = (R_s + R_e) / C_{surface} \quad (9)$$

초기 $C_{surface}$ 값은 식 (9)을 정리하면 식 (10)과 같다.

$$C_{surface-initial} = \frac{\tau}{R_s + R_e} \quad (10)$$

3.2.3 배터리 저항 R_t, R_s, R_e

배터리의 초기 내부 저항은 0.25Ω 이며, R_e, R_s 가 등가이고 전체 저항의 80%로 가정하면, 식 (11)에 적용하여 계산이 가능하다.

$$0.25 = R_t + \left[\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_s} \right]^{-1} \quad (11)$$

계산된 배터리 파라미터 초기값을 표 1에 나타내었다.

표 1. 배터리 모델의 초기 파라미터 값
Table 1. Parameter values of battery model

Para.	C_{bulk}	$C_{surface}$	$R_e(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$R_t(\Omega)$
Val.	4900F	0.45F	0.375	0.375	0.0625

3.3 Lookup Table

3.1절에서 설명한 확장 칼만 필터에 표 1에서 계산된 값을 적용하여 표 2와 같은 결과를 획득하였다. 이를 SOC 추정 알고리즘에 적용한다.

표 2. OCV-SOC의 Lookup Table
Table 2. LUT for OCV-SOC Curve

SOC (%)	OCV (V)	SOC (%)	OCV (V)
100	4.3230	50	3.9613
95	4.0000	45	3.9551
90	3.9868	40	3.9474
85	3.9854	35	3.9374
80	3.9822	30	3.9242
75	3.9799	25	3.9056
70	3.9774	20	3.8778
65	3.9742	15	3.8314
60	3.9706	10	3.7385
55	3.9664	5	3.4600

3.4 SOC 추정 알고리즘

본 논문에서 제안한 SOC 추정 알고리즘은 그림 4와 같으며, 확장 칼만 필터를 적용하여 OCV를 추정하고 그에 따른 SOC를 결정한 후 이를 적용하여 전류적산법 초기 값을 결정한다.

그림 4에서 SOC_{ini} 값은 초기 SOC 값을 나타내며, 초기 배터리 모델에 표 2를 적용하여 추정된 값이다. η 는 배터리의 쿨롬 효율로 방전시 $\eta=1$ 이며, 충전시에는 $0 \leq \eta \leq 1$ 이다. C_n 은 배터리 용량이다.

제안하는 SOC 추정 알고리즘은 기존 전류적산법의 단점인 초기 SOC값에 따라 정확도 오차가 커지는 점과 입출력 전류의 오차누적으로 인하여 발생하는 추정 오차를 개선할 수 있는 장점이 있다. SOC_{ini} 값은

OCV-LUT을 통하여 정확한 값으로 결정되고, 이후 측정되는 입출력전류에 의존하여 SOC값이 업데이트 된다.

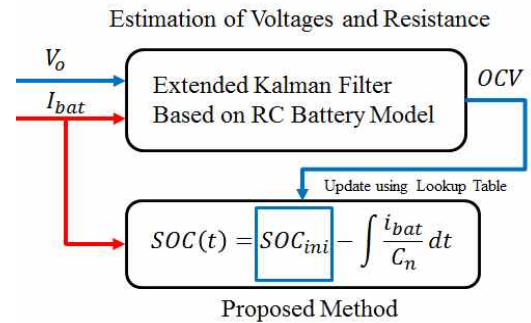


그림 4. 제안된 SOC 추정기법
Fig. 4. Proposed method for SOC estimation

4. 시뮬레이션 및 결과

제안한 SOC 추정 모델의 성능분석 및 신뢰성 확인을 위하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 구성을 위한 배터리 파라미터는 표 1의 값을 적용하였고, SOC 추정을 위한 방전 전류는 0.5A이다. 방전 전류는 펄스 형이며, 일정한 시간간격으로 배터리를 방전한다.

SOC 추정 시뮬레이션은 선정된 배터리 모델의 특성을 기반으로 제안한 SOC 추정 알고리즘을 적용하였으며, SOC 추정 결과는 그림 5에 나타내었다. 성능 분석과 신뢰성 확인을 위하여 기존 전류적산법을 동시에 수행하여 결과를 나타내었다. 결과에 따라 제안한 SOC 추정 결과와 비교연구 오차 결과를 나타내었다.

그림 5에서 확대 그래프의 빨간 점선은 기존 전류적산법의 SOC 추정 결과이며, 파란 점선은 제안된 SOC 추정 결과를 나타낸다. 6,000초 정도의 시간의 변화에서 전류적산법 측정전류 오차 누적을 통하여 SOC 추정 오차가 크지만 제안한 방법은 정확히 추정하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5, 6의 결과를 통해 기존 전류적산법의 단점인 SOC 추정오차를 개선이 가능함을 확인하였다. 이는 확장 칼만 필터를 활용하여 정확한 OCV를 추정하고 그에 따라 정확한 LUT를 작성하여,

초기 SOC 값을 결정함으로써 정확한 SOC를 추정하였다.

위 결과를 수치적으로 확인하기 위하여 Root Mean Square Error(RMSE)를 계산하였고, 그 결과 기존 전류적산법의 SOC 추정기법보다 OCV와 결합하여 표 3에 제안한 방법이 약 1.95% (RMSE)의 누적오차를 개선하는 결과를 나타내었다. 즉 제안한 방법을 적용하여 배터리 보조 시스템을 구성할 경우 우수한 동작 성능을 보일 것으로 기대된다.

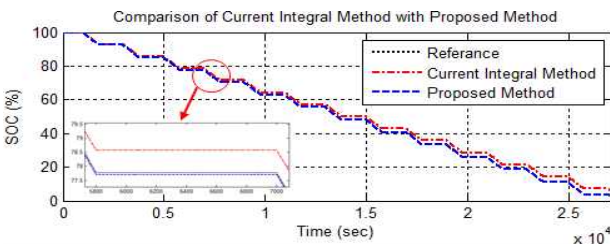


그림 5. SOC 추정결과
Fig. 5. Results of SOC estimation using proposed method

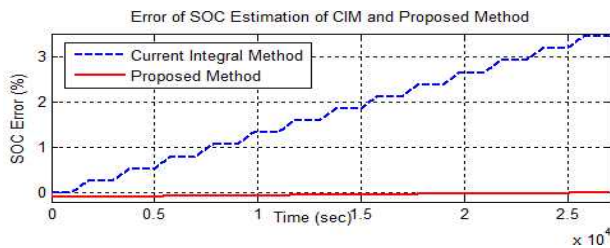


그림 6. SOC 추정오차
Fig. 6. Error of SOC estimation of CIM and proposed method, respectively

표 3. 추정 결과 분석
Table 3. Analysis of SOC estimation results

적용방법	전류적산법(%)	제안한 방법(%)
추정오차	2.0235	0.0588

5. 결 론

본 논문을 통해 기존의 배터리 SOC 추정기법인 전류적산법의 단점을 개선하기 위한 알고리즘을 제안하였다. SOC를 정확하게 추정하기 위하여 확장 칼만 필

터를 도입하였고, 확장 칼만 필터를 적용하여 배터리 출력 전압을 통해 OCV를 추정하였다. 그 추정된 OCV 값에 따라 LUT를 작성함으로써 결과적으로 전류적산법의 단점인 초기 SOC 오차를 개선하여 전체 SOC 추정 성능을 향상시킴을 확인하였다. 제안된 SOC 추정 알고리즘 성능은 시뮬레이션을 통해 확인되었고, 본 알고리즘은 향후 배터리의 정밀한 SOC 추정과 충방전 특성을 감안한 배터리 효율향상 및 수명 연장 알고리즘에 유용하게 적용될 것으로 사료된다.

References

- [1] Kutluay, K., Çadırcı, Y., Özkazanç, Y.S., "A new online state-of charge estimation and monitoring system for sealed lead-acid batteries in telecommunication power supplies," IEEE Trans. Ind. Electron. No. 5 pp. 1315-1327, 2005.
- [2] S.Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, "Methods for State of Charge Determination and Their Applications," Journal of Power Sources, Vol.96, No.1, pp. 113-120, 2001.
- [3] Y. Zhang, C.Y. Wang, X. Tang, "Cycling degradation of an automotive LiFePO4 lithium-ion battery," Journal of Power Sources, Vol. 196, pp. 1513-1520. 2011.
- [4] Mehmoosh Shahriari, Mohammad Farrokhi, "On-line state of health estimation of VRLA batteries using state of charge," IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 1, pp. 191-202, 2013.
- [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. on Vehicular Technology, Vol. 54, No.3, pp.783-794, 2005.
- [6] Sahana Swarup, Sheldon X. -D. Tan, Zao Liu, Hai Wang, Zhigang Hao, Guoyong Shi, "Battery State of Charge Estimation using Adaptive Subspace Identification Method," ASIC (ASICON), 2011 IEEE 9th International Conference on, pp. 25-28, 2011.
- [7] Jung-ho Park, Uk-rae Cho, Wang-cheol Cha, Jae-cheol Kim, "A Study For Large Scale BESS Apply Maintenance On Li-ion SOC Estimation Method" KIEE summer Conference 2014.
- [8] C. S. Moo, K. S. Ng, Y. P. Chen, Y. C. Hsieh, "State-of-Charge Estimation with Open-Circuit-Voltage for Lead-Acid Batteries." Power Conversion Conference - Nagoya, 2007, pp. 758-762. 2007.
- [9] Tomoyuki HIRAI, Akira OHNISHI, Naoto NAGAOKA, Nobutaka MORI, Akihiro AMETANI, Shigeki UMEDA, "Automatic Equivalent-Circuit Estimation System for Lithium-Ion Battery," Universities Power Engineering Conference, 2008, pp.1-5, 2008.

- [10] Hongwen He, Rui Xiong, Jinxin Fan, "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach," *Energies*, Vol.4, pp.582-598, 2011.
- [11] Jihoon Seung, Amir Atiya F., Alexander G. Parlos, Kiltto Chong, "Parameter Estimation for Coupled Tank using Estimate Filtering," *International Journal of Control and Automation*, Vol.6, No.5, pp.91-102, 2013.

◇ 저자소개 ◇



박정호 (朴廷浩)
 1968년 3월 9일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 1992년~ 현재 한국전기안전공사 근무.
 Tel : (02)710-8583
 Fax : (02)817-0780
 E-mail : pjh051i@kesco.or.kr



차왕철 (車旺哲)
 1969년 4월 29일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 1995년~ 현재 국방부 근무.
 Tel : (02)3411-9177
 E-mail : chalsking@hanmail.net



조옥래 (趙昱來)
 1972년 6월 11일생. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 2000년~ 현재 한전KDN 근무.
 Tel : (02)6262-6391
 Fax : (02)6262-6399
 E-mail : ukrae@kdn.com



김재철 (金載哲)
 1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 현재 숭실대학교 전기공학과 교수. 본 학회 회장.
 Tel : (02)817-0647
 Fax : (02)817-0780
 E-mail : jckim@ssu.ac.kr