

대용량 무정전 전원장치를 위한 배터리 모니터링 시스템 Battery Monitoring System for High Capacity Uninterruptible Power Supply

이 형 규*, 김 기 택**★

Hyung-Kyu Lee*, Gi-Taek Kim**★

Abstract

Batteries are being used in ESS, electric vehicles and uninterruptible power backup systems. Lead-acid batteries are the most used batteries for high capacity power back up equipment due to their high reliability and low price advantages. It is very important to estimate the chargeable capacity(SoH), and many algorithms were proposed to estimate the internal resistance of the battery. In this paper, the Battery Monitoring System(BMS) for high capacity uninterruptible power supply for IDC is proposed. A simple algorithm for estimating internal resistance was proposed. An computational block diagram of the proposed signal processing algorithm and BMS system configuration of CPU and analog circuit were shown. The proposed method was proved useful by presenting data examples of application to actual IDC sites.

요 약

배터리는 ESS, 전기자동차 및 무정전 전원 백업 시스템 등의 다양한 분야에서 사용이 증가하고 있다. 납산배터리는 에너지밀도가 낮지만, 신뢰성이 높고 저가격의 이점으로 대용량 전력백업 장비에 가장 많이 사용되는 배터리이다. 배터리의 사용에 따라 노화가 진행되면 충전 가능 용량(SoH)이 줄어들게 되어 상태를 추정하는 것이 매우 중요하며, 배터리의 내부저항으로 SoH를 추정하는 방법을 많이 사용한다. 본 논문에서는 대표적인 대용량 무정전 전원장치인 IDC를 위한 배터리 모니터링 시스템(BMS)을 제안하였다. 내부저항을 측정하는 간단한 알고리즘을 제안하고, BMS 시스템 구성을 위한 CPU 및 아날로그 회로 구성과 신호처리 알고리즘에 대한 연산 블록도를 보였다. 실제 IDC 현장에 적용한 측정결과 사례를 제시하여 제안한 방법의 유용함을 보였다.

Key words : BMS(Battery Monitoring System), Lead-acid battery, Internal resistance, SoH, Equivalent circuit

* Waton Inc.

** Dept. of Electrical & Electronics Eng., Kangwon National University

★ Corresponding author

E-mail : gikim@kangwon.ac.kr, Tel : +82-33-250-6344

※ Acknowledgment

Manuscript received May 12, 2019; revised Jun. 24, 2019; accepted Jun. 25, 2019.

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.

1. 서론

배터리는 ESS(Energy Storage System), 전기자동차 및 무정전 전원(Uninterruptible Power Supply, UPS) 백업 시스템 등의 다양한 분야에서 사용이 증가하고 있다. 밀폐형 납산(Sealed Lead-Acid) 배터리는 에너지밀도가 낮아 부피와 무게가 커지지만, 신뢰성이 높고 저가격의 이점으로 대용량 전력 백업 장비에 가장 많이 사용되는 배터리이다[1], [2].

배터리에서 SoC(State of Charge)는 배터리에 현재 저장되어 사용가능한 충전에너지량을 의미하고,

SoH(State of Health)는 배터리의 충전 가능 용량을 의미한다. 배터리의 경년열화, 성능저하 등 건강 상태를 정확히 식별할 수 없고, 특히 밀폐형 배터리는 비중 등의 특성을 체크할 수 없다. 배터리의 사용에 따라 노화가 진행되면 SoH는 줄어들게 되어 상태를 추정하는 것이 매우 중요하다. 배터리의 SoH는 일부하 방전시험을 통해서 정확히 측정가능하나, 일부하 방전시험은 인력 및 시험경비가 많이 소요될 뿐만 아니라 운전을 중단하고 시험해야 하는 문제가 있다[3], [4].

SoH를 운전중에 추정하는 방법이 많이 제안되어 있으며 가장 대표적인 방법은 배터리의 내부 직렬 저항값을 측정하는 것이다. 배터리 노화에 따라 SoH가 감소하면 내부저항은 증가하게 되고 일반적으로 내부저항이 일정한 값 이상이거나 최초 상태보다 30% 이상 증가하면 배터리 교체를 권고한다[5].

배터리 내부저항을 직접 측정하는 방법은 가능하지 않고, 운전중인 배터리의 전압과 전류를 측정하여 추정하는 방법과 외부에서 전원을 인가하여 전압과 전류 응답으로 구하는 방법이 있다. 운전중인 배터리의 충방전시 전압, 전류 파형에서 과도현상이 나타나고 과도응답으로부터 배터리 내부 상태를 추정하기 위하여 확장칼만필터(Extended Kalman Filter, EKF) 등의 알고리즘을 적용하는 방식들이 제안되어 있다. 외부전원에 의한 방법으로는 한 개 혹은 여러 개의 펄스 형태의 전원이거나 특정주파수를 갖는 AC 전원을 인가해서 응답을 구하는 방법과 주파수를 변화시키면서 응답을 분석해 주파수스펙트럼을 구하는 방법 등이 있다. 이런 방법들은 알고리즘이 매우 복잡하여 실제 적용하기에는 문제가 있어 정확도와 복잡도를 고려해야 한다[5]-[7].

본 논문에서는 IDC(Internet Data Center)의 대용량 무정전 전원장치를 위한 배터리 모니터링 시스템(Battery Monitoring System, BMS)를 제안한다. 내부저항 추정 알고리즘과 이를 구현하기 위한 BMS 시스템의 설계, 구성 및 시험결과를 제시한다.

II. 본론

1. 내부저항 추정

배터리의 전압, 전류 특성을 표현하는 등가회로로 여러 회로가 제안되어 있으며 그중 대표적인 등가회로는 그림 1과 같다[8]. 그림 1에서 배터리 내부전압(Open Circuit Voltage, OCV)와 함께 저항

r 은 내부저항을 나타내고 R 과 C 로 구성된 병렬회로는 전압강하 등 정상상태 특성과 충전과 방전시 과도현상에 관련된 것으로 알려져 있다. 하나의 RC 회로로 구성된 모델이 일반적이며, 여러 단계의 모델을 사용한 등가회로도 제안되어 있다[9]. 내부저항 r 은 배터리의 수명(SoH)과 관련되어 있어 측정해야 하는 저항값이다.

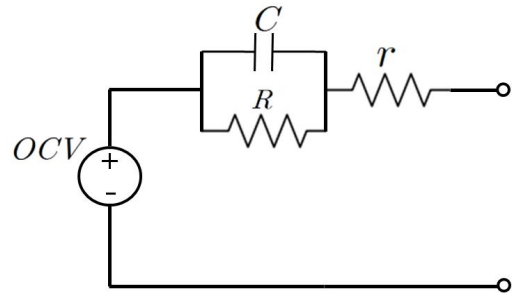


Fig. 1. Battery equivalent circuit
그림 1. 배터리 등가회로

등가회로에 교류를 발생시킬 경우 임피던스는 (1)식으로 표현된다. 납산배터리에서는 C 값이 수-수백[F]으로 매우 커서 $\omega RC \gg 1$ 조건이 만족되면 (2)식과 같이 근사식이 성립하여 RC 직렬회로로 근사화할 수 있다[10].

$$Z = r + \frac{R}{1 + j\omega RC} \tag{1}$$

$$Z = r + \frac{1}{j\omega C} = r - j\frac{1}{\omega C} \tag{2}$$

본 논문에서는 특정주파수를 갖는 교류를 발생하여 전압과 전류 응답의 실효값 $|V|$, $|I|$ 과 위상차 ϕ 를 측정하여 (3)-(6)식과 같이 내부저항을 구할 수 있다.

$$|Z| = \sqrt{r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} = \sqrt{\frac{|V|^2}{|I|^2}} \tag{3}$$

$$|V|^2 = \sum v[n]^2, \quad |I|^2 = \sum i[n]^2 \tag{4}$$

전압과 전류 신호를 입력하여 제곱하여 더한 후 (4)식에 의해 전압, 전류 실효값의 제곱을 구하고 임피던스의 크기 $|Z|$ 를 구하게 된다. ZC_v 와 ZC_i 는 각각 전압과 전류 신호의 제로크로싱(Zero Crossing) 타이밍을 나타내고, T 는 교류신호의 주기를 나타낸다.

$$\phi = \phi_v - \phi_i = \tan^{-1} \frac{1}{\omega r C} = \frac{ZC_v - ZC_i}{T} 2\pi \tag{5}$$

$$r = |Z| \cos\phi \tag{6}$$

교류를 발생하기 위해서는 그림 2(a)와 같이 외부전원을 이용하는 방법과 그림 2(b)와 같이 배터리 자체 전압을 이용하는 방법이 있다. 자체 전압을 사용하면 측정회로가 간단해지는 장점이 있지만, 자체전원이 없는 저항 등을 측정할 경우에는 사용하지 못하고 교류 전류 발생으로 인한 배터리 전압강하가 문제가 될 경우에도 사용하는데 제한이 있다. 본 논문에서는 그림 2(a) 외부전원을 사용하는 방식을 사용하였다. 교류의 주파수는 측정회로의 동작속도, 잡음 그리고 임피던스 범위에 따라 결정한다. 충전회로에서는 60[Hz]의 배수 주파수의 고조파 잡음이 발생하여 이를 피하고 CPU 동작속도를 고려하여 270[Hz] 주파수를 사용한다.

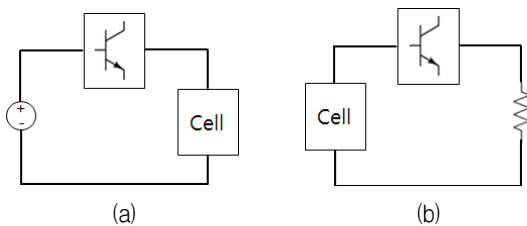


Fig. 2. AC frequency control (a) using external supply (b) using battery supply.

그림 2. 교류 주파수 제어 방식 (a) 외부 전원 (b) 배터리 전원

2. 저항 측정 시스템 구성

무정전 전원장치는 그림 3과 같이 구성된다. 충전기, 배터리 스택 및 부하로 구성되어 있고 배터리에 BMS가 설치된다. 서버와의 통신을 위해 물리계층은 RS-485, CAN, LAN, WLAN 등을 이용하여 인터넷에 연결하며 통신프로토콜은 IDC 관리서버에 맞추어 SNMP, DNP3, Modbus 등을 사용한다.

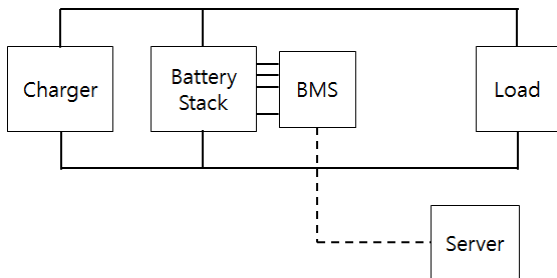


Fig. 3. Uninterruptible power system and BMS.

그림 3. 무정전 전원장치 및 BMS 구성

그림 4는 BMS 구성도를 보여 준다. 직렬연결 배터리 중 측정 대상 배터리는 릴레이에 의해 선택된

다. 선택된 배터리와 외부 저항에 외부 전원과 트랜지스터 제어에 의해 교류가 발생하고, 전압, 전류 응답이 센싱된다. 센싱된 전압과 전류 신호는 아날로그 앰프 회로를 거치고 AD변환기를 통해 CPU 회로로 입력된다. CPU에서는 트랜지스터 제어신호와 릴레이 선택신호를 발생하고 입력된 신호를 이용하여 저항값을 연산하여 서버로 결과를 전송한다. 교류주파수와 AD변환기 샘플링 주파수는 CPU 내부에서 동기되어 적분 연산에서 오차가 발생하지 않게 한다.

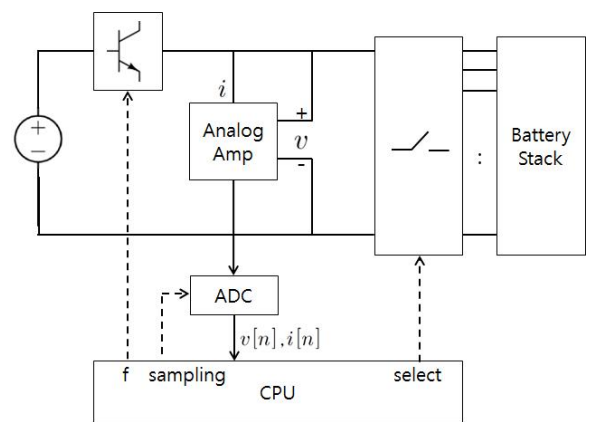


Fig. 4. Block diagram of BMS.

그림 4. BMS 구성도

그림 5는 교류 전압과 전류 응답을 이용하여 내부저항을 구하는 과정을 보이고 있다. 전압, 전류 각각 크기와 전압, 전류 사이의 위상차를 구해야 한다. 선택된 배터리의 그라운드가 제어시스템의 그라운드와 같지 않기 때문에 전압 신호는 절연차동앰프(Isolation Differential Amp)를 사용한다. 발생시킨 교류 주파수 성분의 신호만 통과시키기 위해 대역통과필터(BPF)를 적용하고 있다.

내부저항은 수 [mΩ]이기 때문에 교류주파수를 갖는 전압신호는 매우 작은 크기의 신호이기 때문에 1,000~2,000배 정도의 큰 계인을 갖는 앰프(K)를 연결한 후 전류와 전압 신호를 AD변환기를 이용하여 입력하게 된다. 전류신호는 CT를 이용하여 입력하며, 전압과 마찬가지로 대역통과필터를 사용한다. 전압과 전류의 크기는 AD변환기 입력을 절대값을 취해 일정 주기 동안 적분한 값을 사용하며, 위상차는 신호의 Zero Crossing 시점의 차이를 타이머로 측정한다. 잡음에 의한 영향을 최소화하기 위하여 27주기 평균을 사용하여 측정시간은 100[msec] 소요된다. 270[Hz] 신호의 주기는 3.7[msec]이고,

한 주기에 20번 정도 파형을 샘플링하여 ADC 샘플링 주파수는 5[kHz] 정도이다. 전압, 전류 크기와 위상을 구한 후 (3), (4)식에 의해 저항값을 구한다.

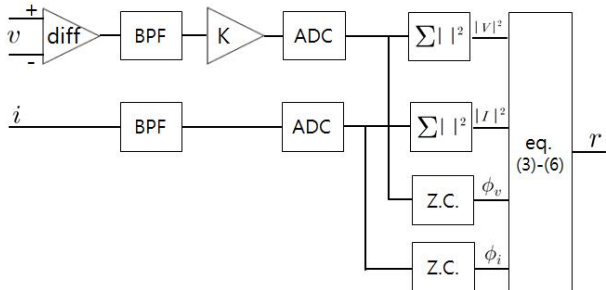


Fig. 5. Algorithm of internal resistance.
그림 5. 내부저항 추정 알고리즘

3. BMS 시스템 구성

그림 6은 IDC 센터에 설치된 BMS를 보여주고 있다. 설치 대상 IDC 센터는 2[V], 800[AH] 배터리 192개를 직렬로 연결하여 384[V], 800[AH] 용량으로 구성된 예를 보여준다. 직렬로 연결된 배터리 스택을 병렬로 연결하여 AH 용량을 증가시키는 것도 가능하다.

그림 7은 배터리 셀을 연결하는 부스바에 센서 연결을 보여준다. 센서 연결선은 릴레이에 입력되어 내부저항, 전압, 온도 등을 측정하게 된다. 그림 8은 CPU회로와 아날로그 회로로 구성된 BMS 내부 회로를 보여준다. 그림 9는 측정 저항값을 관리하는 서버 운영 화면을 보여주고 있다. 저항 측정은 하루에 1회 주기로 실행되면 배터리 전압과 온도는 1분에 1회씩 측정하여 서버에 결과를 전송하게 된다.



Fig. 6. Installation of BMS at IDC site.
그림 6. IDC 센터 BMS 설치 사진



Fig. 7. Sensor wire connection to battery busbar.
그림 7. 배터리 부스바 연결 센서선

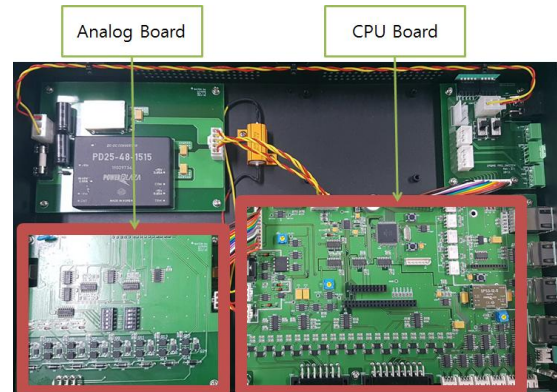


Fig. 8. BMS 제어기 모듈 구성
그림 8. BMS 제어기 모듈 구성

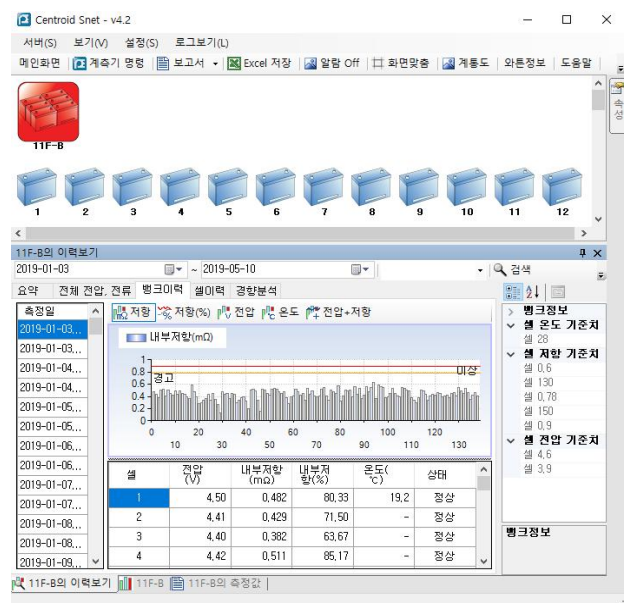


Fig. 9. Image of server operation.
그림 9. 서버 동작 화면

서버에서는 설치된 사이트와 일자를 선택하여 배터리 셀 별로 셀전압, 내부저항 등을 데이터로 보여 주고 막대그래프로 보여준다. 각 배터리 별로 기준 내부저항값과 130% 경고 저항값, 150% 이상 저항값 등을 설정할 수 있게 되어 있다. 경고와 이상이 발생할 경우 알람을 발생하는 기능을 가지고 있다.

4. 측정 결과

그림 10은 교류를 발생시킨 후 배터리의 전압, 전류 파형을 보여 주고 있다. 트랜지스터 제어신호가 인가된 후 과도현상 구간이 발생하고 그 후 안정화된다. 그림 11은 그림 10의 박스 구간의 안정화된 구간 전압, 전류 파형을 확대해서 보여주고 있다. 안정화된 기간 동안 전압, 전류 파형을 입력하여 저항값을 연산한다.

그림 12는 저항값을 서버에서 저장한 저항 측정 결과 데이터 추이를 보여주고 있다. 1일에 1번씩 측정하여 1년이 넘는 400일 동안 측정한 데이터이다. 대부분 배터리에서 저항값이 일정하게 유지되지만 특정 배터리의 내부저항값이 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 저항값이 증가하는 배터리를 정밀 방전 시험한 결과 노후화가 진행되어 SoH가 30% 정도 감소한 것을 확인할 수 있었다. 배터리 스택에 배터리 모니터링 시스템을 설치하여 온라인으로 운전 중에 계속적으로 배터리 내부저항값 변화를 모니터링하여 이상 징후의 배터리를 발견, 교체하는 기능을 수행하게 된다.

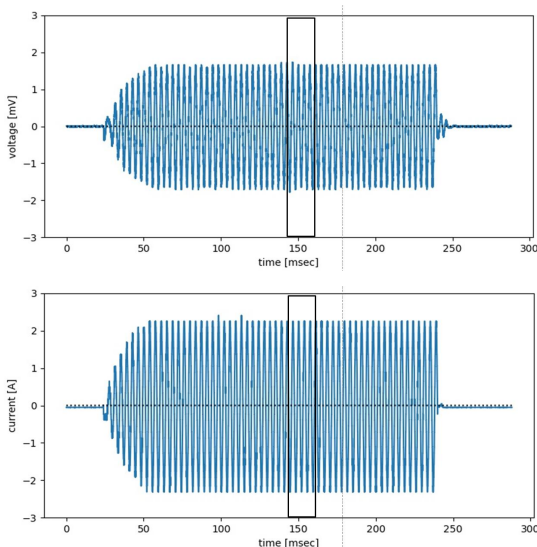


Fig. 10. Overall AC voltage and current waveform.
그림 10. 전체 교류 전압, 전류 파형

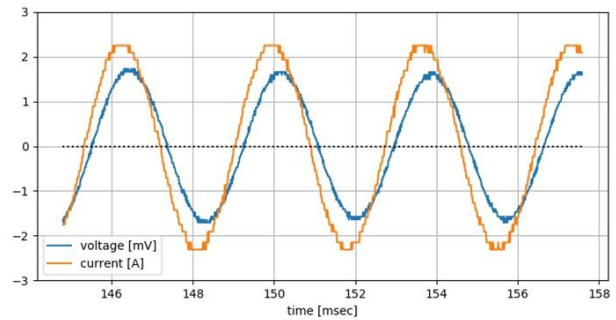


Fig. 11. Steady state AC voltage and current waveform.
그림 11. 정상상태 교류 전압, 전류 파형

III. 결론

IDC 대용량 무정전 전원장치를 위한 배터리 모니터링 시스템을 제안하였다. 내부저항을 측정하는 간단한 알고리즘을 제안하고 실제 현장에 적용한 사례를 제시하였다. BMS 시스템 구성을 위한 회로와 신호처리 방법에 대해 회로 구성도와 연산 블록도를 보였다. 설치된 저항 측정 시스템의 전압, 전류 파형을 보였으며 이를 이용하여 내부저항의 변화 즉 SoH 노후 추이를 보였고, 높은 신뢰성을 요구하는 IDC 센터에 적용하여 제안한 방법의 유용함을 입증하였다.

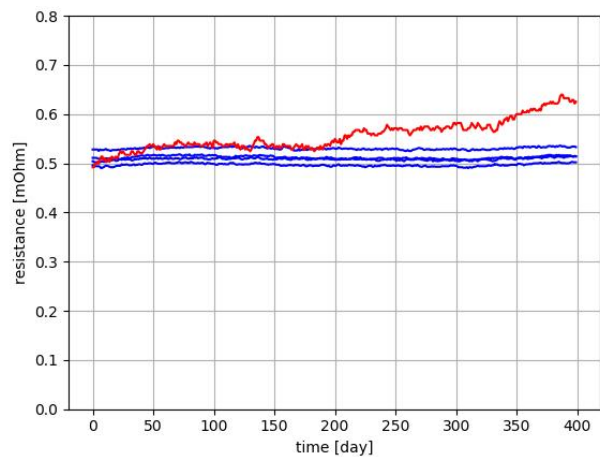


Fig. 12. Data of internal resistance change.
그림 12. 내부저항 측정 데이터 추이 예

추후 연구할 과제로는 보다 납산배터리 외 리튬이온배터리 등에 적용하는 것과 복잡한 등가회로에서의 적용 및 충전잡음이 존재할 경우 잡음에 강인한 저항측정 알고리즘의 개발 등을 들 수 있다.

References

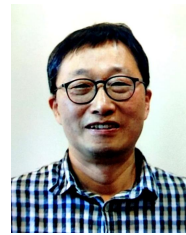
- [1] Xintian Liu et al., "A new dynamic SOH estimation of lead-acid battery for substation application," *International Journal of Energy Research*, vol.41, no.4, pp.579-592, 2017.
DOI: 10.1002/er.3662
- [2] Tetsuro Okoshi et al., "Battery condition monitoring (BCM) technologies about lead-acid batteries," *Journal of Power Sources*, vol.158, no.2, pp.874-878, 2016.
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.008
- [3] IEEE Standard Association, "IEEE guide for selection and use of battery monitoring equipment in stationary applications," *IEEE Std* pp.1491-2012, 2012. DOI: 10.1109/IEEESTD.2012.6226325
- [4] Jacques Marchildon et al., "SOC and SOH characterization of lead acid batteries," *IEEE IECON*, vol.41, pp.1442-1446, 2015.
DOI: 10.1109/IECON.2015.7392303
- [5] Martin Coleman, et al., "An Improved Battery Characterization Method Using a Two-Pulse Load Test," *IEEE Trans on Energy Conversion*, vol.23, no.2, pp.708-713, 2008.
DOI: 10.1109/TEC.2007.914329
- [6] Dian Wang et al., "Online Lithium-Ion Battery Internal Resistance Measurement Application in State-of-Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter," *Energies*, vol.10, no.9, pp.1284-1294, 2017. DOI: 10.3390/en10091284
- [7] Monika Kwiecien et al., "Determination of SoH of Lead-Acid Batteries by Electrochemical Impedance Spectroscopy," *Applied Sciences*, vol.8, no.6, pp.873-895, 2017. DOI: 10.3390/app8060873
- [8] Mihai Victor Micea et al., "Online State-of-Health Assessment for Battery Management Systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.60, no.6, pp.1997-2006, 2011.
- [9] Wenguan Wang et al., "Near-Real-Time Parameter Estimation of an Electrical Battery Model With Multiple Time Constants and SOC-Dependent Capacitance," *IEEE Trans. on*

Power Electronics, vol.29, no.11, pp.5905-5920, 2014. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2300143

[10] "Sealed Lead-Acid Batteries," *Technical Manual*, Power Sonic, 2019.

BIOGRAPHY

Hyung-Kyu LEE (Member)



1989 : BS degree in Electronics Engineering, SoongSil University.
1991 : MS degree in Electronics Engineering, SoongSil University.
2016~ : CTO, Waton Inc.
1996~2005 : Electronics Engineer, Hewlett Packard Korea / Agilent Korea

Gi Taek Kim (Member)



1983 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
1989 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1990~ : Professor in Dept. of Electrical Engineering, Kangwon National University.