

충전기 고조파 잡음에 강인한 배터리 내부저항 측정 시스템

Battery Internal Resistance Measurement System Robust to Charger Harmonic Noise

이 형 규*, 김 기 택**★

Hyung-Kyu Lee*, Gi-Taek Kim**★

Abstract

The effects of battery aging limit the rechargeable capacity, State of Health(SoH). It is very important to estimate the SoH in the battery monitoring system(BMS) and many algorithms of measuring the internal resistance of the battery were proposed. A method is used by applying a current source of a specific frequency to the battery and measuring the voltage response. When charging harmonic noise is generated in the voltage response, it results in poor resistance measurement accuracy. In this paper, a robust battery internal resistance measurement algorithm is proposed to eliminate the effect of charging noise by integrating the current source and voltage response signals for a certain period. It showed excellent accuracy and stable measurement results. Applying to the BMS for uninterruptible power supply, the usefulness of the proposed method is verified.

요 약

배터리를 사용함에 따라 노화가 진행되면 배터리의 충전 가능 용량을 나타내는 State of Health(SoH)가 줄어들게 된다. 배터리 모니터링 시스템(BMS)에서 SoH를 추정하는 것이 매우 중요하며, 이를 위해 배터리 내부 저항을 측정하는 방법이 많이 사용된다. 일반적으로 배터리에 특정한 주파수의 전류원을 인가하고 전압응답을 측정하여 내부저항을 연산한다. 충전기가 동작할 경우 전압응답에 충전 고조파 잡음이 발생하여 저항 측정의 정확도가 떨어진다. 본 논문에서는 충전잡음의 영향을 제거하기 위하여 강인한 배터리 내부저항 측정 알고리즘을 제안하였다. 전류원 신호와 전압응답 신호를 일정한 주기 동안 적분하여 잡음을 제거하는 방법으로 우수한 정확도와 안정된 연산결과를 보였다. 무정전 전원장치용 BMS에 적용하여 제안한 방법의 유용함을 입증하였다.

Key words : Battery, Harmonic noise, SoH, BMS(Battery Monitoring System), Charging voltage noise

1. 서론

배터리는 전기자동차, 무정전 전원 백업 시스템 및 에너지저장시스템(ESS) 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 납산(Lead-acid)배터리는 에너

지 밀도가 낮은 단점에도 불구하고, 신뢰성이 높고 가격이 낮다는 이점으로 전원 백업 장비에 가장 많이 사용되는 배터리이다[1]-[3].

배터리에서 State of Charge(SoC)는 현재 배터리에 저장되어 있어 사용이 가능한 에너지 충전량을

* Waton Inc.

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

★ Corresponding author

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

Manuscript received Nov. 30, 2020, revised Dec. 23, 2020, accepted Dec. 28, 2020.

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.

의미하고, State of Health(SoH)는 배터리에 충전이 가능한 용량을 의미한다. 배터리를 사용함에 따라 열화가 진행되면 충전 가능 용량이 줄어들게 되어 SoH 상태를 추정하는 것이 매우 중요하다. 밀폐형의 배터리는 비중 등 물리적 특성을 확인할 수 없어 배터리의 성능 저하 상태를 정확히 식별할 수 없다. SoH는 부하 충전시험을 실시하여 정확하게 측정할 수 있지만, 충전시험은 시험경비가 많이 소요되는 문제뿐만 아니라 운전을 일시 중단하고 해야 하는 문제가 있다[4].

배터리를 운전 중에 중단하지 않고 실시간으로 SoH를 추정하는 많은 방법이 제안되어 있으며 배터리의 내부 직렬 저항값을 측정하는 것이 가장 대표적인 방법이다. 배터리 열화에 따라 SoH가 저하되면 내부 직렬 저항값은 증가하게 되고, 내부 직렬 저항이 기준값 이상이거나 최초 측정값 보다 일정 이상 증가하게 되면 배터리를 교체해야 한다[5].

운전 중인 배터리의 충전 전류와 전압을 연산하여 저항값을 추정하는 방법과 외부에서 전류원 혹은 전압원을 인가하여 배터리 응답으로 임피던스를 연산하는 방법이 있다. 외부 전원에 의한 방법은 하나의 혹은 여러 개의 펄스를 갖는 전원을 인가하거나, 특정한 주파수를 갖는 교류 전원을 인가해서 배터리의 응답 신호를 이용하여 임피던스의 크기와 위상을 구해 저항을 연산하는 방법이 있다. 외부 전원의 주파수를 변화시키면서 응답 신호를 분석해 주파수응답을 구해 내부 직렬 저항값을 추정하는 방법 등이 있다[6].

배터리 내부 직렬 저항값을 구하기 위하여 특정한 주파수의 교류전류원을 인가하고 전압응답 신호를 센싱하게 된다. 전압과 전류의 크기와 위상차를 구해 저항값을 연산하는데 충전기에서 발생하는 전압잡음이 있을 경우 전압, 전류의 크기와 위상각 측정에 오차가 발생하게 된다[7].

본 논문에서는 충전기 전압 잡음이 발생하는 환경에서 잡음에 강인한 내부저항 연산 알고리즘을 제안하고 이를 구현하기 위하여 시스템의 설계, 구성 및 실험 결과를 제시한다.

II. 본론

1. 배터리 등가회로

배터리의 전압과 전류 특성을 기술하는 등가회로

로 여러가지 회로들이 제안되어 있으며, 그 중에서 대표적인 회로는 그림 1의 회로와 같다[8]. 배터리 전압 OCV(Open Circuit Voltage)와 함께 저항 r 은 내부 직렬 저항을 나타내고, RC 로 구성된 병렬회로는 전압 강하 등의 정상상태 특성과 충전시 나타나는 과도현상에 관련되어 있다. 내부 직렬 저항 r 은 배터리의 용량과 관련되어 측정해야 하는 저항값이다.

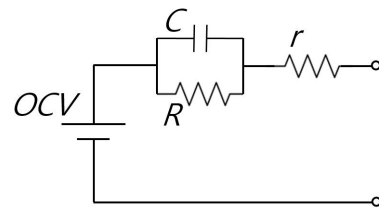


Fig. 1. Equivalent circuit of battery.

그림 1. 배터리 근사 등가 회로

그림 1의 회로에 교류 전류원을 인가할 경우 임피던스는 (1)식과 같이 표현된다.

$$Z = r + \frac{R}{1 + j\omega RC} \quad (1)$$

배터리에서는 C 값이 매우 커서 $\omega RC \gg 1$ 만족되고 (2)식과 같이 근사 조건이 성립하여 저항 r 과 캐패시터 C 의 직렬 회로로 간주할 수 있다.

$$Z = r + \frac{1}{j\omega C} = r - j\frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

2. BMS 시스템 구성

그림 2는 제안한 BMS 구성도를 보여준다. 배터리 스택은 충전기에서 전원을 공급 받아 부하에 전력을 공급한다. BMS에서 릴레이를 제어하여 배터리 스택 중 측정 대상 배터리를 선택한다. 이 배터리에 특정한 주파수의 교류 전류원을 인가하고 배터리의 전압 응답 신호를 센싱한다. 내부 직렬 저항은 수 $[m\Omega]$ 정도의 매우 작은 값으로 따라서 전압 응답 신호는 크기가 $[mV]$ 정도의 매우 작은 신호이기 때문에 수백배 정도의 큰 이득을 갖는 앰프를 통과시켜 전압과 전류 신호를 입력하게 된다. 신호는 잡음이 포함되어 있어 전류원의 주파수를 중심으로 하는 대역통과필터(BPF)를 통과하게 된다.

충전기 잡음이 없는 경우 인가한 교류전류원과 배터리의 전압응답과형은 그림 3과 같다. 잡음이 없는 상태에서는 전압, 전류의 크기와 전압, 전류

파형 사이의 위상차를 측정하여 (3)식과 같이 배터리의 내부저항값을 계산할 수 있다.

$$r = |Z| \cos\phi = |V|/|I| \cos\phi \quad (3)$$

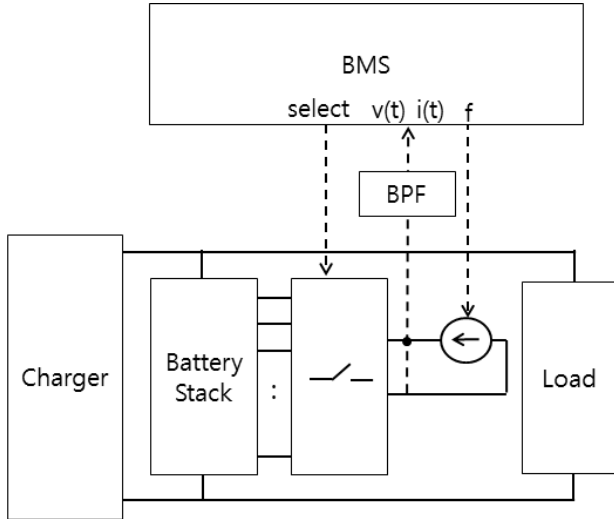


Fig. 2. Blockdiagram of BMS, charger, and load.
그림 2. BMS, 충전기 및 부하 블록도

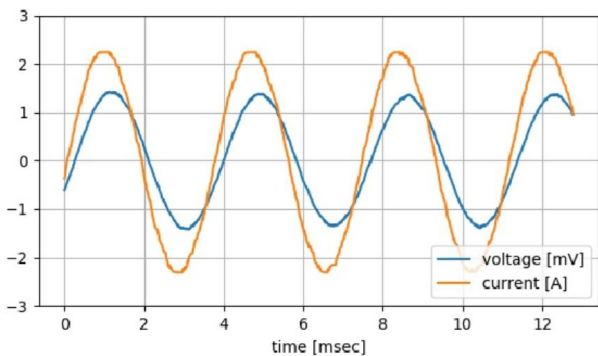


Fig. 3. Voltage and current waveforms without noise.
그림 3. 잡음 없는 상태의 전압, 전류 파형

3. 충전기 잡음

충전기가 동작하는 경우 전압파형에 충전기에 의해 발생한 전압 잡음이 발생하게 된다. 그림 4와 그림 5는 전류원을 인가하지 않는 상태에서 전압파형과 FFT 분석결과를 보여주고 있다. FFT 크기는 전류원을 인가할 경우 발생하는 전압의 크기를 1로 하여 상대적인 크기를 보여준다.

충전기는 방식에 따라 단상, 3상 정류기를 사용하고 120[Hz], 240[Hz] 혹은 360[Hz]의 배수의 고조파가 발생하게 된다. 그림 5에서는 360[Hz] 고조파 성분이 가장 큰 잡음으로 동작하고 240[Hz], 120[Hz]의 잡음이 존재하며 그 외 잡음도 존재한

다. 이 고조파는 대역통과필터에 의해 어느 정도 약화되지만 완전히 제거할 수 없다.

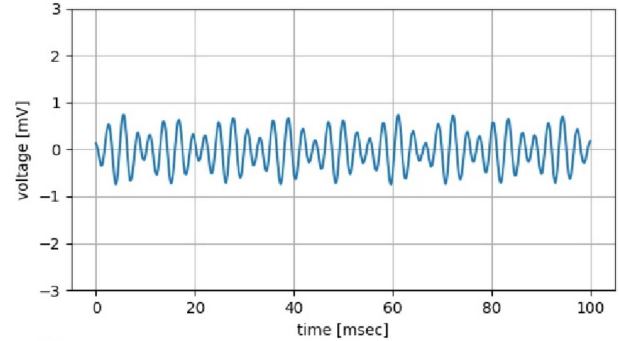


Fig. 4. Voltage waveform without current source.
그림 4. 전류원 인가하지 않는 경우 전압 파형

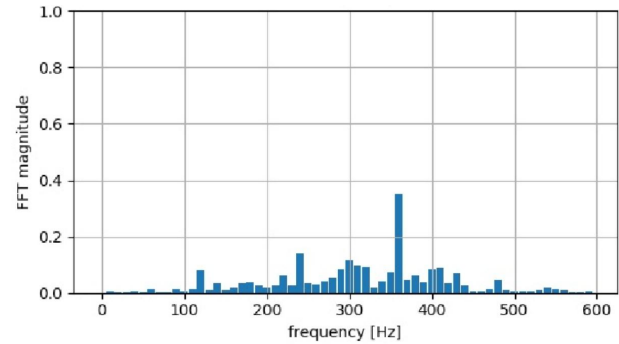


Fig. 5. Voltage FFT without current source injection.
그림 5. 전류원을 인가하지 않는 경우 전압 FFT

그림 6, 7은 충전기 잡음이 있는 상태에서 배터리에 전류원을 인가할 경우 전류, 전압 파형이다. 전류원을 인가하면 과도상태를 거친 후 정상상태의 전류와 전압 응답 파형을 보여주고 있다.

전류와 충전기의 잡음은 60[Hz]의 정수배 주파수에서 발생한다. 전류원의 주파수는 잡음 주파수와 다른 주파수를 사용하여 잡음 주파수와 중복되지

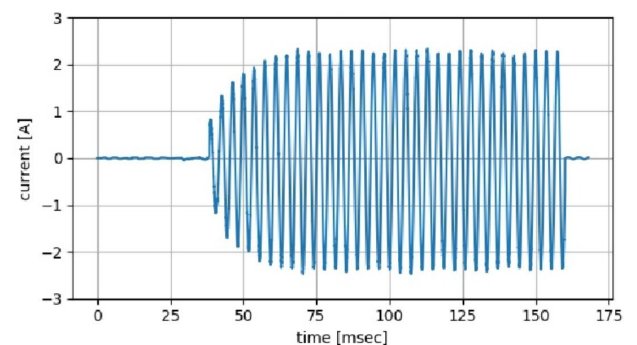


Fig. 6. Current source waveform.
그림 6. 전류원 파형

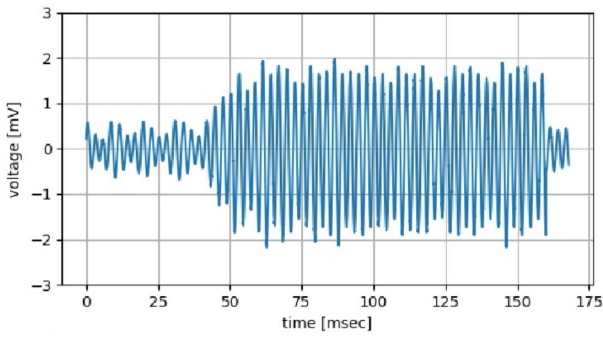


Fig. 7. Voltage response waveform with noise.

그림 7. 잡음 상태의 전압 응답 파형

않도록 하고 프로세서와 AD 변환기의 처리성을 고려하여 270[Hz]로 하였다. 그림 7 전압의 파형을 확대하면 그림 8과 같다. 270[Hz] 전류원을 인가하면 전압은 270[Hz] 응답성분과 함께 360[Hz] 잡음 성분이 섞여 있어 전압의 크기도 일정하지 않지만 위상차가 일정하지 않아 (3)식의 방법으로 내부 저항값을 연산할 수 없게 된다.

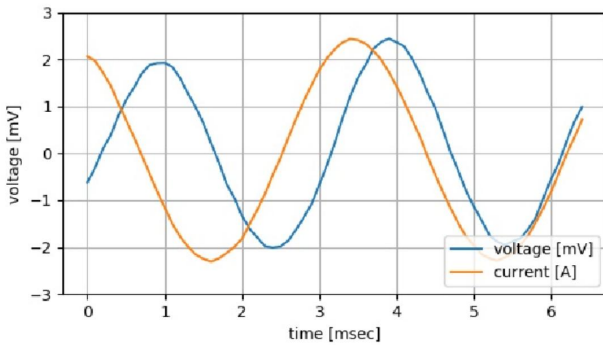


Fig. 8. Voltage and current waveforms with noise.

그림 8. 잡음 상태의 전압, 전류 파형

4. 내부저항 측정 알고리즘

전류원을 인가해서 발생한 전압 응답파형에 충전기에서 발생하는 전압 잡음 고조파가 더해져서 전압의 크기와 위상을 측정하기 어렵게 되었지만 전류원에 의한 응답과 고조파 잡음 성분을 분리할 수 있으면 내부저항의 정확한 연산이 가능하다. 그림 9에 인가한 주파수의 전류원과 전압응답에 대한 페이지도를 보여준다. 여기서 전류원의 주파수와 같은 주파수의 sine, cosine 함수를 기준 축으로 함께 보여주고 있다. α 는 sine 함수 기준 축과 전압신호 사이의 임의의 각이며, ϕ 는 전압과 전류 신호의 위상각을 나타낸다.

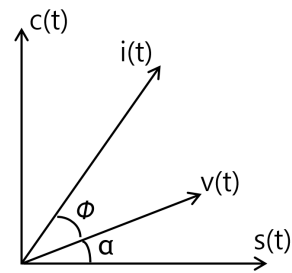


Fig. 9. Voltage and current phase diagram.

그림 9. 전압, 전류 위상 다이어그램

그림 9에서 전압과 전류 신호 및 기준 축의 sine, cosine 함수에서 (4)식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 v(t) &= V_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + \sum_{n \neq 1} V_n \sin(\omega_n t + \alpha_n) \\
 i(t) &= I_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1 + \phi) \\
 c(t) &= \cos(\omega_1 t) \\
 s(t) &= \sin(\omega_1 t)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

전압 신호 $v(t)$ 는 전류원에 의한 응답 성분과 함께 고조파 성분을 포함하고 있다. $v(t)$ 와 $c(t)$ 을 곱하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 v(t)c(t) &= V_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \cos(\omega_1 t) + \sum_{n \neq 1} H_n(t) \\
 &= \frac{V_1}{2} (\sin \alpha_1 + \sin(2\omega_1 t + \alpha_1)) + \sum_{n \neq 1} H_n(t)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서 전류원의 각주파수는 ω_1 이고, 고조파 성분 $H_n(t)$ 는 ω_1 과 다른 각주파수를 갖는 성분이다.

$$\begin{aligned}
 H_n(t) &= \frac{V_n}{2} (\sin((\omega_n - \omega_1)t + \alpha_n) \\
 &\quad + \sin((\omega_n + \omega_1)t + \alpha_n))
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$2\omega_1$, $(\omega_n - \omega_1)$ 및 $(\omega_n + \omega_1)$ 성분의 적분이 0이 되도록 적분 구간 T 를 정하면 적분값은 (7)식과 같이 m_1 으로 표현된다. (7)식에 전압, 전류를 처리한 결과도 함께 보여준다.

$$\begin{aligned}
 m_1 &= \frac{2}{T} \int_T v(t)c(t)dt = V_1 \sin \alpha_1 \\
 m_2 &= \frac{2}{T} \int_T v(t)s(t)dt = V_1 \cos \alpha_1 \\
 m_3 &= \frac{2}{T} \int_T i(t)c(t)dt = I_1 \cos(\alpha_1 + \phi_1) \\
 m_4 &= \frac{2}{T} \int_T i(t)s(t)dt = I_1 \sin(\alpha_1 + \phi_1)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

(7)식에서 m_1-m_4 를 (8), (9)식과 같이 정리하면 저항값 r 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_2m_3 + m_1m_4 &= V_1I_1(\cos(\alpha_1 + \phi_1)\cos\alpha_1 + \sin(\alpha_1 + \phi_1)\sin\alpha_1) \\ &= V_1I_1\cos(\alpha_1 + \phi_1 - \alpha_1) = V_1I_1\cos\phi_1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m_3^2 + m_4^2 &= I_1^2(\cos^2(\alpha_1 + \phi_1) + \sin^2(\alpha_1 + \phi_1)) = I_1^2 \\ \frac{m_2m_3 + m_1m_4}{m_3^2 + m_4^2} &= \frac{V_1I_1\cos\phi_1}{I_1^2} = \frac{V_1}{I_1}\cos\phi_1 = r \end{aligned} \quad (9)$$

그림 10에 (7)-(9)식을 이용한 내부저항 연산을 위한 블록다이어그램을 보여주고 있다. 주파수 f 의 전류원을 발생시키고, 배터리에 인가된 전류원과 전압신호 $i(t)$, $v(t)$ 를 저장한 후, 같은 주파수를 갖는 sine, cosine 함수 $s(t)$, $c(t)$ 를 이용하여 (7)-(9)식을 적용하여 내부저항 r 값을 연산한다.

5. 시스템 구성 및 결과

제안한 BMS 시스템은 무정전 전원장치에 설치되었으며, 그림 11, 12에 설치 현장과 배터리 측정 을 위한 센싱선 연결을 보였다.

전류원과 전압 신호를 적분연산하기 위한 주기로 는 100[msec]를 선택하였다. 잡음과 전류원이 주파 수 차이가 10[Hz]의 배수가 될 경우 (6),(7)식에 의 해서 적분값이 0이 된다. 예를 들어 300[Hz] 잡음 의 경우 주파수 차이가 30[Hz]로 10[Hz]의 배수가 되어 적분하면 0이 된다. 270[Hz] 주파수의 sine, cosine 함수 $s(t)$, $c(t)$ 신호는 항상 일정하기 때문 에 테이블에 저장하여 연산시간을 단축하였다.

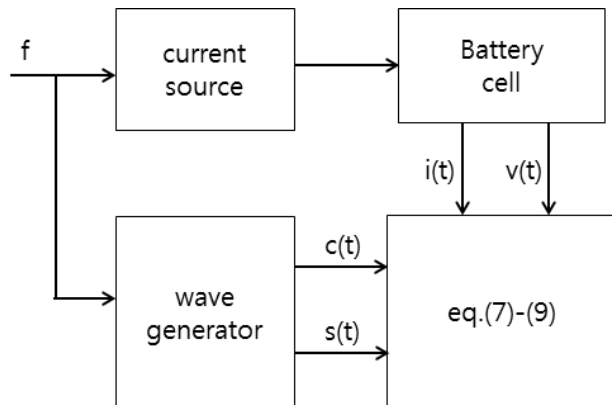


Fig. 10. Diagram of calculating internal resistance. 그림 10. 내부저항 연산 다이어그램

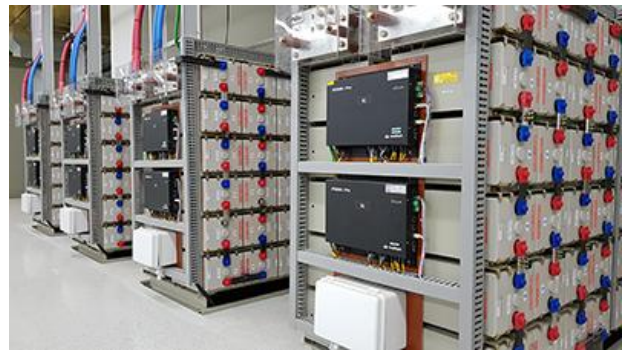


Fig. 11. BMS installation. 그림 11. BMS 설치 사진



Fig. 12. Battery sensor wire connection. 그림 12. 배터리 센서 연결

그림 13에 100[msec] 주기 동안 측정된 전압 파형을 보였고, 그림 14에 전압 파형의 FFT 분석 결과를 보여주고 있다. 전압의 주파수 성분에서 배터리에 인가된 전류원 주파수 외에 충전기 동작으로 인한 잡음이 함께 존재하는 것을 볼 수 있다.

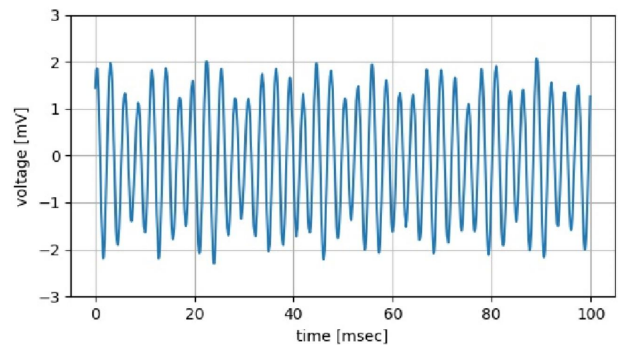


Fig. 13. Voltage waveform in measurement period. 그림 13. 잡음 상태에서의 전압 파형

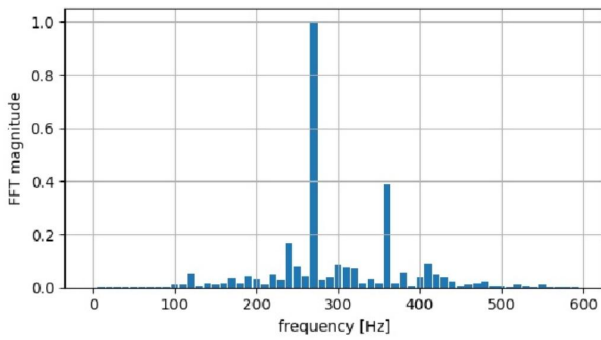


Fig. 14. Voltage FFT with noise.

그림 14. 잡음 상태에서의 전압 FFT

그림 15~17에 60회 동안 측정된 결과를 보여준다. 그림 15에는 전압크기, 즉 V_1 의 측정결과를 보여주며, 평균 1.422[mV]과 1.3% 정도의 표준편차를 나타낸다. 그림 16에는 전류원의 크기 I_1 측정결과를 나타내며, 평균 2.28[A]과 0.23% 표준편차를 보여주고 있고, 그림 17에는 저항값 r 측정의 결과를 나타내며 평균 0.59[m Ω]과 1.41%의 편차를 보여주고 있다. 이 결과들은 충전기가 동작하지 않는 상태에서의 측정결과와 1~2% 이내의 정확도를 보여주고 있다.

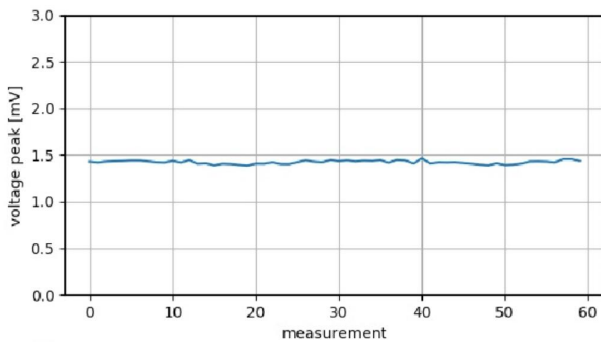


Fig. 15. Measurement results of voltage amplitude.

그림 15. 전압 크기 측정 결과

III. 결론

배터리 충전 가능 용량 SoH 추정을 위한 내부 직렬 저항을 측정하기 위해 BMS 시스템을 구성하였다. 배터리에 특정한 주파수의 전류원을 인가하고 배터리의 전압응답 신호를 센싱하여 연산하는 방법을 사용한다. 충전기의 잡음이 있는 경우 측정 정확도에 영향을 미쳐, 잡음의 영향을 제거하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 고주파 잡음을 일정한 주기 동안 적분하여 제거하는 방법으로 잡음이 없

는 경우와 비교하여 1~2% 이내의 정확도와 표준편차를 보여 안정된 연산결과를 보여 주었다. 제안한 알고리즘을 구현하여 무정전 전원 장치의 BMS에 적용하여 제안한 방법의 유용함을 보였다.

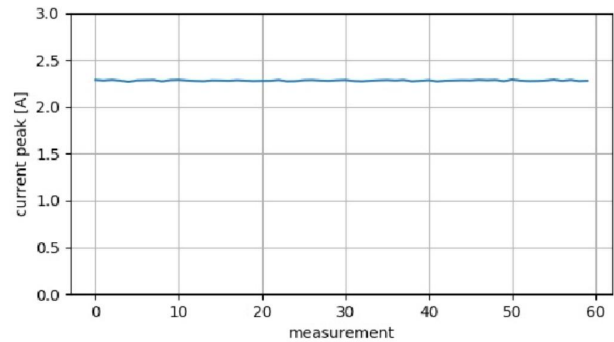


Fig. 16. Measurement results of current amplitude.

그림 16. 전류 크기 측정 결과

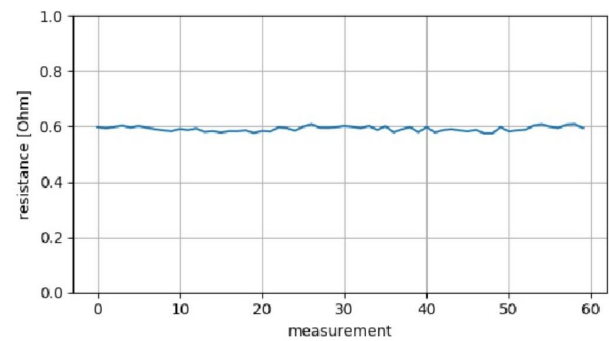


Fig. 17. Measurement results of resistance.

그림 17. 저항 측정 결과

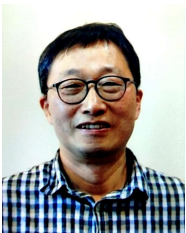
References

- [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] 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
- [3] Jussi Sihvo et al., "Fast Approach for Battery Impedance Identification Using Pseudo-Random Sequence Signals," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.35, no.3, pp.2548-2557, 2019.
DOI: 10.1109/TPEL.2019.2924286

- [4] Yuan Cao et al., "Evaluation of paralleled battery system with SOC balancing and battery impedance magnitude measurement," *2018 IEEE APEC*, 2018. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341048
- [5] IEEE Standard Association, "IEEE guide for selection and use of battery monitoring equipment in stationary applications," *IEEE Std* pp.1491–2012, 2012.
- [6] Mihai Victor Micea et al., "Online State-of-Health Assessment for Battery Management Systems," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol.60, no.6, pp.1997–2006, 2011. DOI: 10.1109/TIM.2011.2115630
- [7] Hyung Kyu Lee et al., "Battery Monitoring System for High Capacity Uninterruptible Power Supply," *Journal of IKEEE*, vol.23, no.2, pp.580–585, 2019. DOI: 10.7471/ikeee.2019.23.2.580
- [8] 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

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.