

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.1.217>

IIBC 2018-1-29

톤버스트 응답 신호의 스펙트럼 추정에 의한 배터리의 SoC 측정에 관한 연구

A Study on SoC Measurement of Battery by Spectrum Estimation of Tone Burst Response Signal

최경수*, 강대수**

Kyoung-Soo Choi*, Dae-Soo Kang**

요 약 배터리의 열화는 SoC 및 SoH의 변화에 따라 결정된다. 배터리의 열화를 판정하기 위해 전달 함수에 의한 배터리 SoC를 측정 하는 방법을 연구 하였다. 배터리의 SoC는 DC 저항이 검출되는 1Hz 대역에서 가장 크게 변화 한다. 하지만 관측하기 협소한 대역이기 때문에 톤버스트 신호를 입력신호로 사용하여 배터리의 주파수 응답대역을 대역을 1kHz로 이동 시켰다. 신호의 주파수 영역 특성을 관측을 위해 Welch스펙트럼 추정 방법을 사용하였다. 스펙트럼 추정 결과 배터리의 응답 신호는 SoC가 40%, 60%, 80% 일 때 각각 1dB의 차이를 갖는 것을 확인 하였으며, 이를 통해 새로운 배터리 SoC의 측정 방식을 제안 하였다.

Abstract The deterioration of the Battery is decided by SoC and SoH. To determine Battery deterioration, SoC measurement method of Battery by Transfer Function was studied. The SoC of the Battery changes most greatly in the 1Hz band where the DC resistance is detected. but it is a narrow band to observe, therefore, the observation band was moved to 1kHz using the tone burst signal. Welch's method was used to observe the frequency domain characteristics of the signal. As a result of the spectral estimation, it was confirmed that the response signal of the battery is 1dB difference when the SoC is 40%, 60%, and 80%, respectively. Through this, Proposed the new method of Battery SoC measurement.

Key Words : Tone Burst, Transfer Function, Deconvolution, State of Charge, Electrochemical Impedance Spectroscopy

1. 서 론

최근 모바일 폰에 사용되는 배터리의 충, 방전에 관련된 문제가 발생하고 있으며, 일부 회사에서는 배터리의 폭발이 발생하면서 배터리 관리에 대한 필요성이 대두 되고 있다. 또한 친환경 전기자동차의 관심이 증폭 되고 있는데, 여기서도 배터리의 충, 방전시의 안전 문제, 셀

밸런싱^[1] 등 다양한 문제점이 발생 되고 있다. 배터리의 상태를 파악 할 때 사용되는 데이터들은 전압, 전류, 온도, 임피던스 등을 측정하곤 하는데 이들을 종합적으로 크게 두 가지의 상태로 구분지어 배터리의 상태를 파악 한다. 첫 번째로는 배터리의 충전 상태(SoC : State of charge) 라고 하는 SoC가 되겠으며, 둘째로는 건강 상태 (SoH : State of Health)라고 하는 SoH가 되겠다. SoC는

*준희원, 공주대학교 대학원 정보통신공학과

**정희원, 공주대학교 정보통신공학부(교신저자)

접수일자: 2017년 12월 14일, 수정완료: 2018년 1월 14일

게재확정일자: 2018년 2월 9일

Received: 14 December, 2017 / Revised: 14 January, 2018

Accepted: 9 February, 2018

**Corresponding Author: dskang@kongju.ac.kr

Dept. Division of Information & Communication Engineering,
Kongju National University, Korea

일반적으로 배터리의 정격 전하량 대비 특정 시점에서 배터리가 방출 할 수 있는 전하량의 비를 %로서 나타낸 지표이다. SoH는 출고 시점의 배터리의 상태를 100%로 가정 하였을 때 배터리의 최대 충, 방전 횟수의 비로서 나타낸 것이며, 내부 전기 및 화학적 요인으로 나타나는 충전 전압, 방전 심도(DOD : Depth of Discharge) 등과 온도와 같은 외부 환경적 요인에 의해 민감하게 변하는 지표이다. 배터리의 SoC는 기준치를 넘어서는 과충전과 과방전으로 인해 건강 상태인 SoH를 단축시키는 핵심 원인이 될 수 있다. 또한 SoH는 배터리의 열화가 진행됨에 따라 내부 저항 성분의 증가로 인해 배터리의 용량 감소로 이어지게 되고 결국엔 SoC에 영향을 주게 된다. IEEE std. 1188-2005 에서도 배터리의 내부 저항 크기가 30~50% 증가된 시점에서 방전 시험 결과 80% 미만으로 잔존 용량이 나타날 경우 배터리의 교체를 권고^[2]하기 때문에 SoC의 측정은 중요한 사항이다.

SoC의 전통적인 측정 방식으로 전류 적산(Coulomb Counting) 방식이 있다. 전류 적산 방식은 소모 전류를 이용해서 사용한 전력을 계산하여 배터리의 정격 용량으로부터 SoC를 측정 하는 방식이다. 전류 적산 방식은 초기의 SoC를 알 수 없고, 전류를 적산하는 방식이기 때문에 시간이 지나면서 계산의 오차가 누적되는 단점이 존재 한다. 또 다른 측정 방식인 OCV(Open Circuit Voltage)방식은 배터리를 개방 된 상태에서 SoC를 측정 하는 방식으로 높은 정확도를 갖지만, 단점으로 OCV 측정 과정에서 긴 휴지 시간을 갖기 때문에 실시간을 요구 하는 시스템에서는 사용하기 힘든 점이 있다. 칼만 필터(Kalman Filter)를 사용하는 SoC의 추정 방식은 복잡한 알고리즘과 배터리에 대한 정확한 모델링이 필요하며, 높은 SoC의 정확성을 갖기 위해 상태 변수를 많이 잡아야 하는 점이 있다^[3]. 마지막으로 배터리의 등가 임피던스 모델링을 하고, 배터리의 AC 임피던스를 측정하여 커브피팅 후 등가 임피던스 모델에 적용 후, 등가 회로에 대한 각각의 파라미터 값과 나이키스트 선도 등을 활용하여 배터리의 SoC를 측정하는 방식인 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 방식이 있다.^[4] 일반적으로 배터리에 대해 EIS 방식을 사용 할 때는 10mHz에서 1kHz의 주파수 대역에서 SoC의 측정이 이루어지는데 여러 대역의 주파수를 사용 하는 만큼 SoC를 측정할 때 시간이 지연되며 전기 화학적 임피던스 측정기 등 추가적인 장비들이 필요하다는 단점이 있다.

본 연구는 배터리 SoC 측정의 새로운 방식으로, 기존 여러 대역의 주파수를 사용 하는 것이 아닌 하나의 특정 주파수를 갖는 입력 신호에 대해 배터리의 응답 신호를 얻어, 그들로부터 전달 함수를 추정하여 SoC를 측정 하는 방법을 제안 하고 실험 하는 연구 이다.

배터리의 전달 함수를 추정 하는 과정에서 하나의 주파수만 사용하기 때문에 기존 방식보다 측정 시간이 줄어들고, 때문에 그만큼 배터리에 대한 부하도 줄어들며, 이는 장기적으로 보았을 때 건강 상태인 SoH에도 긍정적인 영향을 미치게 된다. 또한 임피던스만으로 SoC를 측정 하는 것이 아니기 때문에 측정의 효율성과 정확성을 향상 시킬 수 있다.

II. 배터리의 전기적 모델링

배터리에 관한 전기적 모델링은 배터리의 종류에 따라 그리고 추정해야 할 대상 및 내부 전기 화학 특성을 어떻게 구성하느냐에 따라 다양하게 존재한다. 그림 1.는 배터리의 전기적 모델들의 일부이다.^[5]

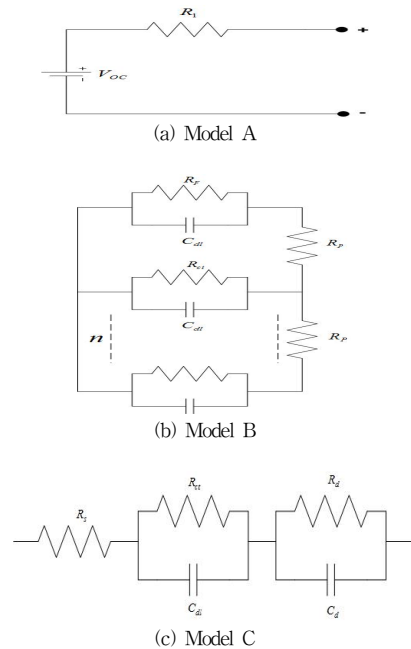


그림 1. 배터리 모델
Fig. 1. Battery Model

(a)는 Rint Model로서 배터리의 내부 저항을 R1으로 나타낸 모델이다. (b)는 R_F 와 C를 병렬로 연결시키고 pore-resistance 성분 R_p 로 구성된 모델이다. (c)는 Ohmic Loss를 R1으로 고주파 영역인 전하 전이 손실 (Charge Transfer Loss)과 저주파 영역인 확산 손실 (Diffusion Loss)를 두 개의 RC 병렬 회로로 증가화 시킨 모델이다. 배터리의 SoC는 그림 1.의 (c) 모델에서 R_{ct}, R_d 가 검출되는 1Hz 주파수 대역에서 가장 큰 변화를 가지며, SoH는 R_s 가 검출되는 1kHz의 주파수 대역에서 가장 큰 변화를 갖는다. 그림 2.에는 배터리에 대한 나이키스트 선도를 주파수 대역별로 나타내었다.^[6]

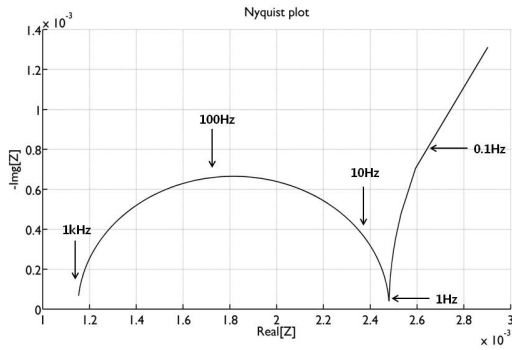


그림 2. 배터리의 나이키스트 선도
 Fig. 2. Nyquist plot of Battery

III. 전달 함수의 추정 방법

시스템의 전달 함수에는 시스템의 특성 및 상태에 대한 다양한 정보가 포함되어 있다. 이를 이용하면 처리 목적에 따라 시스템의 상태 정보도 가공 할 수 있다. 일반적으로 전달 함수의 추정은 디컨볼루션(Deconvolution)이라는 수학적 과정을 거치는데, 이는 신호의 전파 경로에서 발생한 왜곡의 영향을 제거 하는 신호 처리의 과정으로 지진 관측, 지층 탐사, 및 수중 신호처리 등에서 많이 활용 되고 있다. 선형 시불변(LTI : Linear Time Invariant) 시스템에서의 출력은 시스템의 임펄스 응답과 입력과의 컨볼루션(Convolution) 적분 형태로 나타난다. 즉 입력과 시스템의 임펄스 응답, 그리고 출력의 세 신호 가운데 두 신호를 알 수 있을 경우 그들의 관계로부터 나머지 한 신호를 추정 할 수 있다. 따라서 입사파와 배터리를 투과한 파를 획득하게 되면 배터리의 전달 함수를 추정 할 수 있다. 그러나 이의 구현 과정에 있어 시간 영역에서의 디컨볼루션은 수학적으로 매우 어려운 문제이다.

그러므로 디컨볼루션은 일반적으로 주파수 변환 영역에서 수행되며 아래와 같은 과정을 거쳐 배터리의 전달 함수를 구할 수 있다.

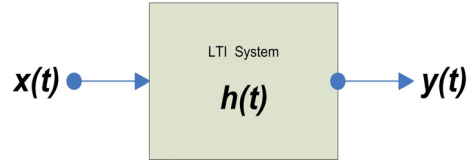


그림 3. 전달 함수 모델
 Fig. 3. Transfer function model

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau = h(t) * x(t) \quad (1-1)$$

(* : 컨볼루션)

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f) \quad (1-2)$$

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (1-3)$$

$$h(t) = \text{IFT}[Y(f)/X(f)] \quad (1-4)$$

단일 배터리에 대한 전달 함수는 그림 3.에서와 같이 진행이 된다. 복수 직렬 배터리에 대한 전달 함수의 추정은 원격 측정, 원격 탐지라 불리는 리모트 센싱 기술을 활용하여 추정을 할 수 있다. 리모트 센싱은 시험체에서 발생하는 신호를 이용하여 시험체의 상태를 파악하는 Passive 센싱, 그리고 시험체에 특정 신호를 인가하고 반사되어 돌아오는 반사파의 시간 지연을 통해 시험체의 상태를 파악하는 Active 센싱의 두 가지 방식이 있다. 반사파와 입사파를 이용하는 Active 센싱 방식을 이용한다면 그로부터 직렬로 연결된 시스템에서도 중간에 있는 배터리의 SoC 추정을 가능케 할 수 있다.

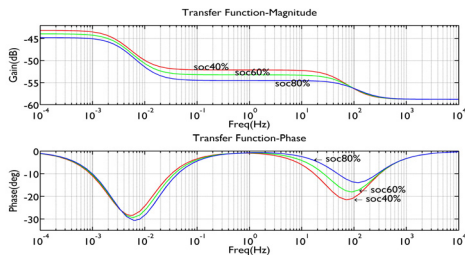
그림 1.의 (c) 배터리 등가 임피던스 모델로부터 배터리의 전달 함수는 식 (2)와 같이 정의되며, 아래 표 1.은 공칭 전압 3.8V와 15Ah의 정격 용량을 갖는 리튬 배터리를 등가 임피던스 모델에 적용 시켰을 때, SoC 변화에 따른 각각의 세부 파라미터를 나타내었다.^[7,8]

$$H_{(s), Batt} = R_s + \frac{R_{ct}}{sR_{ct}C_{dl} + 1} + \frac{R_d}{sR_dC_d + 1} \quad (2)$$

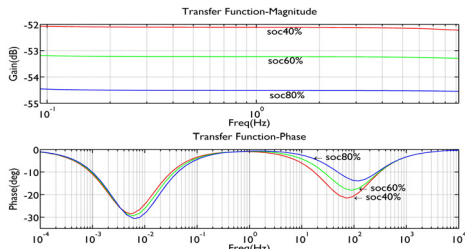
표 1. 임피던스 모델 세부 파라미터
Table 1. Impedance Model Detail Parameters

	SoC 40%	SoC 60%	SoC 80%
R_s [Ω]	1.15m	1.15m	1.15m
R_{ct} [Ω]	1.33m	1.03m	0.73m
C_{dl} [F]	2.39	2.39	2.39
R_d [Ω]	4.50m	4.20m	3.90m
C_d [F]	11000	11000	11000

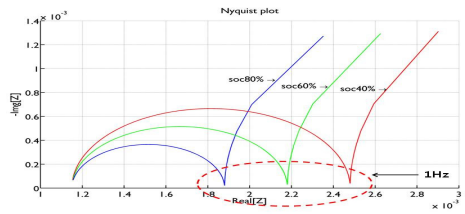
식 (2)의 배터리의 전달 함수를 보드 선도 및 나이퀴스트 선도로 나타내었을 때 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있다.



(a) 배터리의 전달 함수



(b) 배터리의 전달 함수(확대)



(c) 나이퀴스트 선도

그림 4. 배터리 전달 함수
Fig. 4. Battery Transfer Function

그림 4의 배터리 전달 함수를 보면 배터리 SoC 변화에 가장 많은 영향을 미치는 R_{ct} , R_d 가 검출되는 1Hz의 주파수 대역에서 가장 눈에 띄게 변화 하며, SoC의 각각의 변화량에 따른 이득은 1dB의 차이를 보인다.

IV. 실험 및 결과

3절에서 보였듯이 배터리의 SoC는 R_{ct} , R_d 가 검출되는 1Hz의 저주파수 대역에서 가장 크게 변화한다. 하지만 1Hz의 주파수 대역은 매우 낮은 대역으로 해당 주파수를 관측하기 위해서는 다소 높은 분해능의 측정 장비를 필요로 한다. 본 연구에서는 입력 신호로는 0.2V의 피크 값을 갖는 신호를 인가하였으며 실험에 사용된 장비로는 Tektronix AFG3102임의 신호발생기와 신호의 획득을 위해 National Instruments NI9201 ADC를 사용하였다. 실험에 사용된 회로와 입, 출력 신호를 아래 나타내었다.

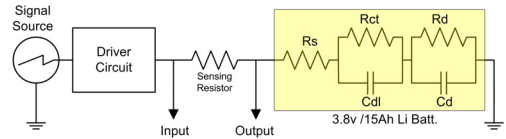
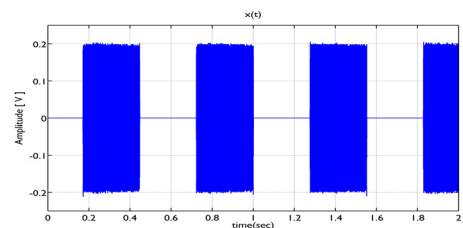
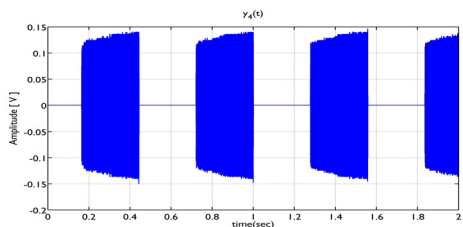


그림 5. 테스트 회로
Fig. 5. Test Circuit



(a) 입력 신호



(b) 출력 신호(SoC 40%)

그림 6. 입력 및 출력 신호
Fig. 6. Input and Output Signal

그림 6.에서는 톤버스트 입력 신호와 그에 대한 응답인 출력 신호를 나타내었다. 응답 신호에 대하여 보다 정확한 분석을 위해 스펙트럼 추정을 진행 하였다. 스펙트럼 추정을 위해 주파수 영역 입,출력 신호는 그림 7.과 같다.

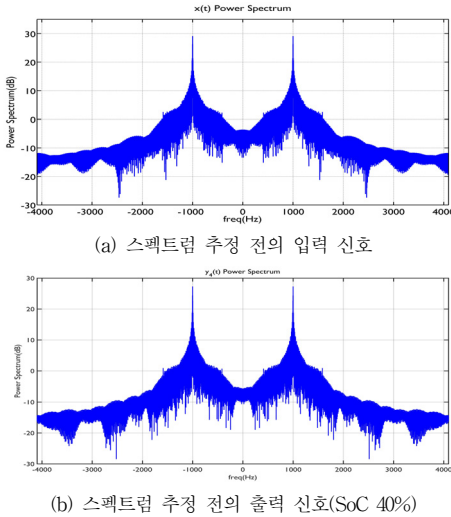


그림 7. 입력 및 출력 신호의 스펙트럼
 Fig. 7. The Spectrum of Input and Output Signal

스펙트럼의 추정은 Welch's Method를 이용하여 진행하였다. Welch's Method는 시간 영역의 데이터를 50%, 66%, 75% 등의 Overlap된 구간으로 나눈 뒤 각각의 구간에 대해 윈도우를 씌어 그에 대한 스펙트럼을 구하고 난 후 스펙트럼을 평균화 하는 방식이다. 본 실험에서는 Overlapping을 50%로, 윈도우는 Hanning을 사용하여 스펙트럼 추정을 진행 하였고 Welch's Method는 식 (3)와 같이 정의 된다.

$$E\{\widehat{P}_{welch}\} = \frac{1}{F_s L_s U} \int_{-F_s/2}^{F_s/2} P_{xx}(p) |W_R(f-p)|^2 dp \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} |w(n)|^2 \quad (4)$$

이때 F_s 는 샘플링 주파수, L_s 는 데이터 세그먼트 U 는 윈도우 정규화 상수 그리고 P_{xx} 는 그림 9.의 각 세그먼트의 전력 스펙트럼, W_R 는 윈도우를 나타낸다.

그림 7.의 입, 출력 신호에 대해 Welch's Method를 적용 하였을 때의 스펙트럼 추정 결과는 그림 8. 와 같다.

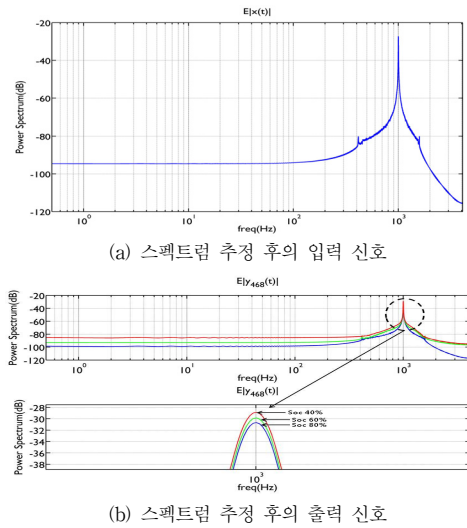


그림 8. 입력 및 출력 신호의 스펙트럼 추정 결과
 Fig. 8. The Spectrum Estimation of Input and Output Signal

그림 8.에서 볼 수 있다 싶이 기존 1Hz의 대역에서 나타났던 배터리 SoC의 변화량이 1kHz의 주파수 대역에서 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 각각의 SoC 변화량에 있어 각각 1dB의 차이를 가졌다. 이로 미루어 볼 때 실제 실험에 사용 된 전달 함수는 그림 4.에서의 전달 함수와 유사하게 구성되어 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

배터리의 SoC는 1Hz 주파수 대역에서 가장 큰 변화량을 보인다. 본 논문에서는 저주파수 대역의 단점을 보완하고자 톤버스트 신호를 사용해서 해당 주파수 대역을 1kHz의 주파수대역으로 이동시켜 배터리에 대한 응답 신호로 SoC의 변화를 관측 하였다. 정확한 SoC의 변화 관측을 위해 응답 신호를 주파수 영역에서 스펙트럼 추정을 수행하였다. SoC가 40%, 60%, 80%로 변화 할 때마다 각각 1dB의 이득차이를 측정할 수 있어, 전달함수에 따른 Soc의 측정이 가능함을 검증하였다.

지항 및 커패시터 성분으로 구성된 배터리의 내부 등가 임피던스 모델에 따라 직렬로 연결된 배터리에 대한 전달 함수 추정 과정에서 위상에 관한 분석을 수행 한다면 새로운 배터리의 SoC 측정 방식으로 발전 할 수 있을 것으로 기대 된다.

References

- [1] Sang-Hyun Lee, "Development of Fuzzy controller for battery cell balancing of agricultural drones", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 17 No.5, PP. 199-208, Oct. 31, 2017
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.5.199>
- [2] "IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid(VRLA) Batteries for Stationary Applications", IEEE std. 1188-2005
DOI: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2006.99014>
- [3] Ki-Wook Jang, Gyo-Bum Chung, "A SOC Estimation using Kalman Filter for Lithium-Polymer Battery", Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 17 No. 3, June 2012
DOI: <https://doi.org/10.6113/tpke.2012.17.3.222>
- [4] Jong-Hak Lee, Woojin Choi, "Novel State-of-Charge Estimation Method for Lithium Polymer Batteries Using Electrochemical Impedance Spectroscopy", Journal of Power Electronics, Vol. 11 No.2, March 2011
DOI: <https://doi.org/10.6113/jpe.2011.11.2.237>
- [5] Dong-Yoon Noh, "A Study on the SOH Estimation Method of Lithium Ion Batteries Using OCV", Department of Electrical Engineering Graduate School, Korea University, 2011
- [6] T. L. Kulova, V. A. Tarnopol' skii, A.M. Skundin, "The Impedance of Lithium-ion Batteries", Russian Journal of Electrochemistry, Vol. 45, No. 1, PP. 38-44, 2009
DOI: <https://doi.org/10.1134/s1023193509010066>
- [7] Seung-Han Lee, Byoung-Hoon Kim, Hong-Jong Lee, Byung-Hyun Lee, Teae-Hoon Kim, Hyun-Sik Song, "A Study on the measurement method of the battery resistance", Journal of Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 2013 No.7, 2013
- [8] Tae-Hoon Kim, Dong-Hyun Shin, Jin-Beom Jeong,

Baek-Haeng Lee, Hyun Sik Song, Byoung-Hoon Kim, Hee-Jun Kim, "Study on the modeling methods for high power lithium battery", Journal of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 2011 No. 11, 2011

저자 소개

최 경 수(준회원)



- 2017년 : 공주대학교 정보통신공학부 학사 졸업
 - 2017년 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 정보통신공학과(공학석사과정)
- <주관심분야 : 신호처리, 임베디드시스템>

강 대 수(정회원)



- 1983년 : 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1992년 : 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년 ~ 현재 : 공주대학교정보통신공학부 교수.

<주관심분야 : 디지털통신, 이동통신, 인지신호처리>