The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 19, No. 4, pp.99-104, Aug. 31, 2019. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.4.99
JIIBC 2019-4-15

위상응답에 의한 이차전지의 진단에 관한 연구

A Study on the Diagnosis of Secondary Battery by Phase Response

박승곤*, 강대수**

Seung-Gon Park*, Dea-Soo Kang**

요 약 위상응답에 의해 이차전지의 SOH를 측정하기 위하여 유도성 소자의 사용을 제안하였다. 이차전지의 Randles 등가 모델에 대하여 모의 실험한 결과 부하로 사용된 유도성 소자는 고역응답특성을 가지며 최대 위상응답주파수 대역을 증가시킨다. 이차전지에 대한 위상응답특성이 잘 나타나는 주파수대역을 획득하기 위해 유도성 소자의 인덕턴스 값을 변화시켜 위상응답을 측정하였으며, 631Hz에서 최대 위상응답을 보이는 33uH의 유도성 소자를 사용하였다. 각각 다른 SOH를 가진 이차전지에 대하여 위상응답을 측정한 결과 SOH 20% 당 위상응답은 약 3.7° 의 차이를 보여 유도성 소자에 대한 위상측정에 의해 이차전지의 SOH를 진단할 수 있음을 보였다.

Abstract It was proposed the use of an inducive element to measure the SOH of a secondary battery by phase response. As a result of simulating the Randles equivalent model of a secondary battery, the inductive element used as the load has a high response characteristic and increases the maximum phase response frequency band. In order to obtain the frequency band in which the phase response characteristic of the secondary battery is well observed, the phase response was measured with the change of the inductance value of the inductive element, 33uH,49mohm inductive element with the maximum phase response at 631Hz was used. The phase response measurements for secondary battery with different SOH showed that the phase response for each 20% of SOH showed a difference of about 3.8(degree), enabling the SOH diagnosis of secondary battery by the phase measurement for the inductive element.

Key Words : battery, Inductive element, phase response, State of Charge, State of Health, bode plot, nyquist plot

Ⅰ. 서 론

무정전 시스템(UPS), 전기 자동차, ESS(Energy Storage System) 등의 시스템에서 전기에너지를 저장하여 사용하는 배터리는 시스템의 동력원으로써 중요한 요소이다. 높은 전압을 얻기 위한 직렬 배터리 시스템에서는 하나의 배터리라도 상태가 나쁠 경우 공급전력의 품질저하는 물론 화재 등 사고의 위험이 존재한다. 따라서 안정적인

*준회원, 공주대학교 대학원 정보통신공학과
**정회원, 공주대학교 정보통신공학부(교신저자)
접수일자 2019년 5월 29일, 수정완료 2019년 7월 2일
게재확정일자 2019년 8월 2일

Received: 29 May, 2019 / Revised: 2 July, 2019 /
Accepted: 2 August, 2019
**Corresponding Author: dskang@kongju.ac.kr
Dept. Division of Information & Communication Engineering ,Kongju National University, KOREA

시스템을 유지하기 위하여 정확한 배터리의 상태 진단은 필수적이다. 배터리 상태는 전압, 전류, 임피던스, 온도 등의 파라미터를 측정하여 충전 상태(SOC : State of Charge) 또는 건강 상태(SOH : State of Health)로 진단된다. SOC는 완전 충전 상태를 100%, 완전 방전 상태를 0%로 배터리에서 사용 할 수 있는 용량의 비율을 %로 나타낸 것이며 온도에 대해 매우 민감하게 반응하는 배터리의 상태 파라미터이다.[1] SOH는 출고 시점을 100%로 놓았을 때 충·방전 횟수, 충전전압, 과충전 및 과방전, 방전심도(DOD : Depth Of Discharge)등 여려가지 요인으로 인해 SOH가 감소하게 되는데, 배터리 사용 시 SOH가 좋지 않을 경우의 출고시점의 배터리보다 저장되는 용량이 적어서 SOH가 좋은 배터리보다 방전이 빨리 진행되며 다른 배터리에 영향을 미치거나 폭발 사고로 이어질 수 있어 용량에 대한 정확한 SOC를 파악하기 위해서 SOH의 측정은 중요하다.[2] 배터리 상태에 대한 응답 특성을 얻기 위하여 여러가지 방법이 연구되었지만,[3,4,10] 현재 가장 효과적인 방법으로 전기화학적 임피던스 분광법 (Electrochemical Impedance Spectroscopy : EIS)[5]이 알려져 있다. EIS는 0.1Hz ~ 1KHz 주파수 대역에서 배터리를 측정하여 얻어지는 임피던스를 통해 배터리의 충전 상태 및 건강 상태를 파악한다.[6] 임피던스를 저주파 대역에서 측정하게 되면 측정시간이 오래 걸리고 배터리가 시변시스템으로 해석됨으로서 측정장치가 배터리에 부하로 작용하는 과정에서 SOH측정에 영향을 미칠 수 있는 단점 등이 존재한다. 이러한 문제점을 해소하려면 좀 더 높은 주파수대역에서 배터리의 상태를 관찰함으로서 측정시간을 줄여야 하는데 본 연구에서는 유도성 소자를 배터리의 직렬부하로 사용하여 좀 더 높은 주파수 대역에서 야기되는 위상 이상량을 측정함으로서 배터리의 상태를 진단하는 방법을 제안한다.

II. 위상검출을 위한 배터리의 부하 모델링

배터리의 등가모델을 보면 배터리는 용량성 리액턴스를 가지는 장치이므로 배터리에 직렬로 유도성 소자를 사용하게 되면 유도성 소자의 크기에 따라서 공진특성을 유도 할 수 있다. 이 과정에서 얻어지는 전달함수를 해석하면 배터리의 상태에 관한 유용한 파라미터를 도출 할 수 있는데, 본 논문에는 LC공진에 의해 야기되는 위상응답을 측정하여 배터리의 상태를 진단하고자한다. 전달함수를 산출하기 위한 배터리의 등가 모델[7,8]로는 내부 파라미터의 수가 적어 비교적 계산이 빠르고 유도성 소자에 대한 특성이 잘 나타날 수 있는 Randles 모델을 사용하였는데, 그림 1의 A에 배터리의 Randles 등가모델에 유도성소자를 부하로 사용한 전달함수 모델을 나타내었다. 그림 1의 B는 종래의 임피던스 기반 진단방식에서 사용하는 부하저항이 전류측정소자(shunt)역할을 하는 모델을 나타낸 것이다.

Randles 모델의 파라미터는 Rs, Rp, Cp 로 구성되는데 Rs는 배터리의 전해질 및 외부 접촉 등의 상태에 따른 저항이며 배터리 SOH에 직접적인 영향을 미치는 파라미터이다. Rp는 배터리 내부 전극의 전리현상에 의한 저항성분이고, Cp는 배터리 용량에 대한 것이며 SOC에 영향을 미치는 파라미터이다.[9]

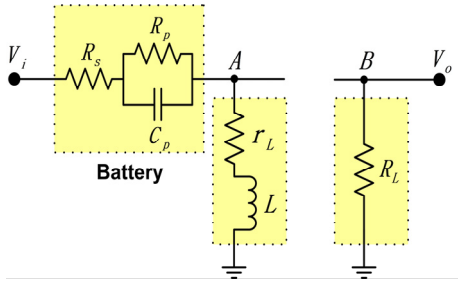

그림 1. 부하에 따른($A: L, B: R_L$) 배터리 모델
Fig. 1. Battery model with Load ($A: L, B: R_L$)

그림 1에서 보면 A와 B 경우 모두 Randles 등가모델에 부가되면 고역통과필터의 구조를 가지지만 B의 경우는 배터리용량에 따라 매우 큰 값을 가지는 C_p에 대응하여 작은 값의 R_L을 사용하여야 차단주파수가 증가한다. 이 경우 측정 전류는 커지지만 측정 전압은 매우 작아지게 되어 잡음 등에 의하여 측정 오차가 커지게 된다.

이에 반해 A의 경우는 L이 측정 교류신호에 대하여 부하역할을 하고 L의 내부저항은 보편적으로 매우 작은 값을 가지므로 배터리의 특성에 대한 교류응답주파수 대역은 더 높아진다. 다만 이 경우에 L의 영향으로 순수한 배터리의 임피던스를 측정하지는 못하지만 위상응답을 비롯하여 배터리의 상태에 대한 정보는 상대적으로 높은 주파수에서 획득 할 수 있다.

수식 (1)에 그림 1의 A-유도성부하에 의한 배터리 모델의 전달함수 $H_A(w)$를 산출하였고, 수식 (2)에 그림 1의 B-임피던스 측정을 위한 전달함수$H_B(w)$를 비교하였다.

$$H_A(w) = \frac{r_L + X_L}{Rs + R_p \| Xc_p + r_L + X_L} \quad (1)$$

$$= \frac{(jw)^2 CLR_p + (jw)(CR_p rL + L) + rL}{(jw)^2 CLR_p + (jw)(CR_s R_p + CR_p rL + L) + R_s + R_p + rL}$$

$$H_B(w) = \frac{R_L}{Rs + R_p \| Xc_p + R_L} \quad (2)$$

배터리 등가모델 분석결과를 토대로 $L = 33(\mu H)$, $r_L = 49(m\Omega)$의 유도성 소자를 사용한 전달함수의 모의실험 결과 및 이와 비교하기 위하여 임피던스 측정 기반의 모델에서 $R_L = 1(\Omega)$의 부하저항으로 전달함수를 모의실험 한 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 모의실험에는 2(V), 400(Ah)의 사양을 가진 배터리에 대하여 BRS사의 BIM2 측정장비로 측정한 등가 회로정수로서 $R_S = 207.826(m\Omega)$, $R_P = 13.987(m\Omega), C_P = 13.943(F)$를 사용하였다.

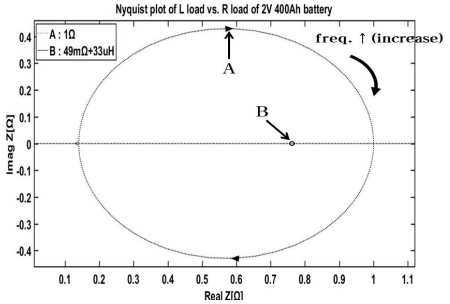

그림 2. 배터리 부하($A: L, B: R_L$)에 따른 나이퀴스트 선도
Fig. 2. Nyquist plot of battery load ($A: L, B: R_L$)

그림 2는 수식 (1), (2)의 전달함수를 복소평면에 주파수에 대한 실수, 허수의 좌표를 나타낸 나이퀴스트 선도이다. 나이퀴스트 선도에서 배터리의 응답 특성으로 원 모양이 나타나는데 복소평면의 원점에서 원의 허수축이 가장 큰 점까지의 거리를 통해 최고 위상과 진폭을 확인할 수 있다.

배터리에 대한 응답 주파수는 실수축에서 원의 가장 왼쪽의 좌표가 0Hz의 저주파 대역이며 오른쪽으로 이동될수록 응답 주파수대역이 증가한다. 그림에서

B가 가리키는 원은 R_L에 대한 배터리의 응답 특성이다. 원의 허수축이 가장 큰 점에서 최고 위상을 확인할 수 있는데 그 크기는 매우 작다. 또한 그림의 A는 유도성 소자(L, r_L)에 대한 배터리의 응답 특성인데, 큰 원의 궤적을 추적하면 유도성 소자에 대한 위상추이를 관찰 할 수 있으며 B와 비교했을 때 위상의 크기가 증가함을 알 수 있다. 배터리의 진폭과 위상응답에 대한 주파수 대역을 확인하기 위해 그림 3에 배터리의 응답 특성에 대한 보드선도를 나타내었다.

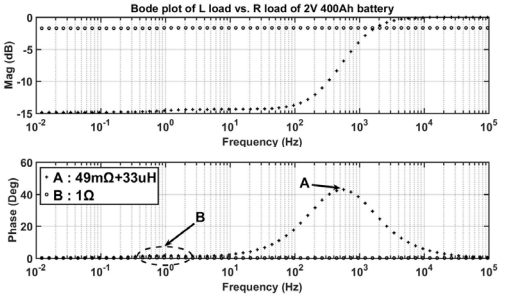

그림 3. 배터리 부하($A: L, B: R_L$)에 따른 보드 선도
Fig. 3. Bode plot of battery load ($A: L, B: R_L$)

그림 3에서 B 부분은 그림1의 B 경우 R_L에 대한 위상응답 특성이고, A 부분은 그림 1의 A 경우 L, r_L에 대한 위상응답 특성이다. B의 경우 배터리의 응답 특성은 고역 통과 특성을 가진 차단주파수 약 1Hz 대역에서 위상응답이 나타나지만, 진폭응답 특성과 함께 그 값이 매우 작음을 관찰 할 수 있다. 이와 비교하여 A가 가리키는 유도성 소자를 부가한 배터리의 진폭, 위상응답은 고역 통과 특성을 가지는 것은 동일하지만 보다 증가한 주파수 대역에서 차단 주파수가 형성된다. 이는 유도성 소자를 부가하였을 때, 측정하기 용이한 주파수 대역을 선정할 수 있고 해당 주파수대역에서 최고 위상 값이 증가하는 결과로 해석되어 배터리의 상태 진단이 가능함을 보인다.

Ⅲ. 유도성 부하에 대한 위상응답

배터리의 상태를 진단하기 위한 부하로서 유도성부하를 사용하면 측정주파수가 증가하는 모의실험결과로부터 유도성부하의 크기에 대한 위상응답 특성을 모의실험 하였다. 부하로 사용된 유도성 소자의 인덕턴스 성분(L)이 각각 $22(\mu H)$, $33(\mu H)$, $47(\mu H)$에 대하여 배터리 응답 특성을 모의실험 하였는데 그림 4는 유도성 소자의 인덕턴스 성분 변화에 대한 배터리 응답 특성의 보드선도이다.

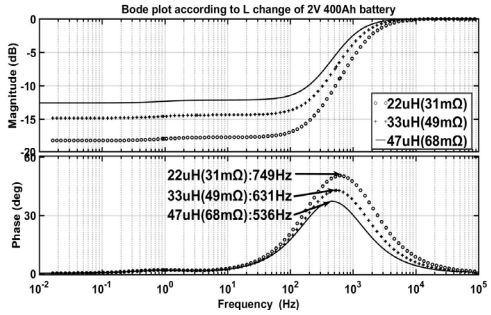

그림 4. 유도성 소자 변화에 따른 보드 선도
Fig. 4. Bode plot of various inductive load

표 1. 유도성 소자에 대한 최고 위상응답 주파수
Table 1. Maximum Phase response frequency for an inductive load.

유도성부하(μH)	22	33	47
내부저항(mΩ)	31	49	68
주파수(Hz)	749	631	536
위상(°)	56	48.9	43.5

각각의 인덕턴스에 대하여 최대 위상응답을 보이는 주파수는 표 1에 나타내었는데 유도성 소자의 인덕턴스 성분이 증가함에 따라 응답 주파수 대역은 감소하였다. 이에 대해 최대 위상도 감소하는 경향을 보이는데 이는 유도성소자의 내부저항이 증가한 영향이다.

유도성소자의 내부저항(r_L)은 인덕턴스(L)에 대하여 배터리의 내부저항(R_S)에 더해지는 양이므로 유도성 소자를 고정시키면 해당 주파수대역에서 배터리의 내부저항에 따른 위상응답을 보이는 것으로 해석된다.

즉, 각각 상태가 다른 배터리에 대하여 위상응답을 측정하였을때 배터리의 내부저항 등 상태에 따라 다른 위상 이상량을 보일 것이고, 이를 이용하여 배터리의 상태를 진단할 수 있다.

Ⅳ. 실험 및 고찰

시료로 사용된 배터리는 ATLASBX사의 KBX2400 납축전지를 사용하였는데 BRS사의 BIM2 장비를 사용하여 SOH가 100%, 80%, 60%로 측정된 배터리를 표본으로 하여 배터리의 Randles 모델 파라미터를 측정하였다. 배터리의 부하로는 631(Hz)에서 최고 위상응답을 보이는 33(μH)의 인덕턴스를 가지는 유도성 소자를 사용하였는데, 22(μH)의 749(Hz)에서는 주파수는 높아지지만 진폭응답의 감쇠는 커지므로 위상을 측정하는데 오차의 요인이 될 수 있기 때문이다.

표 2. 배터리 모델 및 유도성 소자 파라미터
Table 2. Parameters of Battery and inductive load

Parameters	Value		
SOH()	100	80	60
Rs($m\Omega$)	129.175	207.826	300.254
Rp($m\Omega$)	2.643	13.987	23.8967
Cp(F)	18.164	13.943	9.818
L(μH)	33		
r_L($m\Omega$)	49		

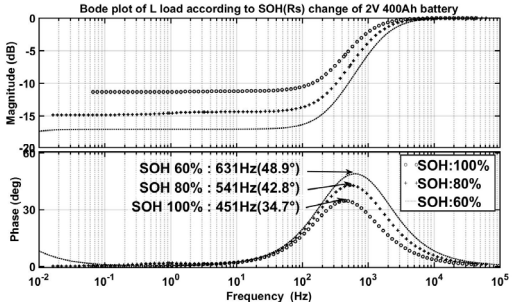

그림 5. 배터리 SOH에 따른 위상응답 실험
Fig. 5. Simulation of Phase response to battery SOH

표 2는 SOH가 상이한 배터리의 내부 파라미터와 위상측정에 사용한 유도성 소자의 등가정수을 나타낸 것이다. 표 2의 파라미터를 가지는 각 배터리에 대하여 위상응답을 보기 위한 보드선도는 그림 5와 같다.

표 3. 배터리 SOH에 따른 위상응답 실험 결과
Table 3. Simulation of Phase response to battery SOH

SOH(%)	100	80	60
주파수(Hz)	451	541	631
위상(°)	34.7	42.8	48.9
위상 편차(°)	8.1	6.1	

표 3은 SOH에 따라 최대 위상값을 보이는 주파수를 정리한 것인데 SOH 20(%) 당 6°~8°의 위상차를 보인다. 최대위상을 보이는 주파수에 편차가 발생한 것은 SOH에 따라 배터리 내부용량 C_p의 변화에 기인한 것이다.

실험에 사용된 위상응답측정장치는 LIA(Lock-In Amplifier)를 사용하여 설계 제작하였는데 그림 6, 7에 블록도와 제작한 장치를 나타내었다. 그림 6의 x, y는 각각 실수, 허수 값을 출력하는데, 이로부터 배터리의 위상응답을 산출할 수 있다.

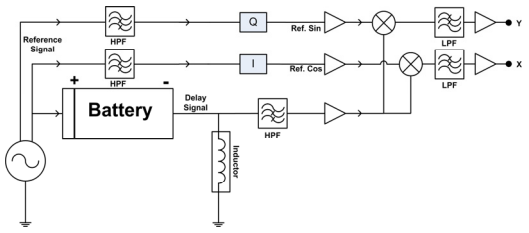

그림 6. 배터리 위상응답측정장치 블럭도
Fig. 6. Phase response measurement device blockdiagram

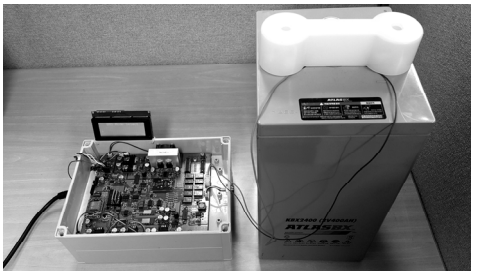

그림 7. 위상응답측정장치에 의한 배터리 진단
Fig. 7. Battery diagnosis by phase response measurement device

그림 8은 배터리에 인가하는 신호의 주파수를 변경하면서 측정한 배터리 시료의 위상응답측정 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 인가 주파수 600(Hz) 부근에서 배터리의 SOH가 낮아짐에 따라 위상응답은 커지는 특징을 보이는데 이는 그림 5의 모의실험과 같은 결과이고 다만 위상의 크기는 신호선, 커넥터, 스위칭 소자의 영향으로 다소 차이를 보이는 것으로 추정된다.

실제 배터리 진단장치에서는 배터리에 인가하는 신호의 주파수를 가변시켜 측정하는 것은 측정시간등 측면에서 비효율적이므로 인가주파수를 고정하여 측정 할 필요가 있는데 표 4는 배터리의 인가주파수를 600(Hz)로 고정하여 위상응답을 측정한 결과이다. 결과를 보면 배터리의 SOH가 감소함에 따라 위상응답은 증가하고, SOH 20(%) 당 약 3.7°의 차를 보인다.

보편적으로 배터리의 SOH가 80(%) 전후하여 배터리를 교체하게 되는데, 제작된 위상측정기의 정밀도가 ±0.15° 미만인 것을 고려해 보면(순천향대 신뢰성평가센터 인증, 성적서번호 TR-A-18-046) 배터리의 SOH에 대하여 약1.58(%)의 분해능으로 진단이 가능 할 것으로 해석된다.

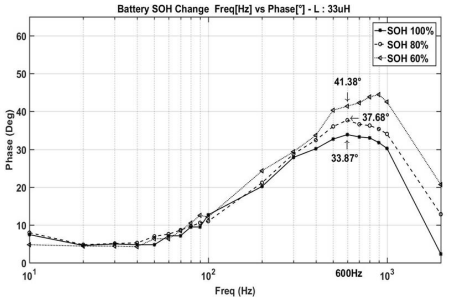

그림 8. 배터리 SOH에 따른 위상응답
Fig. 8. Phase response of various battery SOH

표 4. 배터리의 위상응답 측정 결과
Table 4. Measurement results of battery phase response

SOH(%)	100	80	60
위상(°)	33.87	37.68	41.38
위상 편차(°)	3.81	3.7	

V. 결 론

교류신호에 대해 부하로 작용하는 유도성 소자를 배터리의 부하로 사용하여 위상응답을 측정함으로서 배터리의 SOH를 진단하는 방법을 제안하였다. 유도성 소자의 효과로 위상응답이 나타나는 주파수 대역을 높일 수 있어 위상측정시간을 단축하고 위상측정의 정밀도를 높일 수 있는 장점이 있다. 더욱이 임피던스 측정을 기반으로 하는 방식과 달리 단일 주파수에서만 위상을 측정하게 되므로 더욱 측정시간을 단축시킬 수 있고 위상 측정의 특징으로 잡음에 강한 측정방식이 될 수 있다.

각각 다른 SOH를 가진 이차전지에 대하여 위상응답을 측정한 결과 SOH 20% 당 위상응답은 약 3.7° 의 차이를 보였고 이는 약 1.58%의 분해능으로 SOH를 측정할 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 차후 위상응답이 나타나는 최적 주파수대역에 대응하는 유도성 소자의 최적 값에 대한 연구를 진행함으로서 배터리 진단의 효율성과 정확성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Dae-Soo Kang, Jeong-Bong You, "Battery SoC

measurement by Transfer function Estimation", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.55, NO.3, p375-380 March 2018
DOI:https://doi.org/10.5573/ieie.2018.55.3.117

[2] Seung-Ho Lee, Min-Kee Park, "Battery State of Charge Estimation Considering the Battery Aging",j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.18,No.3,298~ 304,September 2014
DOI:https://doi.org/10.7471/ikeee.2014.18.3.298

[3] 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

[4] Kiwook jang, Gyo-Bum Chung, "A SOC Estimation using Kalman Filter for Lithium-Polymer Battery", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.17, No. 3, June 2012
DOI:http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2012.17.3.222

[5] 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: http://www.riss.kr/link?id=A82541399

[6] Kyoung-Soo Choi, Dea-Soo Kang, "A Study on SoC Measurement of Battery by Spectrum Estimation of Tone Burst Response Signal", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC) Vol. 18, No. 1, pp.217-222 Feb. 28, 2018.
DOI https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.1.217

[7] 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", Jounal of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 2011 No. 11, 2011

[8] Dong-Hyun Shin, Jin-Beom Jeong, Tae-Hoon Kim, and Hee-Jun Kim, "Modeling of Lithium Battery Cells for Plug-In Hybrid Vehicles", Journal of Power Electronics, Vol. 13, No. 3, May 2013
DOI:http://dx.doi.org/10.6113/JPE.2013.13.3.429

[9] Kyoung-Soo Choi, "A Study on the Resonant Phase Discrimination of Secondary Battery and Inductive Load for SOH Measurement", Master Thesis of Kongju National University, 2019.
DOI:http://www.riss.kr/link?id=T15025480

[10] Kyung-Sang Ryu, Byungki Kim, Dae-Jin Kim, Moon-seok Jang, Hee-sang Ko, Ho-Chan Kim, "A State-of-Charge estimation using extended Kalman filter for battery of electric vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 10 pp. 15-23, 2017
DOI:https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.10.15

저 자 소 개

박 승 곤(준회원)

- 2018년 공주대학교 정보통신공학부 학사 졸업
- 2018년 ~ 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~현재공주대학교정보통신공학부 교수.
- 주관심분야 : 디지털통신, 이동통신, 인지신호처리