

# 배터리 셀 AC-IR 측정 정확도 향상을 위한 SOGI PLL 기반 Time-Domain 임피던스 측정 기술

김성중<sup>1</sup>, 정재범<sup>2</sup>, 박화평<sup>1</sup>  
 금오공과대학교 제어및로봇<sup>1</sup>, 한국산업기술시험원 에너지기기센터<sup>2</sup>  
 e-mail: hppark@kumoh.ac.kr

## SOGI PLL-based time-domain impedance measurement technology to improve battery cell AC-IR measurement accuracy

SeongJong Kim<sup>1</sup>, Jaebeom Jung<sup>2</sup>, Hwa-Pyeong Park<sup>1</sup>  
 control and robotics, Kumoh National Institute of Technology<sup>1</sup>  
 Korea Testing Laboratory<sup>2</sup>

### 요약

전기자동차 및 배터리 어플리케이션의 시장규모가 커지며 배터리의 안정성과 효율성 확보가 필요적으로 중요해지고 있다. 본 논문에서는 배터리 상태를 추정할 수 있는 배터리 임피던스의 측정 기법을 다루며 정확도 향상을 위해 SOGI PLL를 접목한 배터리 임피던스 측정 기법을 제안한다.

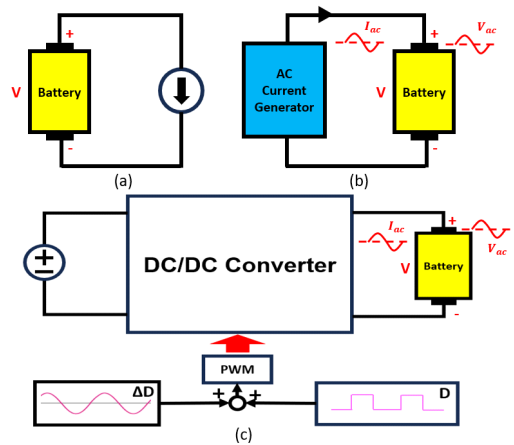
### 1. 서론

최근 전기자동차 시장 규모가 급속도로 커짐에 따라 배터리 수요가 증가하고 있으며, 추가적으로 친환경 경제 측면에서 신재생에너지와 같이 사용되는 ESS(에너지 저장장치)와 배터리를 사용한 어플리케이션의 관심이 커지고 있다. 하지만 배터리 내부 과열 및 단락의 위험성과 사용 후 배터리인 폐배터리 처리 문제가 발생하고 있다. 배터리 임피던스 측정을 통해 내부 과열 및 단락을 초기에 감지할 수 있으며, SOC(State of Charge) 및 SOH(State of Health)를 추정 가능하여 효율적인 충전을 통해 배터리 수명 연장을 하여 폐배터리 문제를 해결 가능하다.

기존에는 DC 임피던스 측정기법과 AC 신호를 직접적으로 주입하는 AC 임피던스 측정기법과 DC/DC Converter의 듀티비(D)에 특정 사인파를 만들어 AC 신호를 간접적으로 주입하는 형태의 EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) 분석 기반인 AC 임피던스 측정기법이 있다. DC 임피던스 측정기법은 방전을 시켜 수명을 단축이 발생하며 DC 임피던스만 측정 가능하여 이전 문제를 해결이 안되는 단점이 있다. 직접적 AC 신호 주입 형태의 AC 임피던스 측정기법은 추가적인 보조장치가 필요하기 때문에 비교적 복잡하며 비용이 비싼 단점이 있다.[1]

DC/DC Converter를 사용하는 AC 임피던스 측정 기법은 비교적 간단하여 비용이 저렴하며 수명단축이 발생하지 않는

장점이 있기에 본 논문에선 DC/DC Converter를 사용한 AC 임피던스 측정기법을 기반하고 있으며 측정 정확도를 향상시키기 위해 SOGI(Second-Order Generalized Integrator) PLL(Phase Locked Loop)를 적용한 최적화된 AC 임피던스 측정 기법을 제안한다.



[그림 1] (a) DC 임피던스 측정 회로 개략도, (b) AC 신호 주입 기반 AC 임피던스 측정 회로 개략도, (c) DC/DC Converter 기반 AC 임피던스 측정 회로 개략도

### 2. 배터리 내부 등가회로

#### 2.1 주파수 대역에 따른 배터리 임피던스

그림 2에서 표시된 것처럼 배터리 내부 회로는  $L_e$ ,

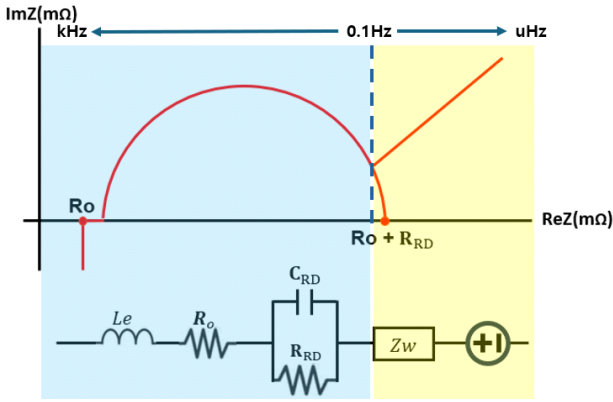


그림 2 배터리 내부 등가회로 및 EIS 그래프

옴의 저항을 의미하는  $R_o$ , 충전상태를 나타내는 기준이 되는 Randles 회로인  $C_{RD}$ ,  $R_{RD}$ , 와버그 저항  $Z_W$ 으로 이루어져 있다. 측정하는 주파수 대역에 따라 묘사되는 회로가 다르며, 본 연구에서 다루는 주파수 대역에서는  $Z_W$ 를 무시하며, 배터리 임피던스는 식(1)과 같다.

$$Z(s) = Z_{Le} + R_o + \frac{R_{RD}}{1 + sC_{RD}R_{RD}} \quad (1)$$

### 3. AC 임피던스 측정 기법

DC/DC Converter의 듀티비에 리플성분을 주입하여 DC성분과 AC 성분을 만들어주며 임피던스를 측정하기 위해 AC 신호만 사용하게 된다. 그림 3과 같이 3단계 대략 나눌 수 있다.[2]

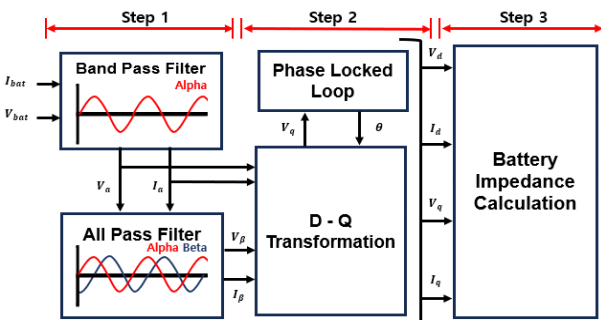


그림3 전반적인 기준 임피던스 측정 개략도

첫 번째로 배터리 전압/전류 데이터에서 원하는 AC 성분만 추출하기 위해 BPF를 통해 Alpha 성분을 얻으며, APF를 통해 위상  $90^\circ$  지연된 Beta 성분을 만들어 단상에서 이상으로 만든다. 두 번째로 PLL을 통해 Alpha의  $\theta$ 를 추정하여 정좌표계에서 회전좌표계로 변환시켜주는 D-Q 변환을 하여 DC값인 D, Q 성분을 만든다. 세 번째로 전압/전류의 D-Q 데이터를 통해 Battery impedance Calculation 과정을 통하여

배터리 임피던스를 계산한다.

### 3.1 Battery impedance Calculation

3단계에서 구한 D-Q 전압/전류 데이터는 전압과 전류의 위상차를 구하기 위해 전력 계산과 임피던스 크기를 계산한다. 임피던스 크기 식은 다음과 같다.

$$|Z_t| = \frac{\sqrt{v_d^2 + v_q^2}}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (2)$$

추가적으로  $\phi$ 를 구하기 위해 power factor를 사용하며 D-Q 성분을 통해 유효전력, 무효전력, 피상전력 식은 다음과 같다.

$$P = \frac{v_d i_d + v_q i_q}{2} \quad (3)$$

$$Q = \frac{v_q i_d - v_d i_q}{2} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

이를 통해 power factor와  $\phi$ 를 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$PF = \frac{P}{S} = \cos(\phi) \quad (6)$$

최종적으로 이전까지 구한 값을 이용하여 배터리 임피던스 real과 imaginary 값을 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$Z_t = Z_{real} + jZ_{imaginary} \quad (7)$$

$$Z_{real} = |Z_t| \cos(\phi), \quad Z_{imaginary} = |Z_t| \sin(\phi)$$

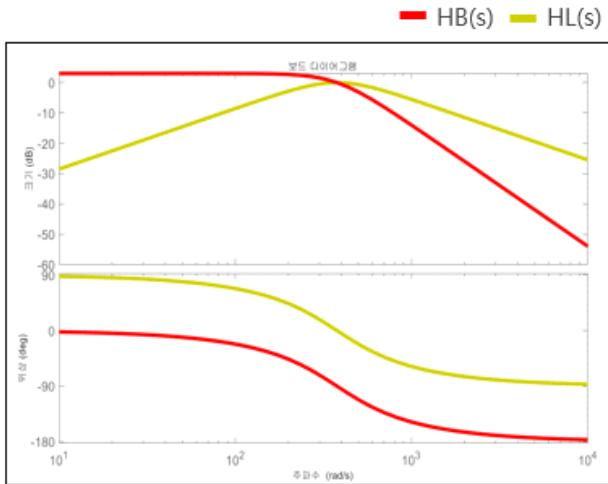
### 4. SOGI PLL를 적용한 AC 임피던스 측정 기법

#### 4.1 SOGI 필터

SOGI 필터의 특징은 BPF와 LPF(Low Pass Filter)을 통해 Alpha, Beta 성분을 만들며 이전 방식에 비해 고주파 노이즈 감쇠에 더 효과적인 장점이 있다. BPF와 LPF의 수식은 각각 식(8), 식(9)과 같다. 그림4를 통해 수식의 타당성을 확인 가능하다.[3]

$$HB(s) = \frac{kws}{s^2 + kws + w^2} \quad (k \text{는 필터계수}) \quad (8)$$

$$HL(s) = \frac{kw^2}{s^2 + kws + w^2} \quad (9)$$

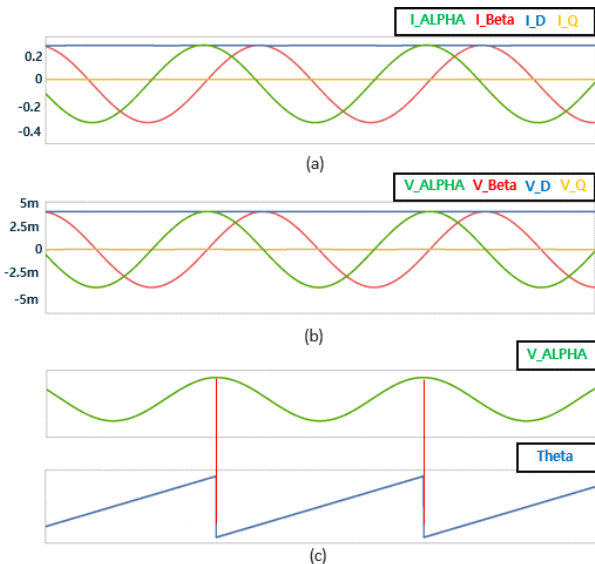


[그림 4] SOGI 필터 전달함수 크기와 위상

### 5. PSIM을 통한 시뮬레이션 결과

#### 5.1 각 필터 및 PLL 결과

앞서 언급되었던 Alpha, Beta, D, Q 및 PLL의  $\theta$  추정 기능을 그림 5을 통해 확인가능하다.

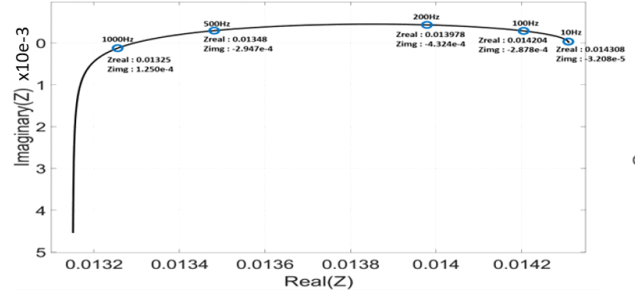


[그림 5] (a) 전류 -Alpha, Beta, D-Q 신호, (b) 전압 - Alpha,Beta, D-Q 신호, (c) PLL 기능 확인

V\_Alpha 기준으로 PLL을 통해  $\theta$  추정이 되어 AC성분에서 D, Q 즉 DC 성분으로 추출이 되었음을 확인하였다.

### 5.2 AC 임피던스 측정 오차

앞서 5.1에서 설계의 타당성을 확인하여 각각의 주파수 별 임피던스를 Matlab을 통해 수식적으로 계산한 값과 PSIM 시뮬레이션 결과의 오차율을 그림 6 및 표 1을 통해 알아 볼 수 있다.



[그림 6] 임피던스 수식을 통한 Matlab 계산 결과

오차율(%)	10Hz	100Hz	200Hz	500Hz	1000Hz
Zreal	0.0166	0.0148	0.0143	0.0141	0.0140
Zimg	0.0064	0.0004	0.0002	0.0034	0.0003

[표 1] Matlab 이론값과 PSIM 시뮬레이션 결과 오차율

## 6. 결론

본 연구는 배터리의 상태를 추정할 수 있는 AC 임피던스를 SOGI를 적용한 측정기법을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 기존 측정기법보다 임피던스 측정의 정확도를 높일 수 있고, MATLAB 및 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 참고문헌

- [1] W. Huang and J. A. Abu Qahouq, "An Online Battery Impedance Measurement Method Using DC - DC Power Converter Control," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 11, pp. 5987-5995, Nov. 2014
- [2] Y. -D. Lee, S. -Y. Park and S. -B. Han, "Online Embedded Impedance Measurement Using High-Power Battery Charger," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, pp. 498-508, Jan.-Feb. 2015
- [3] M. Xie, H. Wen, C. Zhu and Y. Yang, "DC Offset Rejection Improvement in Single-Phase SOGI-PLL Algorithms: Methods Review and Experimental Evaluation," in IEEE Access, vol. 5, pp. 12810-12819, 2017