

# 전기화학적 전력 기기의 모델링을 위한 저가형 임피던스 분광 시스템의 개발

이주형, 최우진  
숭실대학교 전기공학과

## Development of the Low Cost Impedance Spectroscopy System for Modeling the Electrochemical Power Sources

Ju-Hyung Lee, Woojin Choi  
Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

### ABSTRACT

본 연구에서는 연료전지나 배터리 및 슈퍼커패시터 등의 전기화학적 전력기기의 임피던스 모델링이 가능한 저가의 임피던스 분광시스템의 개발에 관해 제안한다. 제안된 시스템은 상용 DAQ Board (Data Acquisition Board)와 강력한 HMI(Human-Machine Interface)를 지원하는 Labview 소프트웨어를 이용하여 구성되었고 고가의 EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) 장비를 대체하여 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 시스템의 응답을 Lock-in Amplifier를 이용하여 측정함으로써 노이즈가 많은 환경에서도 정확한 측정이 가능하게 하였다. 제안된 시스템을 이용하여 Ballard Nexa 1.2kW PEM 연료전지 스택의 임피던스를 측정하였고, 이를 바탕으로 한 등가 임피던스 모델도 제안된다.

### 1. 서 론

전기화학적 임피던스 분광법(EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy)은 주로 전기화학분야에서 전극반응이나 복합체의 특성을 분석하기 위한 유용한 툴로서 널리 활용되고 있다. 시스템 응답의 분석은 복합체의 성질 및 구조 그리고 거기서 일어나는 반응에 관한 종합적인 정보를 제공하므로, 응용화학분야나 의공학 및 생체공학분야에서도 매우 유용한 툴로 이용되고 있다 [1]. 최근에는 이러한 방법을 이용하여 연료전지, 배터리, 슈퍼커패시터와 같은 전기화학적 전력기기를 모델링하고 진단하는 연구가 수행되고 있다 [2-3].

전기화학적 전력기기의 임피던스 모델링을 수행하는 상용 장비들이 다수 개발되어 있으나 매우 고가이며, 대부분의 장비는 셀 단위 시험에 적절하게 개발되어 연료전지 스택이나 대용량의 배터리 및 슈퍼커패시터 모듈의 모델링에 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 고가의 장비를 대체할 수 있는 저가의 전기화학 임피던스 분광 시스템을 제안한다.

### 2. 저가형 임피던스 분광 시스템

#### 2.1 전체 시스템의 구성 및 임피던스 측정의 전제조건

그림 1은 제안된 저가형 임피던스 분광 시스템의 구성을 나타내고 있다. 그림과 같이 간단한 전압 및 전류 센싱 회로와 상용 DAQ Board, 전자부하, Labview로 작성한 소프트웨어로 구성된다. 측정대상은 연료전지, 배터리, 슈퍼커패시터 등의 전기화학적 에너지 발생기 또는 저장장치들이고 이들은 프로그램이 가능한 전자부하에 연결되어 있다. Labview에 의해 발생된 기준 정현 신호는 전자부하의 외부제어 단자에 가해져서 측정대상으로부터 특

정 운전점에서 특정 주파수의 전류를 출력하도록 제어되며, 이때의 전류 및 전압은 검출회로를 통해 DAQ Board로 입력되어 디지털 데이터로 변환된다. 입력된 데이터로부터 Lock-in Amplifier를 이용하여 가해진 특정주파수 성분만을 추출하고, 그 주파수에서의 AC 임피던스를 계산하게 된다. 이러한 방법은 측정 주파수 범위에서 반복되며 그 결과는 Bode Plot 또는 Nyquist Plot으로 그려지게 된다.

그런데, 임피던스의 측정은 측정 대상 시스템이 선형적이라는 가정하에서만 가능하다. 따라서 Perturbation Current의 크기는 그에 의해 생기는 응답 전압의 최대크기가 식(1)과 같이 표현되는 Thermal Voltage보다 적게 되도록 선정하여야 한다[4].

$$V_T = \frac{RT}{F} = 29 mV @ 65^\circ C$$

$$(R=8.314[J/mole-K], T=Temp[K], F=96485[C/equiv]) \quad (1)$$

또한 시스템에 인가된 Perturbation Current의 주파수와 동일한 주파수의 응답을 측정하여야 하며, 측정 기간 동안 시스템의 특성이 변하지 않아야 하고, 섭동이 제거된 후에는 원상태로 복귀하여야 한다는 전제조건이 필요하다.

#### 2.2 시스템 하드웨어의 구성

실험에 사용된 전자부하는 Chroma사의 63204 모델로 0.1Hz~10kHz까지 Dynamic Loading이 가능하다. Labview로 작성된 VI(Virtual Instruments)에 의해 주파수별 Sine 신호를 DAQ Board를 통해 전자부하의 외부제어 단자로 출력하며, 전자부하는 동일한 형태의 전류를 측정대상으로부터 끌어낸다. 이때 전압과 전류는 센서회로를 통해 측정되며, 측정값은 DAQ Board를 통해 디지털 데이터로 변환된 후 컴퓨터 내부로 전달된다. 주파수 별 임피던스 값은 측정 데이터로부터 Lock-in Amplifier를 이용하여 계산된다. 전류는 LEM사의 전류센서 LA55-P를 이용하여 측정 하였고 전압은 저항분배회로에 의해 직접 측정된다.

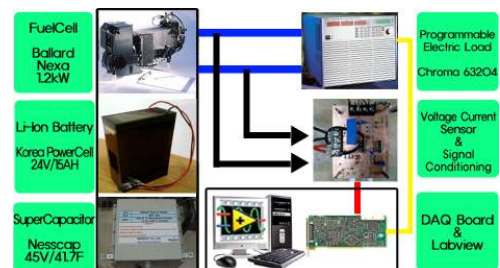


그림 1 제안된 저가형 임피던스 분광시스템의 구성

#### 2.3 시스템 소프트웨어의 구성

소프트웨어는 측정된 전압, 전류 데이터로부터 Lock-in Amplifier를 이용하여 각각의 시험 주파수 대역의 신호를 추출하

여 주파수별 임피던스를 계산한 뒤 Nyquist Plot을 그리는 Data Acquisition Mode와 주파수별 임피던스 데이터를 적절한 등가회로를 선정하여 피팅하는 Analysis Mode로 나뉘어 진다.

먼저 Data Acquisition Mode에서 Perturbation Current의 크기와 주파수 범위, 그리고 Offset 값(DC 운전점)을 지정하면 해당 파형이 출력되어 전자부하를 제어하게 되며, 이때의 측정 대상의 전압 및 전류는 센서를 통해 측정되어 DAQ Board를 통해 PC로 입력되어 임피던스가 계산된다.

임피던스는 Lock-in Amplifier를 이용하여 다음과 같이 계산된다[5]. 기준 신호를 식(2)와 같이 표현하면, 측정된 전압과 전류는 식(3)처럼 기준신호와 같은 주파수이나 크기와 위상이 다른 신호와 Noise와의 합으로 표현될 수 있다.

$$r(t) = 2 \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

$$m(t) = A \sin(2\pi ft + \theta) + n(t) \quad (3)$$

식 (2)의 기준신호는 식(4)의 동상성분과 90도 위상차가 나 있는 이상성분으로 만들어져 측정 데이터와 곱해진다.

$$m_p(t) = 2 \sin(2\pi ft), m_q(t) = 2 \cos(2\pi ft) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Real} &= i(t) \times m_p(t) \\ &= A \cos(\theta) - A \cos(4\pi ft + \theta) + n(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Imag} &= i(t) \times m_q(t) \\ &= A \sin(\theta) + A \sin(4\pi ft + \theta) + n(t) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5), (6)의 평균값을 취하면 측정신호에서 기준신호와 동상성분과 이상성분을 계산할 수 있으며 이 값으로부터 크기와 위상을 계산한다. 같은 과정을 전압, 전류 모두에 적용하여 계산된 각각의 크기와 위상 데이터로부터 식(7)과 같이 임피던스의 크기와 위상을 계산한다.

$$Z \angle \theta_z = \frac{V}{I} (\theta_v - \theta_i) \quad (7)$$

### 2.4 측정 결과의 등가회로 분석

그림 2에 나타낸 Analysis Mode는 측정된 데이터로부터 적절한 등가 임피던스 모델을 선정하고 Curve Fitting 을 수행하여 파라미터를 추출하는 과정을 수행한다. 먼저 측정 대상의 내부 화학반응을 설명하기 적합한 등가 임피던스 모델을 선정하고 모델의 파라미터의 초기치를 입력한다. 이때 세부 값은 슬라이드 바를 이용하여 용이하게 변경될 수 있으며 등가회로의 주파수별 임피던스는 측정결과와 더불어 화면에 표시된다.

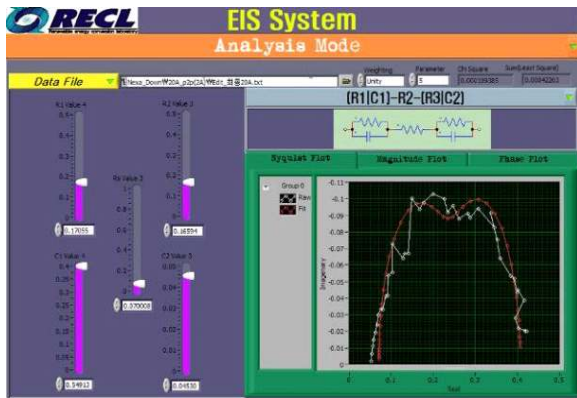


그림 2 개발된 소프트웨어의 등가회로 분석모드

피팅의 정확도도 실시간 계산되어 디스플레이 되므로 파라미터를 변경시키며 임피던스 궤적의 변화와 피팅의 정확도를 동시에 모니터링 하는 것이 가능하다. 피팅의 정확도는 식(7)과 같이 표

현되는 Chi-Square를 계산함에 의해 계산된다.

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (8)$$

(y<sub>i</sub>: Measured Data, f(x<sub>i</sub>): Fitted Data, σ<sub>i</sub>: Standard Deviation)

식(7)의 제곱근이 측정 데이터의 %에러를 나타내며, 피팅의 정확도가 된다. 계산된 값이 1~2% 이내로 수렴할 경우 측정 데이터와 등가회로는 아주 밀접한 상관성을 갖고 있는 것으로 판단되며, 따라서 적용된 모델 회로가 측정된 결과를 나타내기 적절함을 알 수 있다. 그림 3은 전체 시스템의 블록도를 나타낸다.

### 3. 실험 및 고찰

그림 4와 같이 개발된 장비를 이용하여 Ballard Nexa 1.2kW PEM 연료전지 스택의 임피던스를 0.1Hz~5kHz 범위에서 측정하고 측정된 데이터로부터 적절한 등가 임피던스 모델을 이용한 파라미터의 추출을 시도해 보았다. 연료전지의 모델은 그림 5와 같이 연료전지의 Anode와 Cathode의 반응을 나타내기 적합한 두 개의 시정수(Time Constant)를 가진 모델을 선정하였다[1]. 각각의 전극 반응은 저항과 커패시터가 병렬 연결된 회로로 모델링 되었으며 여기서, 전하전송저항(Charge Transfer Resistance) R<sub>ct\_a</sub>와 R-ct\_c는 Anode 및 Cathode에서 수소의 산화와 산소의 환원반응을 나타내며, C<sub>dl\_a</sub>와 C<sub>dl\_c</sub>는 각 전극에서 나타나는 전기 이중층 커패시터 (Electric Double Layer Capacitor)이다. 전극의 반응을 나타내는 두 시정수 사이에는 전해질(Electrolyte) 막의 저항성분을 나타내는 막저항이 있다.

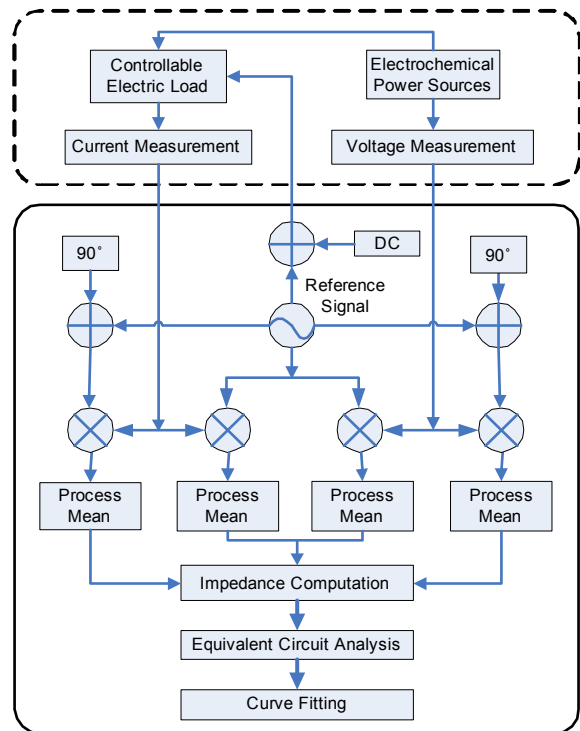


그림 3 개발된 시스템의 블록도

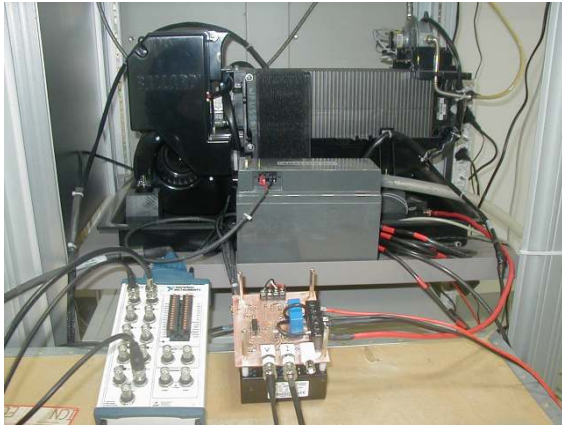


그림 4 Nexa 1.2kW PEM 연료전지 스택 및 센서회로

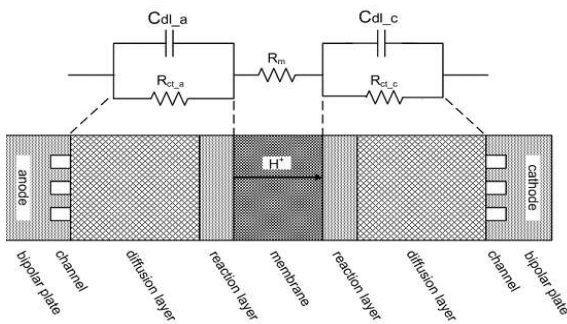


그림 5 PEM 연료전지의 내부구조 및 등가 임피던스 모델

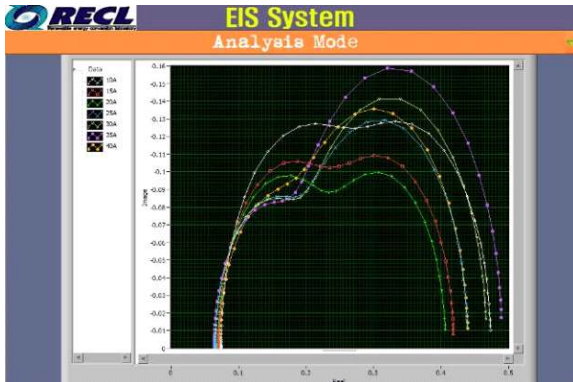


그림 6 연료전지 스택의 운전점별 임피던스 스펙트럼의 변화

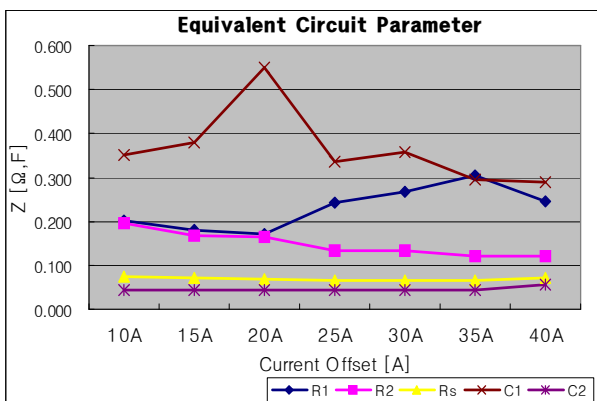


그림 7 연료전지 스택의 운전점별 등가모델 파라미터의 변화

10[A]부터 40[A]까지 5[A] 단위로 DC 운전점을 변화시키면서 반복 측정된 데이터를 이용하여 주파수별 임피던스를 계산한 뒤, 그림 5의 모델을 이용하여 커브피팅을 수행하고, 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

운전점의 변화에 따라 임피던스 Plot의 반경이 변화하는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상은 그림 7에 나타낸 연료전지 스택의 운전점별 등가모델 파라미터의 변화를 관찰함으로써 해석이 가능하다. 전구간에서 막저항의 변화는 거의 없는 반면 운전전류가 커짐에 따라 수소의 산화반응보다 느린 속도의 산소의 환원반응에 의해 전자전송저항의 변화가 커지면서 임피던스의 궤적이 달라짐을 알 수 있다. 측정된 결과는 상용장비를 이용하여 동일 종류의 연료전지 스택의 임피던스를 측정된 결과 [2]와 비교하여 파라미터의 변화 추세가 동일함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상용 DAQ Board와 Labview 소프트웨어를 이용한 저가형 임피던스 분광시스템을 개발하고, 이를 이용하여 1.2kW PEM 연료전지의 임피던스 모델링을 수행하였다. 개발된 시스템은 고가의 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 장비를 대체하여 전기화학적 에너지기의 임피던스 측정을 통한 모델링에 널리 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이러한 장비로 측정된 임피던스를 바탕으로 표준 등가회로 모델을 확립하고 등가회로의 파라미터 값을 모니터링 할 경우 이들 기기의 고장 진단이나 수명 예측이 가능해질 것으로 판단되며 향후 이러한 연구를 수행할 예정이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-7-050-01)주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

- [1] J.R. Macdonald, Impedance Spectroscopy: Emphasizing Solid Materials and Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [2] W. Choi, J. Howze, P. Enjeti, Development of an equivalent circuit of the a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current, Journal of Power Source 158 (2006) 1324-1332.
- [3] Eckhard Karden, Stephan Buller, RikW. De Doncker, "Impedance measurements on lead acid batteries for state of charge, state of health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles," Journal of Power Sources (2000) 72-78
- [4] Kevin Cooper, "Impedance Spectroscopy for Fuel Cell Diagnostics," The 2006 Short Course in Fuel Cell Technology, February, 2006
- [5] Stanford Research System, About Lock-in Amplifier, Application Note #3.(www.thinkSRS.com)
- [6] Nasser Kehtarnavaz, Namjin Kim "Digital Signal Processing, System Level Design Using Labview" pp. 1-156.
- [7] Princeton Applied Research, Electrochemical Impedance Measurements: Instruments and Techniques, Application Note AC-3. ([www.princetonappliedresearch.com](http://www.princetonappliedresearch.com))