

# 임피던스 분광법 모델링에 의한 VRFB-ESS의 내부 임피던스 특성에 관한 연구

신건\*, 박찬욱\*, 김기영\*\*\*, 태동현\*, 노대석\*  
\*한국기술교육대학교, \*\*한국화학융합시험연구원  
e-mail:sheengun@koreatech.ac.kr

## A Characteristics of Internal Impedance of VRFB-ESS based on Modeling of Electrochemical Impedance Spectroscopy

Jian Shen\*, Chan-Wook Park\*, Gi-Young Kim\*\*\*, Dong-Hyun Tae\* and Dae-Seok Rho\*  
\*Dept. of Electric, Electronic & Communication Engineering, Koreatech  
\*\*Korea Testing & Research Institute

### 요약

일반적으로, VRFB(vanadium redox-flow battery)는 20년 이상 반영구적으로 사용할 수 있고, 인체 유해성, 인화성, 화학반응성의 위험도가 리튬이온배터리보다 낮아 안정성이 매우 뛰어나므로, 차세대의 ESS로 주목받고 있다. 하지만, VRFB-ESS가 배전계통에 연계되어 운용될 경우, 계통으로부터 위해요인들이 유입하여 VRFB 스택이 열화되고 내부 임피던스가 증가되어 출력성능과 수명이 저하될 가능성이 있다. 따라서, VRFB의 열화 정도를 나타내는 중요한 지표인 내부 임피던스의 특성을 정확하게 분석하기 위하여, 본 논문에서는 높은 주파수에서 낮은 주파수의 정현파 전류 또는 전압을 차례로 VRFB에 인가하고, 입출력 전압, 전류의 진폭 및 위상의 변화특성을 바탕으로 주파수별 임피던스를 측정하는 VRFB용 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy)의 메커니즘에 따라 VRFB-ESS의 내부 임피던스의 모델링을 제시한다. 또한, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 산정된 내부 임피던스가 실측 값과 매우 근접하고, 전하전달 저항이 증가함에 따라 최대 리액턴스 값은 증가하며, 전해질 저항이 증가함에 따라 옴저항도 증가하는 것을 알 수 있어, 제시한 모델링을 통하여 VRFB-ESS의 내부 임피던스를 정확하게 분석할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 1. 서론

2017년 8월 고창 전력시험센터에서 발생한 ESS 화재 사고를 시작으로 현재까지 총 38건의 ESS 화재사고가 보고되고 있다. 이에 따라 화재위험성이 높은 리튬이온배터리 기반 ESS의 대안으로, 화재 안전성이 확보되고, 안정적이며, 폐기 처리가 용이한 VRFB기반의 ESS가 주목을 받고 있다[1]. 특히, VRFB는 20년 이상 반영구적으로 사용할 수 있고, 인체 유해성 인화성, 화학반응성 위험도가 리튬이온배터리보다 낮아 안정성이 매우 뛰어나고, 설치 후 용량을 증가하기 위하여, 전해액 저장탱크를 증설하면 된다는 이점이 있다[2]. 하지만, VRFB-ESS가 배전계통에 연계되어 운용될 경우, 계통으로부터 누설전류, 사고전류, 순환전류, 서지 등과 같은 위해요인들의 유입으로 인하여 VRFB 스택이 열화되고 내부 임피던스가 증가되어 VRFB의 출력성능과 수명을 저하시킬 가능성이 있다. 여기서, VRFB-ESS의 내부 임피던스를 측정하기 위한 임피던스 분광법은 높은 주파수에서 낮은 주파수의 정현파 전류 또는 전압을 차례로 VRFB에 인가하고, 입출력 전

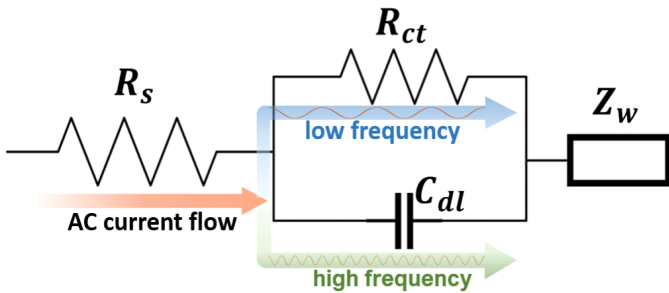
압, 전류의 진폭 및 위상의 변화특성을 바탕으로 주파수별 임피던스를 측정한다. 따라서, VRFB의 열화 정도를 나타내는 중요한 지표인 내부 임피던스 특성을 정확하게 분석하기 위하여, 본 논문에서는 VRFB용 임피던스 분광법의 메커니즘에 따라, VRFB-ESS의 내부 임피던스의 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 산정된 내부 임피던스가 실측 값과 매우 근접하고, 전하전달 저항이 증가함에 따라 최대 리액턴스 값은 증가하며, 전해질 저항이 증가함에 따라 옴저항도 증가하는 것을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 모델링이 유효함을 확인할 수 있었다.

## 2. VRFB-ESS용 임피던스 분광법의 메커니즘

### 2.1 VRFB의 등가회로

일반적으로, VRFB의 내부 임피던스를 용이하게 추정하기 위하여, 여러 가지 전기회로 소자들로 구성된 등가회로를 구성하여 분석한다. 특히, 임피던스 분광법을 적용하기 위하여,

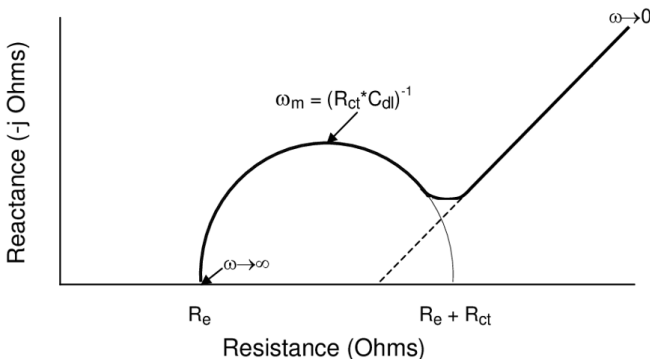
적절한 VRFB에 대한 등가회로를 선정하여 모델링을 수행해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 VRFB에 가장 많이 적용되는 Randles 등가회로를 바탕으로, 그림 1과 같이 용저항( $R_s$ ), 전하전달 저항( $R_{ct}$ ), 전기이중층 임피던스( $C_{dl}$ ) 및 확산 임피던스( $Z_w$ ) 등으로 구성되어 VRFB의 내부 임피던스를 구한다. 여기서, 용저항은 전해질, 집전체 분리막 등에서 나타나는 모든 저항 성분의 합을 나타낸다. 또한, 전하전달 저항 및 전기이중층 임피던스의 병렬회로는 Nyquist plot에서 반원 형태로 측정되는 배터리 내부의 전기화학반응에 대한 등가 임피던스를 나타내는데, 이는 전해질 용액과 전극 계면에서 에너지 교환 혹은 상변화를 통해 바나듐이 이동하는 것을 의미한다. 한편, Warburg 임피던스는 저주파수 영역에서 나타나는 현상으로 VRFB 스택 내부의 이온확산 현상을 나타내는 인자인데, 이는 충·방전 과정에서 바나듐 이온이 전극 내부로 이동하며 발생한다.



[그림 1] VRFB에 대한 Randles 등가회로

### 2.2 임피던스 분광법의 메커니즘

상기의 VRFB 등가회로의 내부 임피던스를 분석하기 위하여, 본 논문에서는 임피던스 분광법을 이용하여 등가회로의 주파수별 임피던스를 산정하고, 이를 바탕으로 Nyquist plot을 도출하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 구체적으로, 임피던스 분광법은 높은 주파수에서 낮은 주파수의 정현파 전류 또는 전압을 차례로 VRFB에 인가하고, 입출력 전압, 전류 신호의 진폭 및 위상 변화특성을 바탕으로 주파수별 임피던스를 복소수 형식으로 나타낸다.



[그림 2] VRFB의 Nyquist plot

또한, 상기의 주파수에 따른 VRFB의 전체 내부 임피던스는 식 (1)과 같이 전해액 저항분, 계면특성 임피던스분, Warburg 임피던스분의 합으로 나타낼 수 있다.

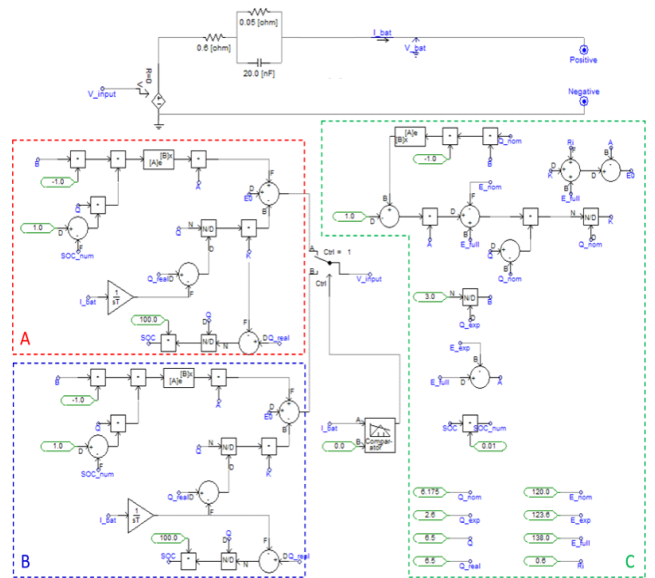
$$Z_{total} = R_s + \frac{R_{ct} - jwC_{dl}R_{ct}^2}{1 + w^2C_{dl}^2R_{ct}^2} + \frac{\sigma - j\sigma}{\sqrt{w}} \quad (1)$$

Where,  $Z_{total}$ : VRFB의 전체 내부 임피던스  $\sigma$ : 확산계수,  $w$ : 각속도

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 VRFB-ESS용 임피던스 분광 시험장치의 모델링

#### 3.1 VRFB부

VRFB부에 대한 모델링은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 3(A)는 방전 시 VRFB의 개방전압, 그림 3(B)는 충전 시 VRFB의 개방전압을 산정하여 전압원에 입력한다. 또한, 그림 3(C)는 VRFB의 분극전압, VRFB 상수 전압, 배터리용량, 지수영역 진폭 및 지수영역시간 등과 같이 개방전압 산정에 필요한 파라미터를 산정한다.

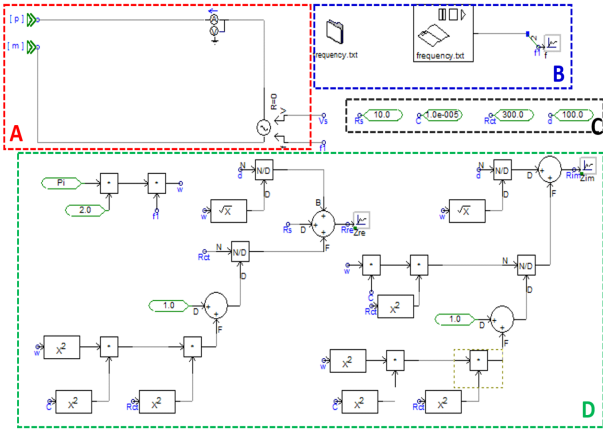


[그림 3] VRFB 모델링

#### 3.2 임피던스분광 시험장치부

EIS부는 그림 4와 같이 4개 부분으로 구성되는데, 여기서 그림 4(A)는 전압과 주파수를 가변할 수 있는 전원 및 전압, 전류를 측정하는 멀티미터로 구성되며, 그림 4(B)는 전원에 입력할 주파수 데이터를 텍스트파일로부터 읽어온다. 한편, EIS부의 그림 4(C)에서는 시험조건 데이터를 입력하고, 그림 4(D)에서는 복소수 형태의 임피던스의 실수값과 허수값을 각

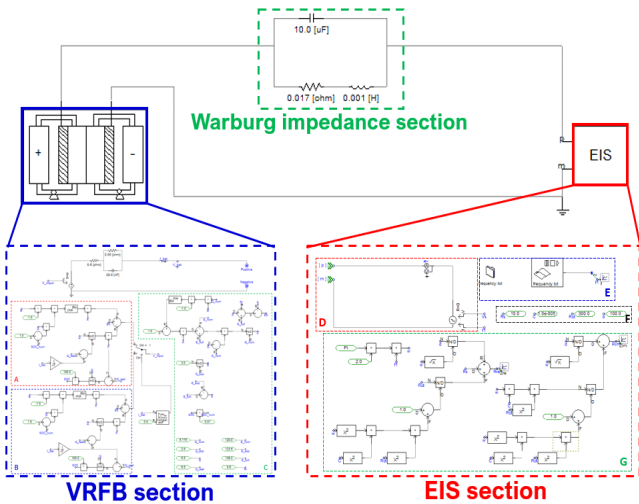
각 그래프의 x축과 y축에 주파수별로 표시하여 Nyquist plot을 도출한다. 또한, Warburg 임피던스부는 VRFB의 확산 임피던스에 따라 값을 설정한다.



[그림 4] EIS부 모델링

### 3.3 전체 시스템

상기의 VRFB부, EIS부 및 Warburg 임피던스부 모델링을 바탕으로, 본 논문은 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 VRFB-ESS용 임피던스 분광법의 전체 모델링을 그림 5와 같이 구성한다.



<그림 5> 전체 시스템 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

제시한 VRFB-ESS용 임피던스 분광법의 모델링에 대한 특성을 분석하기 위하여, 본 논문에서는 시뮬레이션 조건을 표 1과 같이 상정한다. 여기서, VRFB의 용량은 100[kW], 정격전압은 150[V], 임피던스 분광기의 주파수는 0~2[kHz]의

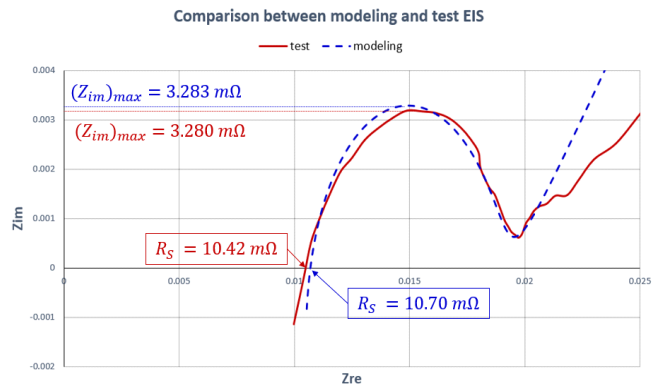
범위에서 가변하도록 상정한다. 또한, 모델링의 유효성을 확인하기 위하여, 본 논문에서는 100[kW]급 VRFB의 실제 내부 임피던스를 바탕으로 모델링을 수행하고, 산정한 값과 실측 데이터를 비교, 분석한다. 또한, VRFB-ESS의 내부임피던스 특성을 평가하기 위하여, Rs, Rct, Cdl 값을 표 1의 조건과 같이 변경하여 시뮬레이션을 수행한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목	내역	
VRFB의 정격 출력	100 [kW]	
VRFB의 정격 전압	150 [V]	
VRFB의 SOC	80 %	
확산 계수	15.51	
EIS 모델링의 동작특성 시험	RS	10.5 [mΩ]
	Rct	4 [mΩ]
	Cdl	30 [uF]
전하전달 저항 특성 시험	RS	10.5 [mΩ]
	Rct	4, 8, 12, 16 [mΩ]
	Cdl	30 [uF]
용저항 특성 시험	RS	10.5, 12.5, 14.5, 16.5 [mΩ]
	Rct	4 [mΩ]
	Cdl	30 [uF]

### 4.2 VRFB-ESS용 임피던스 분광시험장치 모델링의 동작특성

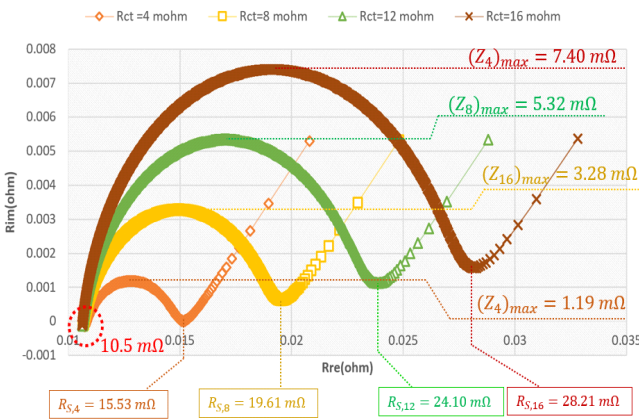
표 1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, VRFB-ESS의 내부 임피던스 특성시험을 수행하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 최대 리액턴스((Z<sub>im</sub>)<sub>max</sub>)는 제시한 모델링과 실제 임피던스 분광기를 통하여 측정된 값이 각각 3.283 [mΩ], 3.250 [mΩ]이므로, 약 0.03 [mΩ]의 편차를 가진다. 또한, 전해액 저항 (RS)는 제시한 모델링과 실제 임피던스 분광기를 통하여 측정된 값이 각각 10.70 [mΩ], 10.42 [mΩ]이므로, 약 0.28 [mΩ]의 편차를 가진다. 한편, 제시한 모델링을 통해 도출한 Nyquist plot은 실제 그래프와 비교할 경우, Warburg 임피던스 부분에서 발생한 차이를 제외하고 매우 흡사하다. 따라서, 본 논문에서 제시한 임피던스 분광 시험장치 모델링이 VRFB-ESS의 내부 임피던스를 정확하게 나타낼 수 있음을 알 수 있다.



[그림 6] VRFB 모델링 및 실측 내부 임피던스의 특성

### 4.3 VRFB-ESS의 내부임피던스 특성

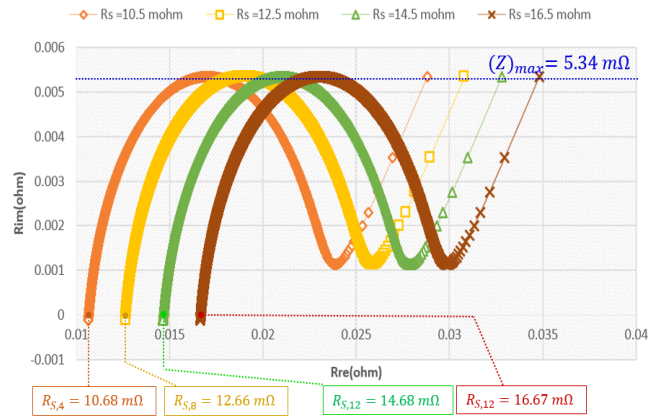
상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로, VRFB-ESS의 전하 전달 저항의 변화에 따른 Nyquist plot은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, VRFB-ESS의 음저항을 일정 값으로 상정하면 전하전달 저항의 크기가 변해도, 리액턴스 성분이 없는 x축과의 교점에서의 저항 값은 항상 10.5[mΩ]임을 알 수 있다. 또한, 전하전달 저항값을 4[mΩ], 8[mΩ], 12[mΩ], 16[mΩ]으로 상정하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 전하전달 저항이 4[mΩ]인 경우, 최대 임피던스와 Warburg 시작점에서의 음저항은 각각 1.19[mΩ], 15.53[mΩ]로 나타나고, 전하전달 저항이 8[mΩ]인 경우, 최대 임피던스와 Warburg 시작점에서의 음저항은 각각 3.28[mΩ], 19.61[mΩ]으로 나타난다. 또한, 전하전달 저항이 12[mΩ]인 경우, 최대 임피던스와 Warburg 시작점에서의 음저항은 각각 5.32[mΩ], 24.10[mΩ]임을 알 수 있고, 전하전달 저항이 16[mΩ]인 경우, 최대 임피던스와 Warburg 시작점에서의 음저항은 각각 7.40[mΩ], 28.21[mΩ]임을 알 수 있다. 따라서, 전하전달 저항이 4[mΩ]이 증가함에 따라, 최대 리액턴스 값은 각각 2.09[mΩ], 2.04[mΩ], 2.08[mΩ]이 증가하는 것을 확인할 수 있고, Warburg 시작점에서의 음저항은 각각 4.08[mΩ], 4.49[mΩ], 4.11[mΩ]이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, VRFB-ESS가 열화되어 전하전달 저항이 증가할 경우, 음저항은 거의 변하지 않지만, 최대 리액턴스와 Warburg 시작점에서의 음저항이 같이 증가함을 알 수 있다.



<그림 7> VRFB-ESS의 전하전달 저항 특성

또한, 본 논문은 VRFB-ESS의 음저항의 변화에 따른 내부임피던스의 특성을 확인하기 위하여, 전하전달 저항을 8[mΩ]으로 정하고, 음저항을 10.5[mΩ], 12.5[mΩ], 14.5[mΩ], 16.5[mΩ]으로 상정하였을 경우, Nyquist plot을 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 최대 리액턴스는 음저항의 변화에 따라 변하지 않고 5.34[mΩ]을 유지하므로, 전하전달 저항에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 또

한, 전해질 저항을 10.5[mΩ], 12.5[mΩ], 14.5[mΩ], 16.5[mΩ]으로 상정한 경우, 제한한 모델링을 통하여 산정된 음저항은 x축과의 교점에서 각각 10.64[mΩ], 12.66[mΩ], 14.68[mΩ], 16.67[mΩ]임을 알 수 있다. 따라서, VRFB-ESS의 열화에 따라 전해질 저항이 증가할 경우, 최대 리액턴스 값은 거의 변하지 않지만, 음저항이 증가하는 것을 알 수 있다.



<그림 7> VRFB-ESS의 음저항 특성

## 5. 결론

본 논문에서는 VRFB의 열화 정도를 나타내는 중요한 지표인 내부 임피던스 특성을 정확하게 분석하기 위하여, VRFB용 임피던스 분광법의 메커니즘에 따라, VRFB-ESS의 내부 임피던스의 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 산정된 내부 임피던스가 실측 값과 매우 근접하고, 전하전달 저항이 증가함에 따라 최대 리액턴스 값은 증가하며, 전해질 저항이 증가함에 따라 음저항도 증가하는 것을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 모델링이 유효함을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, No.20213030160080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] SNE Research, "Redox Flow Battery 최근 기술 동향 및 시장 전망(-2025)", Premium market reports, 2020.08.
- [2] 김상원, "레독스 흐름전지의 연구 동향 및 기술 분석", 화학공학소재연구정보센터, 2021.04.