

## ESS용 VRFB의 내부저항 특성 평가에 관한 연구

신건, 최성문, 유현상, 박찬욱, 김지명, 노대석\*  
한국기술교육대학교

### A Study on Characteristics Evaluation of Internal Resistance of VRFB for ESS

Jian Shen, Sung-Moon Choi, Hyun-Sang You, Chan-Wook Park, Ji-Myung Kim,  
Dae-Seok Rho\*  
Korea University of Technology and Education

**요약** 일반적으로, VRFB(vanadium redox-flow battery)는 20년 이상 반영구적으로 사용할 수 있고, 인체 유해성, 인화성, 화학반응성에 따른 위험도가 리튬이온배터리보다 낮아 안전성이 매우 뛰어나므로, 차세대의 ESS로 주목받고 있다. 하지만, VRFB는 배전계통에 연계되어 운용될 경우, 계통으로부터 위해요인들이 유입되어 VRFB 스택이 열화되고 내부 임피던스가 증가되어 출력성능과 수명이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 VRFB의 열화정도를 나타내는 중요한 지표의 하나인 내부 임피던스의 특성을 정확하게 평가하기 위하여, VRFB의 운용특성을 모의하는 VRFB부와 주파수별로 저항과 리액턴스성분에 따라 Nyquist plot을 산정하는 임피던스 분광시험장치부의 모델링을 제시한다. 또한, VRFB 출력특성 및 내부 임피던스 특성을 평가하기 위하여, VRFB부, 임피던스 분광시험장치부 및 VRFB의 BMS부 등으로 구성된 6[kWh]급 VRFB용 내부저항 시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 VRFB용 임피던스 분광시험장치를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, VRFB의 전하전달 저항, 전하전달 저항 및 Warburg 임피던스는 초기상태와 160 사이클 운용된 열화상태에서 모두 유사한 특성을 나타내어, 본 연구에서 제시한 모델링의 유효성을 확인할 수 있었다.

**Abstract** In general, VRFB (vanadium redox-flow battery) is considered as one of the next generation ESS, since it can be used for more than 20 years semi-permanently, and its safety is much greater than lithium-ion battery due to the low risk of harmfulness, flammability and chemical reaction. However, in case of operating VRFB interconnected with the distribution system, the lifespan and output performance of VRFB may be degraded due to the hazardous factors, which may deteriorate the VRFB stacks and increase the internal impedance. Therefore, in order to evaluate the characteristics of internal impedance, which is one of the significant index of the degradation rate of VRFB, this paper proposes a modeling of VRFB section, which simulates the operation characteristics of VRFB, and EIS (electrochemical impedance spectroscopy) test device section that calculates the Nyquist plot according to the resistance and reactance components depending on the frequency. And also, in order to evaluate the characteristics of output and internal impedance of VRFB, this paper implements a 6 [kWh] scaled internal impedance test device, which is composed of VRFB, EIS test device and BMS section etc. From the simulation and test results based on the proposed modeling and test device, it is confirmed that the proposed modeling is a useful tool to effectively evaluate the electrolyte resistance, charge transfer resistance and Warburg impedance at both initial and 160 cycles deteriorated conditions.

**Keywords** : VRFB, ESS, EIS, Internal Resistance, Impedance, Deterioration Characteristics, PSCAD/EMTDC

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20213030160080), 에너지 소비대체율 50% 달성을 위한 신재생에너지기반 융복합형 마을단위 마이크로그리드 실증 기술개발)과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20224000000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터).

\*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)  
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received December 7, 2023

Revised January 16, 2024

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

## 1. 서론

2017년 8월 고창 전력시험센터에서 발생한 ESS 화재 사고를 시작으로 현재까지 총 51건의 ESS 화재사고가 보고되고 있다[1,2]. 이에 따라 화재 위험성이 높은 리튬 이온배터리 기반 ESS의 대안으로, 화재 안전성이 확보되고, 안정적이며, 폐기처리가 용이한 VRFB 기반의 ESS가 주목을 받고 있다. 특히, VRFB는 20년 이상 반영구적으로 사용할 수 있고, 인체 유해성, 인화성, 화학반응성 위험도가 리튬이온배터리보다 낮아 안정성이 매우 뛰어나고, 설치 후 용량을 증가시키기 위하여, 전해액 저장탱크만 증설하는 이점이 있다[3,4]. 하지만, ESS용 VRFB가 배전계통에 연계되어 운용될 경우, 계통으로부터 누설전류, 사고전류, 순환전류, 서지 등과 같은 전기적 위해요인들의 유입으로 인하여 VRFB 스택이 열화되고 내부 임피던스가 증가되어 VRFB의 출력성능과 수명을 저하시킬 가능성이 있다[5,6].

이러한 열화에 따른 VRFB의 내부임피던스 특성을 평가하기 위하여, 일반적으로 AC-IR(alternative current internal resistance)법과 임피던스 분광법을 적용하고 있다[7]. 여기서, 기존의 AC-IR법은 고정주파수의 미세 교류전류를 VRFB 스택에 인가하고, 이때의 출력 교류전압을 측정하여, VRFB 스택의 내부저항을 하나의 값으로 나타내는 방식이다. 이는 내부저항을 신속하게 평가할 수 있는 장점이 있지만, 내부저항을 단일 임피던스 값으로 나타내므로 VRFB의 정확한 열화특성을 평가하기 어렵다. 하지만, 본 연구에서 제시한 임피던스분광법은 가변주파수의 정현파 전류를 VRFB에 인가하고, 입출력 전압, 전류의 진폭 및 위상의 변화특성에 따라 측정된 주파수별 임피던스를 저항성분과 리액턴스성분으로 분리하여 Nyquist plot을 작성한다. 이는 Nyquist plot의 순수 저항값, 최대 리액턴스 값 등 다양한 파라미터를 바탕으로 VRFB의 전해질 저항, 이중층 저항, 전하전달항과 같이 세부적인 열화특성을 정확하게 평가할 수 있다[8-10].

따라서, 본 논문에서는 VRFB의 열화 정도를 나타내는 중요한 지표인 내부 임피던스 특성을 정확하게 평가하기 위하여, VRFB의 사양을 바탕으로 VRFB의 특성을 모의하는 VRFB부와 주파수별 VRFB 스택의 저항성분과 리액턴스성분에 따라 Nyquist plot을 작성하는 임피던스 분광장치부로 구성된 VRFB용 임피던스 분광시험장치의 모델링을 제시한다. 또한, 상기의 모델링의 유효성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 40개의 VRFB셀로 구성된 6kWh급 VRFB부, VRFB 스택의 내부 임피던스

에 따른 Nyquist plot을 작성하는 임피던스 분광시험장치부 및 VRFB의 출력특성을 모니터링하고 펌프의 출력을 제어하는 BMS부로 구성된 6kWh급 VRFB용 내부저항 시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 모델링과 시험장치를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, 160사이클 동안 가속열화시킨 VRFB의 전해질 저항, 전하전달 저항 및 Warburg 임피던스의 오차는 각각 0 [Ω], 0.01[Ω], 0.04[Ω]으로 산정되어, 본 연구에서 제시한 모델링의 유효성을 알 수 있었다.

## 2. ESS용 VRFB의 내부저항 측정 메커니즘

상기의 VRFB 등가회로의 내부 임피던스를 평가하기 위하여, 본 논문에서는 임피던스 분광법을 이용하여 Fig. 1의 등가회로에 대한 주파수별 임피던스를 산정하면 Eq. (1)과 같다. 가변주파수에 대한 VRFB의 전체 내부 임피던스는 전해질 저항성분, 계면특성 임피던스성분, Warburg 임피던스성분의 합으로 나타낼 수 있다[11,12]. 여기서, Ep. (1)의 1항은 전해질 저항을 나타내고, 2항은 계면특성 임피던스성분으로 전하전달 저항과 전기이중층 임피던스 및 입력전류의 각속도로 구성된 식으로 나타낼 수 있으며, 3항은 와버그 임피던스성분으로 확산계수와 입력전류의 각속도의 관계식으로 나타낼 수 있다[13].

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

Where,  $Z_{total}$ : total internal impedance of VRFB,  $\sigma$ : diffusion coefficient,  $w$ : angular speed,  $R_e$ : electrolyte resistance,  $R_{ct}$ : charge transfer resistance,  $C_{dl}$ : electric double layer impedance

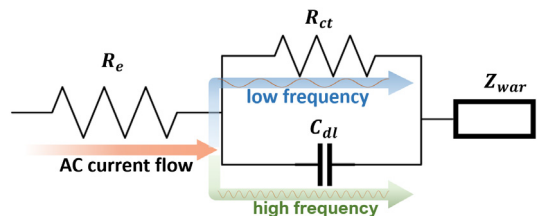


Fig. 1. Randles equivalent circuit for VRFB

한편, 상기의 Eq. (1)을 바탕으로 Nyquist plot을 작

성하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서, 높은 주파수에서 낮은 주파수의 정현파 전류 또는 전압을 VRFB에 인가하면, 입출력 전압, 전류 신호의 진폭 및 위상 변화특성을 바탕으로 주파수별 임피던스가 복소수 형태로 산정된다. 여기서, 복소수의 실수부는 전해질 저항 성분을 나타내고, 허수부는 전하전달 저항 및 전기 이중층 임피던스로 구성된 리액턴스 성분을 나타낸다.

여기서, Fig. 2의 ① ~ ④ 구간은 높은 주파수 영역으로, 리액턴스 성분이 0인 지점( $R_e$ )부터 최대 리액턴스( $w_m$ )의 지점까지를 나타내는데, 이 최대값은 전하전달 저항과 전기이중층 임피던스 곱의 역수로 나타낼 수 있다. 또한, Fig. 2의 ② ~ ③ 구간은 중간 주파수 영역으로, 최대 리액턴스 지점부터 Warburg 임피던스( $Z_{war}$ )의 시작점까지를 나타내는데, 이 시작점은 전해질 저항( $R_e$ )과 전하전달 저항( $R_{ct}$ )의 합인 성분으로 구성된다. 한편, Fig. 2 ④ ~ ⑤ 구간은 저주파수 영역으로, 주파수가 감소함에 따라 Warburg 임피던스는 일정 기울기로 나타난다.

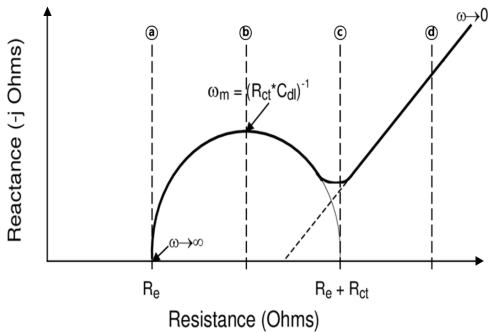


Fig. 2. Nyquist plot of VRFB

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 VRFB용 임피던스 분광시험장치의 모델링

#### 3.1 VRFB부

본 논문에서는 VRFB의 전압특성을 평가하기 위하여, Fig. 3과 같이 PSCAD/EMTDC를 이용하여 R, S, T의 3개의 부분으로 모델링을 수행한다. 여기서, Fig. 3의 R 부분은 VRFB의 정격용량, 최대용량, 정격전압, 최대전압, 분극 전압, 초기 내부저항, 초기 SOC 등과 같은 파라미터들을 설정하고, 이를 바탕으로 VRFB의 개방 전압을 산정한다. 또한, Fig. 3의 S부분은 R부분에서 설정한

파라미터들을 바탕으로, 방전 시 VRFB의 실시간 SOC 및 출력전압을 산정한다. 여기서, 실시간 SOC는 AH 적산법에 따라 방전전류를 적분하여 방전용량을 산정한다. 그리고, 출력전압은 Fig. 3의 R 부분에서 산정된 개방 전압값을 바탕으로 실시간 SOC에 따른 분극전압 등을 보상하여 산정한다. 한편, Fig. 3의 T부분은 VRFB의 충전 전압과 실시간 SOC를 산정하는데, 상기의 방전 시 방법과 동일하지만, 음의 값을 가지게 된다.

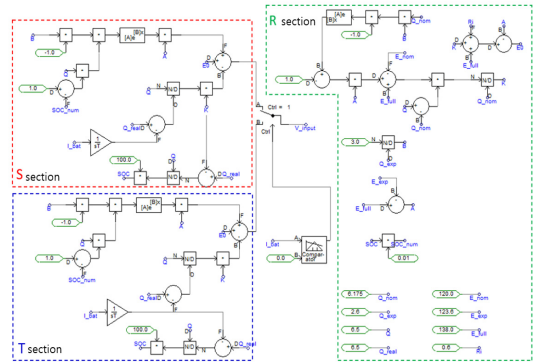


Fig. 3. Modeling of VRFB section

#### 3.2 임피던스 분광시험장치부

임피던스 분광시험장치부는 Fig. 4와 같이  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  3개 부분으로 구성되는데, 여기서 Fig. 4의  $\alpha$  부분은 전압과 주파수를 가변할 수 있는 전원을 나타내고,  $\beta$  부분은 전해질 저항, 전하전달 저항, 전기이중층 임피던스, 확산 계수 등 입력데이터를 나타낸다. 또한, Fig. 4의  $\gamma$  부분은 내부 임피던스의 실수부와 허수부를 각각 그래프의 x축과 y축에 주파수별로 나타내어 Nyquist plot을 작성한다. 여기서, Warburg 임피던스는 VRFB의 확산 임피던스에 따라 산정한다.

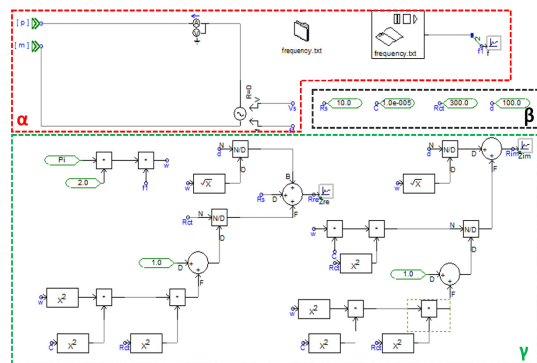


Fig. 4. Modeling of EIS(electrochemical impedance spectroscopy) section

### 3.3 전체 시스템

상기의 VRFB부, 임피던스 분광시험장치부 모델링을 바탕으로, 전체 시스템의 모델링을 나타내면 Fig. 5와 같다. 여기서, VRFB부는 개방전압 및 SOC와 같은 VRFB의 출력 특성을 나타내고, 임피던스 분광시험장치부는 VRFB의 특성에 따라 Nyquist plot을 작성하여 VRFB의 내부 임피던스 특성을 평가한다.

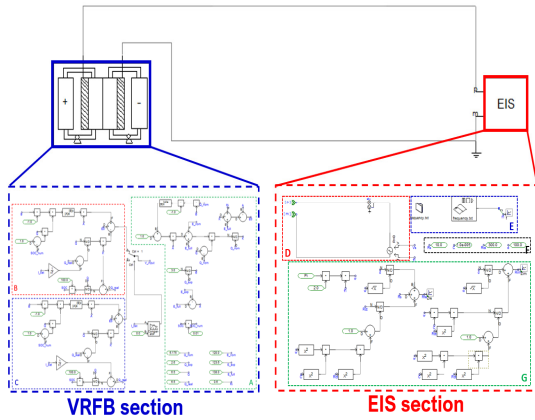


Fig. 5. Modeling of entire system

## 4. 6kWh급 VRFB용 내부저항 시험장치의 구현

### 4.1 6kWh급 VRFB부

VRFB부는 Fig. 6과 같이, 전해질의 산화와 환원반응이 발생하는 VRFB 스택과 음극 및 양극 전해질을 VRFB 스택으로 공급하는 펌프, 전해질 탱크로 구성된다. 여기서, VRFB 스택은 전해질의 크로스오버로 인한 전해질 불균형 현상을 방지하기 위하여, 음극분리막을 사용하고, 총 40개의 VRFB 셀로 구성한다. 즉, VRFB 스택의 출력전압 범위는 40[V] ~ 62[V]이고, 정격전압은 58[V]이며, 정격출력 전류는 105[A]이다. 또한, 펌프는 전해질 탱크의 하단부에 설치하여 전해질을 스택으로 공급하고, 스택의 출력상태에 따라 PID 제어를 통하여 0[Hz] ~ 30[Hz]의 주파수에서 동작시킨다. 한편, 6kWh의 출력을 구현하기 위하여, 양극과 음극 전해액의 탱크는 각각 40[L]의 용량으로 구성한다.

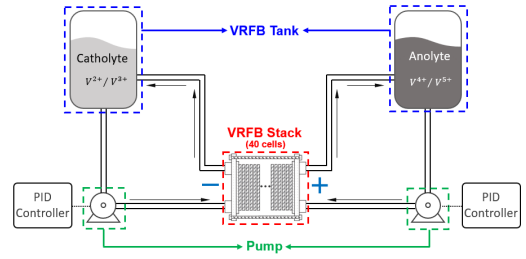


Fig. 6. 6kWh scaled VRFB section

### 4.2 임피던스 분광시험장치부

본 논문에서는 VRFB의 내부 임피던스 및 운용특성을 분석하기 위하여, Fig. 7과 같이, oscillator, ADC (analog-to-digital converter), DFT(discrete fourier transform)로 구성된 임피던스 분광시험장치부를 VRFB부 스택의 입출력 단자에 연결하여 구현한다. 여기서, 임피던스 분광시험장치부의 oscillator는 0 ~ 4[kHz] 주파수의 전류를 VRFB 스택에 공급하고, 이에 따른 임피던스 응답 신호는 ADC에서 샘플링한다. 또한, DFT 알고리즘에 의해 각 출력 주파수에 따라 선정된 샘플링 데이터의 실수 및 허수 값은 인터페이스를 통해 Nyquist plot으로 작성한다.

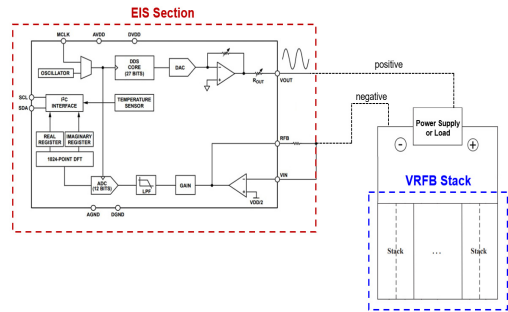


Fig. 7. EIS section

### 4.3 VRFB의 BMS부

본 논문에서는 상기의 VRFB부와 임피던스 분광시험장치부에서 측정되는 출력 전압 및 전류, 온도, 바나듐 전해질의 유속, 전해질 탱크의 압력, 전해질 수위 등과 같은 파라미터들을 모니터링하고, 이를 바탕으로 펌프의 인가전류, 동작주파수 등을 제어하기 위하여, VRFB의 BMS부를 Fig. 8과 같이 구성한다. 여기서, VRFB의 BMS부는 VRFB에서 측정된 데이터를 바탕으로, VRFB의 상태를 모니터링하고, 부하의 크기에 따라 펌프의 인가전류를 제어하여 VRFB의 운용효율을 향상시킨다.

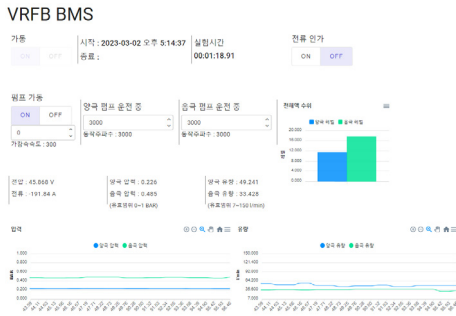


Fig. 8. Main menu of BMS section in VRFB

### 4.4 전체 시스템

본 논문에서는 VRFB 출력특성 및 내부 임피던스 특성을 평가하기 위하여, 상기의 VRFB부, 임피던스 분광 시험장치부 및 VRFB의 BMS부 등으로 구성된 6[kWh] 급 VRFB용 내부저항 시험장치의 전체 시스템을 구현하면 Fig. 9와 같다.

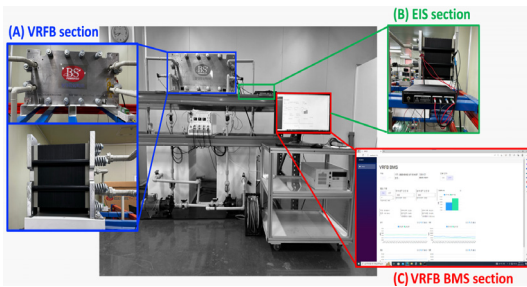


Fig. 9. Entire system

## 5. 시뮬레이션 및 시험결과 분석

### 5.1 시뮬레이션 및 시험조건

본 논문에서는 VRFB의 내부 임피던스 특성을 분석하기 위하여, 시뮬레이션 및 시험조건을 Table 1과 같이 상정한다. 여기서, VRFB의 용량은 6[kWh], 정격전압은 58[V], 확산계수는 15.51, 임피던스 분광기의 주파수는 0~4[kHz]의 범위에서 가변하도록 상정한다. 또한, 본 논문에서는 열화된 VRFB의 내부저항 특성을 평가하기 위하여, 초기 조건과 160 cycle의 가속열화 조건에서의  $R_e$ ,  $R_{ct}$ ,  $C_{dl}$  값을 Table 1과 같이 상정하여 시뮬레이션 및 시험을 수행한다. 한편, VRFB용 내부저항 시험장치의 실측데이터와 모델링의 시뮬레이션 결과 값을 비교하여, 본 논문에서 제시한 모델링의 유효성을 확인한다.

Table 1. Simulation and test conditions

item	contents	
rated power of VRFB	6 [kW]	
rated voltage of VRFB	58 [V]	
initial SOC of VRFB	80 %	
diffusion coefficient	15.51	
coefficient of new VRFB	$R_e$	10.5 [ $m\Omega$ ]
	$R_{ct}$	4 [ $m\Omega$ ]
	$C_{dl}$	30 [ $\mu F$ ]
coefficient of VRFB after 160 cycles	$R_e$	10.5 [ $m\Omega$ ]
	$R_{ct}$	11.7 [ $m\Omega$ ]
	$C_{dl}$	30 [ $\mu F$ ]

### 5.2 VRFB의 운용특성

상기의 시뮬레이션 및 시험조건을 바탕으로, 6[kWh] 급 VRFB의 방전특성 모델링 및 시험장치의 전압특성을 나타내면 Fig. 10과 같다. 여기서, 모델링을 통해 산정된 방전전압과 VRFB 시험장치로부터 측정된 방전전압은 모두 46[V]에서 50[V] 사이의 정상상태 영역에서 운용되고 있음을 알 수 있다. 또한, 과도영역의 시작지점은 시뮬레이션과 시험에서 각각 582[s], 599[s]로 산정되어, 약 2.8[%]의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 모델링이 실제 VRFB의 시험장치와 유사한 전압특성을 나타내어, 그 유효성을 확인할 수 있다.

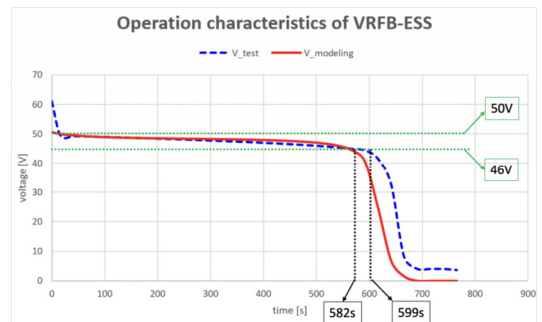


Fig. 10. Voltage characteristics of modeling and test device for VRFB

### 5.3 VRFB의 내부저항 특성

본 논문에서는 VRFB 내부저항의 열화특성을 평가하기 위하여, 초기 상태에서의 VRFB 내부저항 특성과 160 사이클을 운용한 가속열화 시험에 대한 내부저항 특성을 비교한다. 먼저, 초기 상태의 내부임피던스 특성을 평가하기 위하여, 본 연구에서 제시한 모델링 및 시험장치를 바탕으로 VRFB의 내부 임피던스에 대한 Nyquist plot

을 작성하면 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, VRFB의 전해질 저항, 즉 x축과의 교점에서의 순수 저항 값은 시뮬레이션과 실측 시험에서 모두 약  $0.4[\Omega]$ 로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션에 의하여 산정된 최대 리액턴스값은  $0.17[\Omega]$ 이고, 시험장치를 통해 측정된 최대 리액턴스값은  $0.15[\Omega]$ 이므로, 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션과 시험에서의 Warburg 곡선의 저항은 각각  $0.85[\Omega]$ 과  $0.86[\Omega]$ 인 지점에서 발생하여 오차가  $1.2[\%]$  정도임을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 모델링이 시험장치의 전해질 저항, 최대 임피던스 및 Warburg 임피던스 특성을 정확하게 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다.

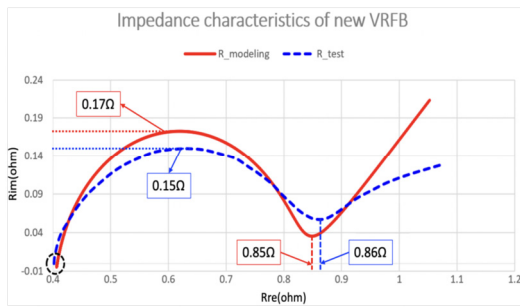


Fig. 11. Internal impedance characteristics of VRFB at initial condition

한편, 160 사이클을 운용한 VRFB의 내부임피던스 특성을 평가하기 위하여, 모델링 및 시험장치를 바탕으로 VRFB의 내부 임피던스에 대한 Nyquist plot을 작성하면 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, VRFB의 전해질 저항은 시뮬레이션과 시험장치에서 모두  $0.48[\Omega]$ 로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 산정된 최대 리액턴스 값은  $0.22[\Omega]$ 이고, 시험을 통해 측정된 최대 리액턴스 값은  $0.21[\Omega]$ 이므로 큰 오차가 발생하지 않음을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션과 시험에

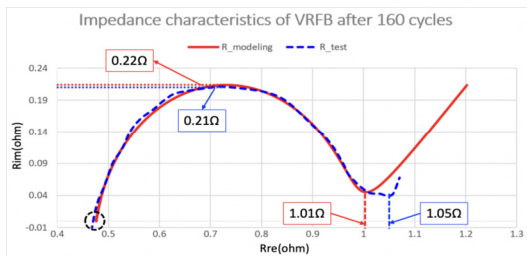


Fig. 12. Internal impedance characteristics of VRFB in aged condition

서 Warburg 곡선의 저항은 각각  $1.01[\Omega]$ 과  $1.05[\Omega]$ 인 지점에서 나타나므로  $3.8[\%]$  정도의 오차가 발생함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 모델링이 열화된 시험장치의 내부저항 특성을 정확하게 시뮬레이션할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 5.4 종합평가

상기의 시뮬레이션 및 시험을 통하여 평가한 VRFB의 내부저항 특성을 종합하여 비교하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 시뮬레이션을 통해 산정된 VRFB의 전해질 저항은 160 사이클을 운용한 열화 상태에는  $0.39[\Omega]$ 에서  $0.48[\Omega]$ 으로 증가하고, VRFB의 최대 리액턴스값은  $0.17[\Omega]$ 에서  $0.22[\Omega]$ 으로 증가하며, VRFB의 Warburg 임피던스는  $0.85[\Omega]$ 에서  $1.01[\Omega]$ 으로 증가함을 알 수 있다. 한편 시험을 통해 측정된 VRFB의 전해질 저항은 160 사이클을 운용한 열화상태에서는  $0.39[\Omega]$ 에서  $0.47[\Omega]$  증가하고, VRFB의 최대 리액턴스값은  $0.15[\Omega]$ 에서  $0.21[\Omega]$ 으로 증가하며, VRFB의 Warburg 임피던스는  $0.86[\Omega]$ 에서  $1.05[\Omega]$ 으로 증가함을 알 수 있다. 따라서, 상기의 시뮬레이션 및 시험결과를 비교, 분석하면, VRFB의 초기상태와 열화상태에서 모두 유사한 내부저항 특성을 나타내어, 본 연구에서 제시한 모델링의 유효성을 확인할 수 있다.

Table 2. Internal resistance comparison between initial and aged VRFB

	initial state		aged condition of 160 cycle	
	simulation	test	simulation	test
electrolyte resistance $[\Omega]$	0.39	0.39	0.48	0.47
maximum impedance $[\Omega]$	0.17	0.15	0.22	0.21
Warburg impedance $[\Omega]$	0.85	0.86	1.01	1.05

## 6. 결론

본 논문에서는 VRFB의 열화정도를 나타내는 중요한 지표의 하나인 내부 임피던스의 특성을 정확하게 평가하기 위하여, 임피던스 분광법의 메커니즘 및 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 6[kWh]급 VRFB 시험장치를 구현한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제시한 VRFB의 내부 임피던스 모델링과 6[kWh]급 VRFB 시험장치를 통해 산정된 방전전압이 모두 46[V]에서 50[V] 사이의 정상상태 영역에서 운용되어, 내부 임피던스 모델링의 유효성을 확인할 수 있었다.
- (2) VRFB의 초기상태에 대하여, 모델링과 시험장치를 통해 측정된 VRFB의 전해질 저항, 최대 리액턴스값, Warburg 임피던스의 오차는 각각 0.01[Ω], 0.02[Ω], 0.01[Ω]으로 산정되어, 본 논문에서 제시한 모델링이 전해질 저항, 최대 리액턴스, Warburg 임피던스의 특성을 정확하게 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다.
- (3) 160 사이클 동안 가속열화 시킨 상태의 VRFB에 대하여, 모델링과 시험장치를 통해 측정된 VRFB의 전해질 저항, 최대 리액턴스값, Warburg 임피던스의 오차는 각각 0.01[Ω], 0.01[Ω], 0.04[Ω]으로 산정되어, 본 논문에서 제시한 모델링이 열화된 VRFB의 내부저항 특성을 정확하게 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.

## References

- [1] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", *Fire Science and engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 91-99, 2018  
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.091>
- [2] J. B. Jung, M. G. Lim, J. Y. Kim, D. S. Rho, "Characteristics of External Short-Circuit in Li-ion Battery Considering Operation and Environment Factors", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 22, no. 8, pp. 663-672, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.8.663>
- [3] Kyle Lourenssen, James Williams, Faraz Ahmadpour, Ryan Clemmer, Syeda Tasnim, "Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review", *Journal of Energy Storage*, vol. 25, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100844>
- [4] J. S. Sohn, S. G. Rho, "Optimal Process Development of Vanadium Electrolyte for VRFB", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 22, no. 10, pp. 17-23, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.10.17>
- [5] Xiao-Zi Yuan, Chaojie Song, Alison Platt, Nana Zhao, Haijiang Wang, Hui Li, Khalid Fatih, Darren Jang, "A review of all-vanadium redox flow battery durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies", *International Journal of Energy Research*, vol. 43, pp. 6567-7709, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4607>
- [6] Ravendra Gundlapalli, Sreenivas Jayanti, "Case studies of operational failures of vanadium redox flow battery stacks, diagnoses and remedial actions", *Journal of Energy Storage*, vol. 33, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102078>
- [7] Nawfal Al-Zubaidi R-Smith, "Multiplexed 16 × 16 Li-Ion Cell Measurements Including Internal Resistance for Quality Inspection and Classification", *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 70, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3100331>
- [8] J. B. Jung, M. G. Lim, N. H. Kim, H. J. Kim, D. S. Rho, "A Study on Assessment of Internal Resistance for Repurposing using Middle & Large sized Batteries", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 72, no. 6, pp. 717-723, 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2023.72.6.717>
- [9] Y. H. Kim, S. H. Lee, "Characteristic Analysis of Internal Resistance on Lithium-ion Battery for Parameter Selection in Safety Diagnosis", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 72, no. 11, pp. 1534-1539, 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2023.72.11.1534>
- [10] Y. C. Kim, H. S. Kang, U. I. Kang, "Preparation of Electrolyte for Vanadium Redox Flow Battery with Thermal Stability Using Mixing Additives", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 24, no. 1, pp. 191-197, 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.1.191>
- [11] Anand Kumar Tripathi, Debittree Choudhury, Miji E Joy, Manoj Neergat, "Electrochemical Impedance Spectroscopic Investigation of Vanadium Redox Flow Battery", *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 169, no. 5, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6aeb>
- [12] Jonathan Schneider, Tim Tichter, Prashant Khadke, Roswitha Zeis, Christina Roth, "Deconvolution of electrochemical impedance data for the monitoring of electrode degradation in VRFB", *Electrochimica Acta*, vol. 336, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135510>
- [13] Pilson, Kathryn L., "Investigation of the many oxidation states of vanadium for the purpose of making a rechargeable battery" (2014). Graduate Research Theses & Dissertations. 3656.  
<https://huskiecommons.lib.niu.edu/allgraduate-theses-dissertations/3656>

신 건(Jian Shen)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, MVDC, 신재생에너지, ESS

박 찬 욱(Chan-Wook Park)

[정회원]



- 2019년 2월 : 충남대학교 전기공학과 석사 졸업
- 2019년 9월 ~ 2021년 9월 : 한국화학융합시험연구원 연구원
- 2021년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중
- 2022년 1월 ~ 현재 : (유)레드 책임연구원

<관심분야>

신재생에너지, 전력품질, 전력변환시스템

최 성 문(Sung-Moon Choi)

[정회원]



- 2020년 2월 : 호원대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, ESS, 마이크로그리드, 신재생에너지

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

유 현 상(Hyun-Sang You)

[준회원]



- 2019년 8월 : 충남대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 7월 ~ 2022년 7월 : 한국산업기술시험원 연구원
- 2022년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석