

VRFB-ESS의 내부임피던스 모델링 및 특성평가에 관한 연구

신건*, 최익준**, 원종홍*, 김형준***, 노대석*

*한국기술교육대학교, **RED, ***보성파워텍

e-mail:sheengun@koreatech.ac.kr

A Study on Modeling and Characteristics Evaluation of Internal Impedance in VRFB-based ESS

Jian Shen*, Ik-Joon Choi**, Jong-Heung Won*, Hyeong-Jun Kim***, Dae-Seok Rho*

Korea University of Technology and Education*, RED**, Bosung Powertec***

요약

일반적으로, VRFB(vanadium redox-flow battery)는 20년 이상 반영구적으로 사용할 수 있고, 인체 유해성, 인화성, 화학반응성의 위험도가 리튬이온배터리보다 낮아 안전성이 매우 뛰어나므로, 차세대의 ESS로 주목받고 있다. 하지만, VRFB-ESS가 배전계통에 연계되어 운용되는 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 분광법의 메커니즘을 제시한다. 또한, VRFB부, 내부임피던스부, EIS부로 구성된 VRFB-ESS용 내부임피던스 모델링을 수행하고, VRFB부, 임피던스 분광시험장치부 및 모니터링부로 구성된 60kW급 VRFB-ESS용 시험장치를 구현한다. 상기에서 제시한 모델링과 시험장치를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, 모델링과 시험장치의 내부 임피던스가 매우 유사하고, 열화된 VRFB의 임피던스는 초기 값보다 17% 정도 증가하여, VRFB-ESS의 내부임피던스 특성을 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

2017년 8월 고창 전력시험센터에서 발생한 ESS 화재 사고를 시작으로 현재까지 총 42건의 ESS 화재사고가 보고되고 있다. 이에 따라 화재위험성이 높은 리튬이온배터리 기반 ESS의 대안으로, 화재 안전성이 확보되고 안정적이며 폐기 처리가 용이한 VRFB 기반의 ESS가 주목을 받고 있다[1]. 특히, VRFB는 20년 이상 반영구적으로 사용할 수 있고, 인체 유해성 인화성, 화학반응성 위험도가 리튬이온배터리보다 낮아 안전성이 매우 뛰어나고, 설치 후 전해액 저장탱크를 증설하여 용량을 쉽게 증가시킬 수 있는 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

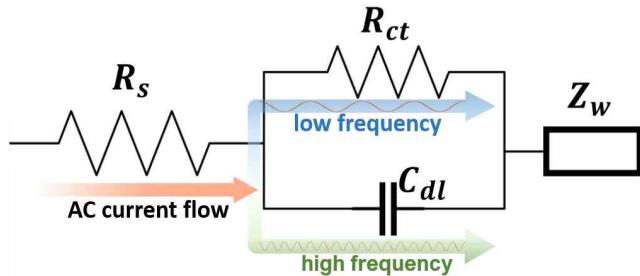
압, 전류의 진폭 및 위상의 변화특성을 바탕으로 주파수별 임피던스를 측정한다. 따라서, VRFB의 열화 정도를 나타내는 중요한 지표인 내부 임피던스 특성을 정확하게 분석하기 위하여, 본 논문에서는 VRFB용 임피던스 분광법의 메커니즘에 따라, VRFB-ESS의 내부 임피던스의 모델링을 제시하고, VRFB부, 임피던스 분광시험장치부 및 모니터링부로 구성된 60kW급 VRFB를 구현한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험분석을 수행한 결과, 가속열화된 VRFB의 임피던스는 초기 값보다 증가하고, 산정된 내부 임피던스가 실측 값과 매우 근접한 것을 알 수 있어, 제시한 모델링을 통하여 VRFB-ESS의 내부 임피던스를 정확하게 분석할 수 있음을 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,

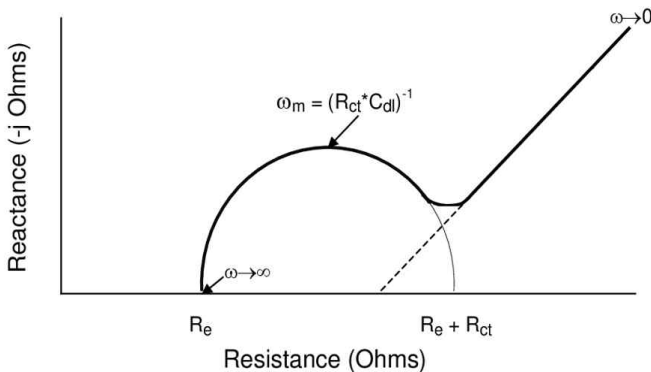
적절한 VRFB에 대한 등가회로를 선정하여 모델링을 수행해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 VRFB에 가장 많이 적용되는 Randles 등가회로를 바탕으로, 그림 1과 같이 전해질 저항(R_s), 전하전달 저항(R_{ct}), 전기이중층 임피던스(C_{dl}) 및 Warburg 임피던스(Z_w) 등으로 구성하여 VRFB의 내부 임피던스를 산정한다. 여기서, 전해질 저항은 전해질, 집전체 분리막 등에서 나타나는 모든 저항 성분의 합을 나타낸다. 또한, 전하전달 저항 및 전기이중층 임피던스의 병렬회로는 Nyquist plot에서 반원 형태로 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 내부를 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

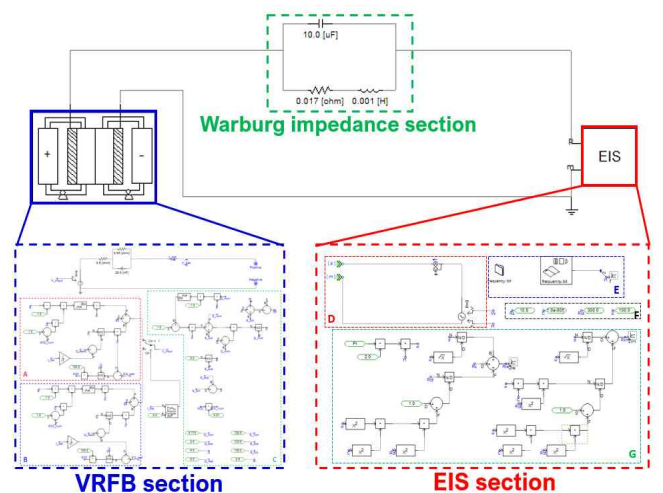
또한, 상기의 주파수에 따른 VRFB의 전체 내부 임피던스는 식 (1)과 같이 전해액 저항분, 계면특성 임피던스분, Warburg 임피던스분의 합으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, Z_{total} : VRFB의 전체 내부 임피던스 σ : 확산계수, ω : 각속도

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

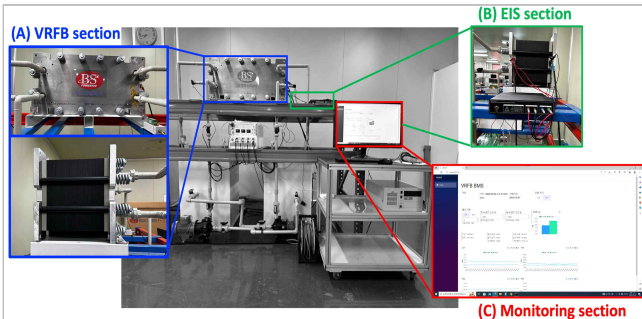
VRFB-ESS용 임피던스 분광 시험장치의 모델링은 그림 3과 같이, VRFB부, 임피던스부 및 EIS부로 구성된다. 여기서, VRFB부는 방전 시 VRFB의 개방전압, 충전 시 VRFB의 개방전압을 산정하여 전압원에 입력하고, VRFB의 분극전압, VRFB 상수 전압, 배터리용량, 지수영역 진폭 및 지수영역 시간 등과 같이 개방전압 산정에 필요한 파라미터를 산정한다. 또한, EIS부는 4개 부분으로 구성되는데, 이는 전압과 주파수를 가변할 수 있는 전원 및 전압, 전류를 측정하는 멀티미터로 구성되며, 전원에 입력할 주파수 데이터를 텍스트파일로부터 읽어온다. 한편, EIS부는 시험조건 데이터를 입력하고, 복소수 형태의 임피던스의 실수값과 허수값을 각각 그래프의 x축과 y축에 주파수별로 표시하여 Nyquist plot을 도출한다. 또한, Warburg 임피던스부는 VRFB의 확산 임피던스에 따라 값을 설정한다.



[그림 3] VRFB-ESS용 임피던스 분광 시험장치의 모델링

4. VRFB-ESS 및 임피던스 분광 시험장치의 구현

본 논문은 VRFB-ESS의 출력특성 및 내부 임피던스 특성을 분석하기 위하여, 그림 4와 같이, VRFB부, 모니터링부 및 임피던스 분광 시험장치(EIS)부 등으로 구성된 6[kW]급 VRFB-ESS 시험장치를 구현한다. 여기서, VRFB부는 그림 4의 (A)와 같이, 40개의 셀을 직렬로 연결한 스택으로 구성되고, 최소 출력전압은 40[V]이고 최대 출력전압은 62[V]이며 정격전압은 58[V]이다. 또한, 정격출력 전류는 105[A]이고, 바나듐 전해액을 스택으로 전송하는데 사용되는 펌프는 30[Hz]의 주파수로 운전되며, 양극과 음극 전해액의 용량은 각각 40[L]이다. 한편, 임피던스분광 시험장치부는 그림 4의 (B)와 같이, BZA1000 고전압 배터리 임피던스 측정기를 이용하여, 스택의 입출력단에 단자를 연결하여 내부임피던스를 측정한다. 상기의 VRFB부와 EIS부에서 측정되는 출력 전압 및 전류, 바나듐 전해질의 유속, 전해질 탱크의 압력, 전해액 수위 등과 같은 파라미터들을 모니터링하고, 펌프의 인가전류, 동작주파수 등을 제어하기 위하여, 그림 4의 (C)와 같이 모니터링부를 구성한다.



[그림 4] 6kW급 VRFB-ESS 및 임피던스 분광 시험장치의 구성

5. 시뮬레이션 및 시험결과 분석

5.1 시뮬레이션 및 시험 조건

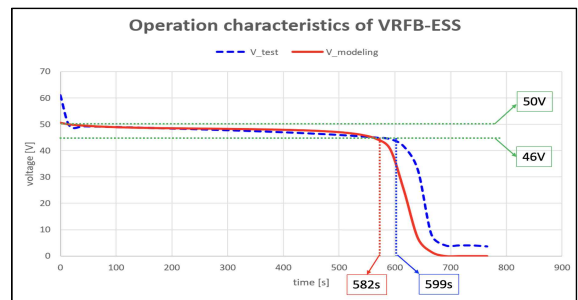
제시한 VRFB-ESS용 임피던스 분광법의 모델링에 대한 특성을 분석하기 위하여, 본 논문에서는 시뮬레이션 조건을 표 1과 같이 상정한다. 여기서, VRFB의 용량은 6[kW], 정격전압은 58[V], 임피던스 분광기의 주파수는 0~2[kHz]의 범위에서 가변하도록 상정한다. 또한, 모델링의 유효성을 확인하기 위하여, 본 논문에서는 6[kW]급 VRFB의 실제 내부 임피던스를 바탕으로 모델링을 수행하고, 산정한 값과 실측 데이터를 비교, 분석한다. 또한, VRFB-ESS의 열화에 따른 내부 임피던스 특성을 평가하기 위하여, Rs, Rct, Cdl 값을 표 1의 조건과 같이 변경하여 시뮬레이션을 수행한다.

[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

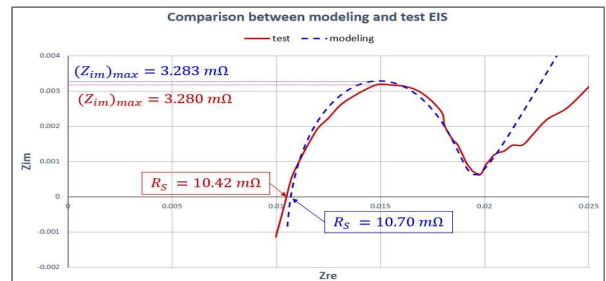
항목	내역	
VRFB의 정격 출력	6 [kW]	
VRFB의 정격 전압	58 [V]	
VRFB의 SOC	80 %	
확산 계수	15.51	
coefficient of new VRFB	RS	10.5 [mΩ]
	Rct	4 [mΩ]
	Cdl	30 [uF]
coefficient of VRFB after 160 cycles	RS	10.5 [mΩ]
	Rct	11.7 [mΩ]
	Cdl	30 [uF]

5.2 VRFB-ESS의 운용특성

표 1의 시뮬레이션 및 시험 조건을 바탕으로, VRFB-ESS의 방전특성 시험을 수행하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 모델링을 통해 산정된 방전 전압 값은 50[V]에서 46[V]사이의 nominal zone 전압 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 시뮬레이션과 시험에서 측정된 exponential zone의 시작지점은 각각 582[s], 599[s]로 2.9[%] 정도의 오차가 있어, 본 논문에서 제시한 모델링이 실제 시험장치와 비슷한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 한편, VRFB-ESS의 내부 임피던스 특성시험을 수행하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 최대 리액턴스($Z_{im}max$)는 제시한 모델링과 실제 임피던스 분광기를 통하여 측정된 값이 각각 3.283 [mΩ], 3.250 [mΩ]이므로, 0.003 [mΩ] 정도의 편차를 가진다. 또한, 전해액 저항(R_s)는 제시한 모델링과 실제 임피던스 분광기를 통하여 측정된 값이 각각 10.70 [mΩ], 10.42 [mΩ]이므로, 0.28 [mΩ] 정도의 편차가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제시한 임피던스 분광 시험장치 모델링이 VRFB-ESS의 내부 임피던스의 특성을 정확하게 나타낼 수 있음을 알 수 있다.



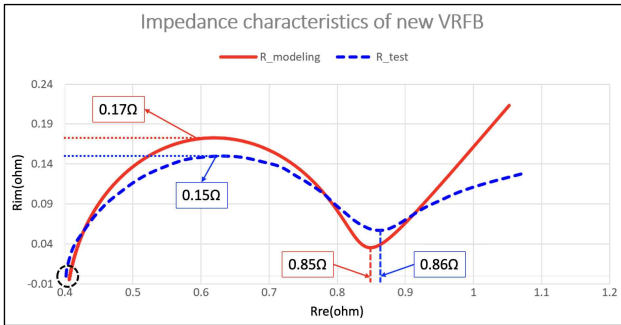
[그림 5] VRFB 모델링 및 구현된 장비의 전압특성



[그림 6] VRFB 모델링 및 실측 내부 임피던스의 특성

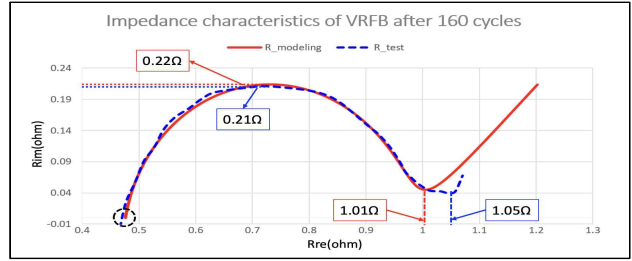
5.3 VRFB-ESS의 내부임피던스 특성

본 논문에서는 VRFB-ESS의 내부임피던스 열화 특성을 분석하기 위하여, VRFB-ESS의 초기상태와 160사이클의 가속열화 시험을 수행한 상태에서의 내부임피던스 특성을 비교 분석한다. 먼저, 초기상태의 내부임피던스 특성을 분석하기 위하여, 상기에서 제시한 모델링과 시험장치를 이용하여 VRFB-ESS의 초기 내부임피던스 특성을 분석한 결과, 그림 7과 같이 유사한 특성이 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서, VRFB-ESS의 음저항, 즉 리액티브 성분이 없는 x축과의 교점에서의 저항값은 시뮬레이션과 실측 시험에서 모두 0.4[Ω] 정도로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 산정된 전해질 저항은 0.17[Ω]이고, 시험을 통해 측정된 전해질 저항은 0.15[Ω]으로, 11.8[%]의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션과 시험에서 Warburg 곡선은 음저항이 각각 0.85[Ω]과 0.86[Ω]인 지점에서 발생하여 오차가 1.2[%]로 나타나므로, 모델링과 시험장치를 통해 측정된 Warburg 임피던스 특성이 매우 유사함을 알 수 있다.



[그림 7] 초기상태에서 VRFB-ESS의 내부임피던스 특성

한편, VRFB-ESS에 대해 160사이클의 열화가속 시험을 수행하여, 임피던스분광 시험장치를 이용하여 내부임피던스 특성을 분석하고, 측정된 파라미터를 바탕으로 모델링을 수행하여 내부 임피던스 특성을 비교 분석하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, VRFB-ESS의 음저항은 시뮬레이션과 실측 시험에서 모두 0.48[Ω] 정도로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 산정된 전해질 저항은 0.212[Ω]이고, 시험을 통해 측정된 전해질 저항은 0.21[Ω]으로, 4.5[%]의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션과 시험에서 Warburg 곡선은 음저항이 각각 1.01[Ω]과 1.05[Ω]인 지점에서 발생하여 오차가 3.8[%]로 나타나므로, 시험장치와 모델링을 통해 측정된 Warburg 임피던스 특성이 매우 유사함을 알 수 있다.



[그림 8] 열화상태에서 VRFB-ESS의 내부임피던스 특성

상기의 시뮬레이션 및 시험을 통한 열화된 VRFB-ESS의 내부 임피던스 특성은 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 열화 모델링을 통해 산정된 음저항은 초기상태에 비해 0.9[Ω]이 증가하고, 전해질 저항 및 Warburg 임피던스는 각각 0.05[Ω], 0.16[Ω] 증가함을 알 수 있다. 또한, 열화가속 시험을 진행한 후 측정된 음저항은 초기상태에 비해 0.9[Ω]이 증가하고, 전해질 저항 및 Warburg 임피던스는 각각 0.06[Ω], 0.19[Ω] 증가함을 알 수 있다. 따라서, VRFB-ESS는 열화가 진행됨에 따라 내부임피던스의 증가량이 비교적 크므로, 주기적인 유지보수가 필요함을 알 수 있다.

[표 2] 초기 및 열화 VRFB-ESS의 내부임피던스 비교분석

	초기 VRFB		열화 VRFB	
	시뮬레이션	시험	시뮬레이션	시험
음저항[Ω]	0.39	0.38	0.48	0.47
전해질저항[Ω]	0.17	0.15	0.22	0.21
와버그 임피던스[Ω]	0.85	0.86	1.01	1.05

6. 결 론

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, VRFB부, 임피던스 분광시험장치부 및 모니터링부로 구성된 60kW급 VRFB를 구현한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과, 가속열화된 VRFB의 임피던스는 초기 값보다 증가하고, 산정된 내부 임피던스가 실측 값과 매우 유사함을 알 수 있어, 제시한 모델링을 통하여 VRFB-ESS의 내부 임피던스를 정확하게 분석할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] SNE Research, “Redox Flow Battery 최근 기술 동향 및 시장 전망(-2025)”, Premium market reports, 2020.08.