

VRFB의 사고사례 및 SAT 시험장치의 운용특성에 관한 연구

신 건*, 박찬욱*, 정민철*, 황승욱*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail:sheengun@koreatech.ac.kr

A Study on Fault Cases in VRFB and Operation Characteristics of SAT Test Device

Shen Jian*, Chan-Wook Park*, Min-Chul Jung*, Seung-Wook Hwang*, Dae-Seok Rho*

*Korean University of Technology and Education

요약

전 세계 ESS 시장은 25년에는 86.9GWh에서 30년에는 180GWh까지 늘어날 전망이지만, 국내의 경우 연이은 리튬이온배터리 기반의 ESS의 화재로 인하여, 설치용량이 매년 감소하고 있는 추세이다. 따라서, 화재위험성이 높은 리튬이온배터리 기반 ESS의 대안으로 화재 안전성이 확보된 VRFB 기반의 수십 MWh급 대용량 ESS가 주목을 받고 있는 실정이다. 여기서, 레독스 흐름전지는 전해액 내의 활물질이 산화·환원되어 충·방전되는 시스템으로 전기에너지를 전해액의 화학적 에너지로 저장시키는 전기화학적 장치를 말하는데, 스택 부품 중 멤브레인은 내부 스택 전해액 누출을 생성시키고, 카본펠트의 경우 흑연이 펠트 재료에서 벗겨져 전해질이 막힐 수 있으며, 바이폴라플레이트에 부식이 발생하는 등과 같은 문제점들이 발생할 수 있다. 또한, 바나듐 전해액은 바나듐금속이온, 황산, 물이 주요 성분이며, 사용하는 안정제로 인산 또는 붕산 성분이 미량 포함되어 있는데, 전해액 성분 중 황산이 약 30% 정도가 포함되어 있으므로 누수가 발생할 경우, VRFB의 스택을 구성하는 금속부품을 지속적으로 부식시켜 고장을 일으킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 VRFB 특화용 시험장치, 계통연계 적합성 및 성능시험장치, 안전성 시험장치, 기타 등으로 구성된 VRFB용 SAT 시험장치의 구성을 제안하고, 이를 바탕으로 용도, 성능, 안전성 및 계통연계 적합성에 따른 운용특성을 제시하고, VRFB 시스템, VRFB 스택, 펌프, 전해액에 대한 SAT 시험평가 방안을 제안하여, 향후 VRFB에 대한 성능 및 신뢰성 평가를 위한 국내의 시험기준 제정에 기여하고자 한다.

1. 서 론

전 세계 ESS 시장은 25년에는 86.9GWh에서 30년에는 180GWh까지 늘어날 전망이지만, 국내의 경우 연이은 리튬이온배터리 기반의 ESS의 화재로 인하여, 2019년에는 3.7[GWh]의 ESS가 설치되어 2018년의 설치용량인 5.6[GWh]보다 33.9%가 감소하였고, 현재도 감소하고 있는 추세이다[1]. 특히, 국내의 ESS는 단주기 중심의 순동 예비력, 주파수제어, 피크부하 저감용으로 적용된 LiB-ESS에 시장에 편중되어 있어, 장주기 ESS 기술의 조기 상용화를 통한 시장 다변화가 요구되고 있다. 따라서, 화재위험성이 높은 리튬이온 배터리의 대안으로 화재 안전성이 확보된 VRFB(vanadium redox flow battery) 기반의 수십 MWh급 대용량 ESS가 주목을 받고 있는 실정이다. 여기서, 레독스 흐름전지는 전해액 내의 활물질이 산화·환원되어 충·방전되는 시스템으로 전기에너지를 전해액의 화학적 에너지로 저장시키는 전기화학적 장치를 말하는데, 스택 부품 중 멤브레인은 내부 스택 전해액 누출을 생성시키고, 카본펠트의 경우 흑연이 펠트 재료에서 벗겨져 전해질이 막힐 수 있으며, 바이폴라플레이트에 부식이 발생하는 등과 같은 문제점들이 발생할 수

있다. 또한, 바나듐전해액은 바나듐금속이온, 황산, 물이 주요 성분이며, 사용하는 안정제로 인산 또는 붕산 성분이 미량 포함되어 있는데, 전해액 성분 중 황산이 약 30% 정도가 포함되어 있으므로 누수가 발생할 경우, VRFB의 스택을 구성하는 금속부품을 지속적으로 부식시켜 고장을 일으킬 수 있다.

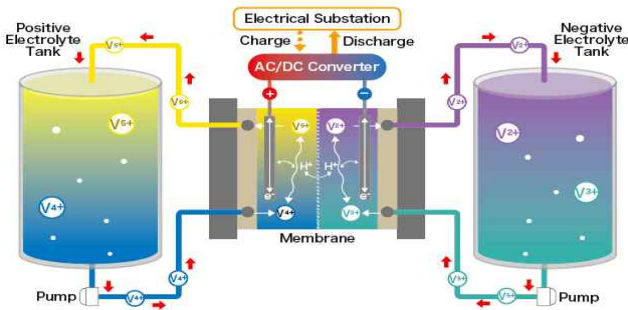
따라서, 본 논문에서는 VRFB 특화용 시험장치(VRFB 모의장치, BMS 평가용 센서, 임피던스 분광 시험장치, 전해액 전위차 측정장치), 계통연계 적합성 및 성능시험장치(계통모의장치, RLC모의부하), 안전성 시험장치(전기적 위함요인 측정 센서), 기타(통합 감시제어장치, 수배전기기) 등으로 구성된 VRFB용 SAT(system acceptance test) 시험장치의 구성을 제안하고, 이를 바탕으로 용도, 성능, 안전성 및 계통연계 적합성에 따른 운용특성을 제시하여, VRFB 시스템, VRFB 스택, 펌프, 전해액에 대한 SAT 시험평가 방안을 제안한다.

2. VRFB의 운용특성

2.1 VRFB의 개념

일반적으로, VRFB는 그림 1과 같이 활성물질이 저장되어 있

는 탱크, 전해액을 셀로 공급해 주는 펌프와 전해액이 이동하는 배관, 활성물질이 녹아 있는 전해액, 전해액에 녹아 있는 활물질의 산화·환원 반응이 발생하는 전극, 양극과 음극을 물리적으로 분리시키고 매프레인 및 셀의 형태를 유지시켜 주는 프레임으로 구성된다. 또한, VRFB는 양극 및 음극 전해액내에 전이금속이나 Lanthan계, Actinide계와 같은 활성물질을 녹여서 양/음극 전해액을 제조하여 탱크에 저장 한 후 펌프를 이용하여 전극에 공급하고, 전극 표면에서 전해액 내의 활성 물질의 산화·환원 반응을 이용하여 에너지를 저장한다. 여기서, VRFB의 기전력은 양극전해액과 음극전해액을 구성하고 있는 레독스 커플의 표준전극전위 차이로 결정되는데, 수계 전해액을 사용하는 경우에는 물 분해 전위영역에 한정되기 때문에 2.0[V] 이하의 작동범위를 보이거나 비수계 전해질을 사용한 VRFB의 경우에는 물 분해 전위 영역이 존재하지 않기 때문에 2.0V 이상에서도 작동이 가능하다.



[그림 1] VRFB의 개념도

2.2 VRFB의 운용특성

VRFB는 물 성분의 수계 전해질을 사용하므로, 표 1과 같이 화재의 위험성이 없고, 수명이 20년 이상이므로 반영구적으로 사용할 수 있으며, VRFB의 에너지 용량을 결정하는 전해질의 가격이 스택의 가격에 비해 상대적으로 저렴하여 큰 에너지 용량이 필요한 장주기 ESS 시장에서 높은 가격 경쟁력을 갖는다. 또한, VRFB는 일반적인 발전설비와 함께 활용할 경우, 부하안정화를 통해 안정적인 전력을 공급할 수 있게 해주고, 신재생에너지 발전설비와 함께 활용할 경우, 출력변동성을 낮춰 전력망에 안정적으로 연계할 수 있도록 한다. 한편, 주택용, 일반용 전력소비자는 비상전원으로 활용할 수 있으며 대용량의 산업용 수용가에서는 load shifting을 통해 비용을 절감할 수 있다.

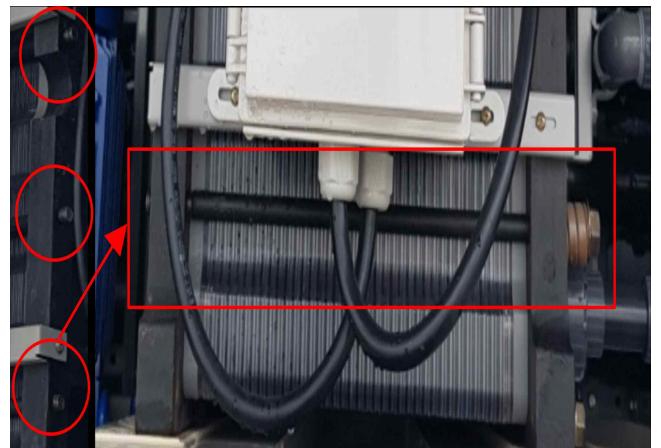
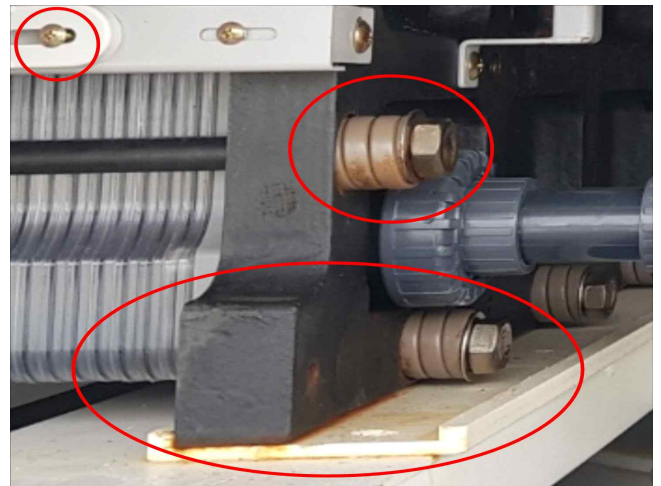
[표 1] VRFB와 리튬이온전지의 운용특성 비교

구분	VRFB	리튬이온전지
수명	20년 이상	7 ~ 10년
방전심도	100%	20% ~ 80%
효율	70% 이상	95% 이상
위험성	폭발 및 화재 위험 없음	폭발 및 화재에 취약함

3. VRFB의 사고사례 분석

3.1 VRFB의 사고사례

중국산 바나듐전해액을 사용했던 미국기업 Prudent Energy의 경우, 전해액 수백 톤이 결정화되는 문제가 발생하여 폐업이 된 상황이 발생하였으며, 국내에서도 해당 전해액을 사용한 G실증 사이트에서 이와 유사한 사례가 발생하였다. 또한, 최근 국내의 실증사이트의 경우, 그림 2와 같이 스택의 누수 현상으로 인하여, 스택을 구성하는 금속 부품에 녹이 발생하는 사례가 보고되고 있다.



[그림 2] VRFB 스택에서 녹이 발생한 사례

3.2 VRFB의 사고사례 분석

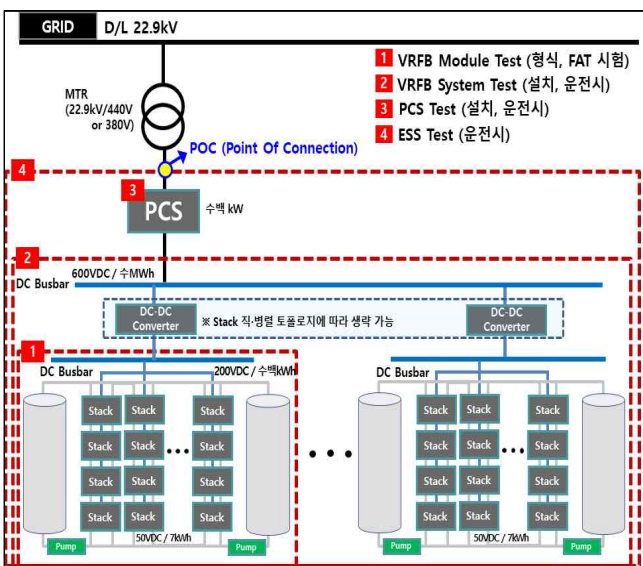
스택 부품 중 고장 가능성이 가장 높은 멤브레인은 내부 스택 전해액 누출을 생성 시키고, 카본펠트의 경우 흑연이 펠트 재료에서 벗겨져 전해질이 막힐 수 있으며, 바이폴라플레이트에 부식이 발생할 수 있다. 특히, 바나듐전해액은 바나듐금속이온, 황산, 물이 주요 성분이며, 사용하는 안정제로 인산 또는 붕산 성분이 미량 포함되어 있는데, 전해액 성분 중 황산이 약 30% 정도가 포함되어 있으므로 누수가 발생할 경우,

VRFB의 스택을 구성하는 금속부품을 지속적으로 부식시켜 고장을 일으킬 수 있다. 또한, VRFB는 안전한 전기저장장치라는 평가에도 불구하고 배터리 과충전 시 수소가스가 발생할 수 있고, 러한 수소가스 발생이 지속될 경우, 유체시스템의 내압으로 이어져 스택 및 배관부 등에 누수가 발생하여, 바나듐 전해액의 열화현상, 녹에 의한 프레임 노후화 등의 안전성 문제가 야기될 가능성이 있다. 따라서, VRFB의 장기적 운영관리 측면에서 주요 구성품(스택, 전해액, 펌프 등) 및 시스템 단위의 주기적 열화 진단기술에 의하여, 열화 평가 및 잔존 수명을 정량적으로 평가하기 위한 VRFB용 SAT 시험장치가 필요하다.

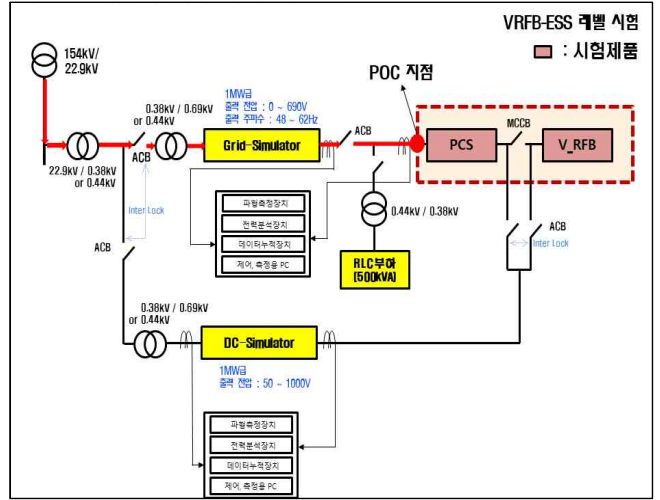
4. VRFB용 SAT 시험장치의 운용특성

4.1 VRFB용 SAT 시험장치의 구성

본 논문은 그림 3과 같이 VRFB의 공통연계지점(POC : Point Of Connection)에서의 시스템(ESS) 단위부터 DC busbar에 병렬 접속된 배터리(VRFB System) 및 PCS 단위까지 시험·평가가 가능하도록 VRFB용 SAT 시험장치를 제안한다. 또한, 상기에서 분류한 시험대상별 SAT를 수행하기 위한 세부 시험장치는 그림 2와 같이, VRFB 특화용 시험장치(VRFB 모의장치, BMS 평가용 센서, 임피던스 분광 시험장치, 전해액 전위차 측정장치), 계통연계 적합성 및 성능시험장치(계통모의장치, RLC모의부하), 안전성 시험장치(전기적 위협요인 측정 센서), 기타(통합 감시제어장치, 수배전기기) 등으로 구성한다.



[그림 3] VRFB용 SAT 시험장치의 시험범위



[그림 4] VRFB용 SAT 시험장치의 구성

4.2 VRFB용 SAT 시험장치의 운용특성

4.1절에서 제안한 VRFB용 SAT 시험장치를 바탕으로, VRFB용 SAT 시험장치의 운용특성을 분석하기 위하여, 표 2와 같이 용도, 성능, 안전 및 계통연계 적합성에 따른 시험평가 항목을 제시한다. 먼저 VRFB용도에 따른 시험은 계통출력 안정화용 PQ제어 시험, 전력부하 평준화용 Duty-cycle 용량 및 효율 시험, 태양광-풍력 연계 REC 거래용 Duty-cycle 용량 및 효율 시험 등 시험항목으로 구성한다. 또한, VRFB의 성능과 관련하여, Round-trip 용량 및 효율 시험, 전력품질특성 시험, 시스템응답 시험, 정격전압 및 주파수범위 시험 외 기존 시험규격서와 관련된 시험항목으로 구성한다.

한편, VRFB의 안전성과 관련하여, 전력계통 영향도에 따른 전기적 위협요인 즉, VRFB의 접지방식과 연계 전력계통의 순환전류, VRFB의 누설전류 등을 분석하고, 이에 대한 발생 원인 및 메커니즘을 파악하여, 이에 대한 전기적 보호장치 (IMD, SPD, 퓨즈 등)의 현장평가가 시험항목을 제안한다. 또한, VRFB의 계통연계 적합성시험과 관련하여, 송배전 설비 이용 규정 및 IEC 61400-21-1 표준을 기반으로 단독운전방지 (Anti-islanding), FRT (LVRT, HVRT), 유·무효전력 제어 시험 외 분산전원 계통연계기술기준과 관련된 시험항목으로 구성한다.

[표 2] VRFB 성능·안전성·계통적합성 시험평가

분류	시험 항목
용도 (ESS test)	계통출력 안정화용 PQ제어 시험, 전력부하 평준화용 Duty-cycle 용량 및 효율 시험, 태양광-풍력 연계 REC 거래용 Duty-cycle 용량 및 효율 시험
성능	Round-trip 용량 및 효율 시험, 전력품질특성 시험, 시스템응답 시험, 정격전압 및 주파수범위 시험 외 시험규격서와 관련된 시험

안전	비상정지 시험, 보호회로 시험, 사고전류, 서지, 누설전류, 절연저항, EMI, 접지방식 시험 외 시험규격서와 관련된 시험
계통연계 적합성	단독운전방지(Anti-islanding), FRT(LVRT, HVRT), 유·무효전력 제어 시험 외 분산형 전원 계통연계기술기준과 관련된 시험

한편, 배터리 고유특성에 따른 VRFB의 특화 시험은 국내 표준 KS-C 8547(흐름 전지 성능 및 안전성 시험방법), SPS-C KBLA-10304-02-7386(흐름전지 시스템 성능 안전 요구사항) 및 IEC 국제표준 등을 기반으로 표 2와 같이 VRFB 스택 및 시스템, 전해액, 펌프 등 각 구성에 대한 시험평가 항목을 제안한다. 먼저, VRFB 스택시험과 관련하여, 임피던스 분광 시험, OCV 변화 측정 시험으로 구성한다. 여기서, 임피던스 분광시험은 다중 주파수의 교류 신호를 이용하여 임피던스 수치 변화를 측정하고, 스택의 장기 운용에 따른 내부 저항 및 전극 활성화에 의한 손실 및 전압 효율 감소 확인을 통해 스택 열화를 평가하고, OCV 변화 측정 시험은 스택의 초기 OCV를 기준으로 운용중 OCV의 변화 측정을 통해 크로스오버 손실 및 전하량 감소를 확인한다. 즉, 시간 흐름에 따른 스택의 OCV 감소 기울기의 크기로 분리막의 노후 또는 특정 위치에 멤브레인 결함으로 인한 분리막 상태를 평가한다.

또한, VRFB 시스템시험과 관련하여, Round-trip 용량 및 효율 시험, BOP 에너지 손실 측정 시험으로 구성한다. 여기서, Round-trip 용량 및 효율 시험은 제조사가 제시하는 배터리의 최소 SOC부터 최대 SOC까지 충·방전 사이클 반복 시 배터리 측 입출력 전력을 측정하고, 용량 및 효율을 계산하여 기준 부합 여부를 판정한다. 그리고, BOP 에너지 손실 측정 시험은 POC 지점의 입출력 전력을 측정하여 펌프, 열 교환기, 스택간 센트, 센서, 기타 전장 부품 등 BOP 부품의 에너지 손실을 측정하여, VRFB의 전체 효율에 반영 및 평가한다.

한편, 전해액 시험과 관련하여, 전위차 적정 시험, 반쪽 전지 전위 측정 시험, 전해액 열화정도 시험으로 구성한다. 여기서, 전위차 적정 시험은 적정 용액(NaOH)으로 마나뎀 전해액의 마나뎀 이온과 직접 반응시켜 전해액 내의 마나뎀 농도(V3+ 농도, V4+ 농도) 확인을 통해 충전 유효 에너지량 감소 및 전해액의 노화를 평가하고, 반쪽 전지 전위 측정 시험은 기준 전극 대비 반대쪽 전극의 전위 상태를 확인하여, 부반응 및 전해액 크로스 오버에 대한 양극 및 음극의 전해액 균형 상태를 평가한다. 그리고, 전해액 열화정도 시험은 VRFB초기 설치 시 전해액 샘플을 바탕으로 사용년수별 물성특성 (비중, 점도, 전도도 측정)분석을 통한 열화정도 평가한다.

마지막으로 펌프(모터)시험과 관련하여, 모터 절연저항 시험, 입력전력 변동률시험, RPM 변동률 시험으로 구성한다. 여기서, 모터 절연저항 시험은 모터 권선의 절연 코팅제가 마모

될 경우, 절연저항이 낮아지고 단락위험은 높아지는데, 이는 성능저하로 나타나므로 모터 자체의 열화를 평가하기 위한 지표로 절연저항 측정한다. 그리고, 입력전력 변동률시험은 BLDC 모터의 내구성이 떨어질 경우 RPM을 유지하기 위한 자동 속도제어를 수행하기 때문에 소비전력이 늘어나며, 따라서 동일한 부하조건 및 목표 RPM 설정에서 입력(소비)전력을 측정하여 성능 저하율 및 열화를 평가한다. 또한, RPM 변동률 시험은 유도 전동기의 내구성이 떨어질 경우 속도저하 현상이 나타나므로 동일한 부하조건 및 입력(소비)전력에서 RPM을 측정하여, 성능 저하율 및 열화를 평가한다.

[표 3] VRFB 특화 시험평가 기술개발

분류	시험 항목
VRFB 스택	임피던스 분광 시험, OCV 변화 측정 시험
펌프	모터 절연저항 시험, 입력전력 변동률시험, RPM 변동률 시험
전해액	전위차 적정, 반쪽 전지 전위 측정, 전해액 열화정도 시험
VRFB 시스템	Round-trip 용량 및 효율 시험, BOP 에너지 손실 측정 시험

5. 결 론

본 논문에서는 VRFB의 사고사례를 분석하여, VRFB에서 발생할 수 있는 문제점들을 제시하고, 이를 바탕으로 VRFB 특화용 시험장치, 계통연계 적합성 및 성능시험장치, 안전성 시험장치, 기타 등으로 구성된 VRFB용 SAT 시험장치의 구성을 제안한다. 또한, 제안한 시험장치를 이용하여, 용도, 성능, 안전성 및 계통연계 적합성에 따른 운용특성을 제시하고, VRFB 시스템, VRFB 스택, 펌프, 전해액에 대한 SAT 시험평가 방안을 제시하여, 향후 VRFB에 대한 성능 및 신뢰성 평가를 위한 국내의 시험기준 제정에 기여하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010, No.20182410105070)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 장우석, "국내 ESS 산업 생태계의 위기." 현대경제연구원, 20-02 통권 734호, 2020. 01.