

# 250kW급 VRFB-ESS의 계통연계 적합성 평가장치의 모델링에 관한 연구

유현상\*, 조성덕\*, 태동현\*, 김웅상\*\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교, \*\*한국전기연구원

e-mail:hsyu@koreatech.ac.kr

## A Modeling of Grid-connection Compatibility Test Device in 250kW VRFB-ESS

Hyun-Sang You\*, Sung-Duck Cho\*, Dong-Hyun Tae\*, Eung-Sang Kim\*\*, Dae-Seok Rho\*

\*Korean University of Technology and Education, \*\*Korea Electrotechnology Research Institute

### 요약

최근, ESS의 화재사고를 대응하기 위해 정부의 권고사항 및 배터리 제조사의 자구책이 적용되고 있지만, 여전히 화재 사고가 발생하여 업계에 큰 타격을 주고 있으며, 이에 따라 화재 안전성이 확보된 VRFB(vanadium redox-flow battery) 기반의 대용량 ESS가 주목을 받고 있다. 여기서, VRFB는 기존의 리튬이온배터리 기반의 ESS에 비해 출력 성능과 에너지 밀도가 비교적 낮은 것으로 평가되고 있고, 수십년간 개발 및 운용을 해온 유럽이나 일본과는 달리, 국내의 경우 VRFB-ESS를 계통에 연계하여 운용한 사례가 적으므로, VRFB-ESS의 성능 및 계통연계 적합성에 대한 검증이 미흡한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 VRFB-ESS의 성능 및 계통적합성을 정확하게 검증하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 VRFB용 배터리부와 PCS부, 계통모의장치부 등으로 구성된 VRFB-ESS용 계통적합성 평가장치의 모델링을 수행한다. 또한, 이를 바탕으로 round-trip 효율시험, 단독운전 시험, FRT 시험의 시뮬레이션을 수행한 결과, 충·방전 효율과 단독운전 및 전압외란에 따른 연계·차단시간을 정확하게 평가할 수 있어, 제안한 VRFB-ESS의 계통연계 적합성 평가장치의 유효성을 확인하였다.

### 1. 서론

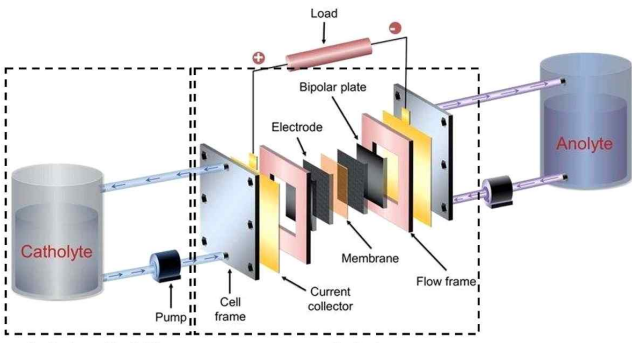
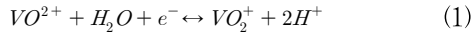
최근 정부의 3020정책에 따라, 신재생에너지원과 연계되는 에너지저장장치(energy storage system, ESS)의 설치 및 용량이 급속히 증가하고 있지만, ESS의 화재사고가 지속적으로 발생하고 있는 실정이다. 이러한 ESS의 화재사고를 막기 위해 정부의 권고사항과 배터리 제조사의 자구책이 적용되고 있지만, 여전히 화재사고가 발생하여 업계에 큰 타격을 주고 있으며, 이에 따라 화재위험성이 높은 리튬이온배터리 기반 ESS의 대안으로 화재 안전성이 확보된 VRFB 기반의 대용량 ESS가 주목을 받고 있다. 한편, VRFB는 수성 전해액 내 활물질의 산화 및 환원 반응으로 충·방전되며, 기존의 리튬이온 배터리에 비해 출력 성능과 에너지 밀도가 비교적 낮은 것으로 평가되고 있다. 또한, 수십년간 개발 및 운용을 해온 유럽이나 일본과는 달리, 국내의 경우 VRFB-ESS를 계통에 연계하여 운용한 사례가 적으므로, VRFB-ESS의 성능 및 계통연계 적합성에 대한 검증이 미흡한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 VRFB-ESS의 성능을 정확하게 검증하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여

VRFB용 배터리부, VRFB용 PCS부, 계통모의장치부 등으로 구성된 VRFB-ESS용 계통적합성 평가장치를 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, round-trip 효율, 단독운전 방지, FRT 특성을 제시하고, VRFB-ESS의 성능 및 계통연계 적합성을 평가하고자 한다.

### 2. VRFB-ESS의 운용특성

VRFB-ESS는 그림 1과 같이 VRFB 배터리부, 전해액 순환장치부로 구성되며, 양극 및 음극에 바나듐계 전해액을 사용하여, 유체 펌프를 통해 배터리 내부로 전해액 탱크에 저장되어 있는 전해액을 순환시켜, 두 전해액 간의 산화 및 환원 반응을 통해 충·방전을 수행한다. 여기서, VRFB 배터리부는 셀프레임, 집전장치, 바이폴라플레이트, 전극, 멤브레인 등으로 이루어진 단셀을 직렬로 연결한 스택의 직·병렬 조합으로 구성되며, 전해액 순환장치부는 전해액 탱크, 펌프, 배관, 밸브 등으로 구성된다. 한편, VRFB 배터리를 충·방전하는 경우, 식 (1)과 같이 양극에서 V<sup>4+</sup> 이온과 V<sup>5+</sup> 이온이 산화 및 환원되고, 식 (2)와 같이 음극에서 V<sup>3+</sup> 이온과 V<sup>4+</sup> 이온이 산화 및 환원되어, 전기 에너지와 화학 에너지 간의 변환이

발생한다. 여기서, VRFB 단셀의 전압은 1.3V 정도로, 기존 ESS에 주로 사용되는 리튬이온배터리의 전압(4.2V)에 비해 매우 낮으므로, 전압을 상승시키기 위해 단셀을 직렬로 연결하여 스택 단위로 구성하고, 스택을 직·병렬로 조합하여 ESS의 전압과 출력을 결정한다. 또한, 출력과 별개로 전해액 용량을 통해 ESS의 에너지 용량을 결정할 수 있어, 설치 이후 증설 및 변경이 용이한 장점이 있다[1].

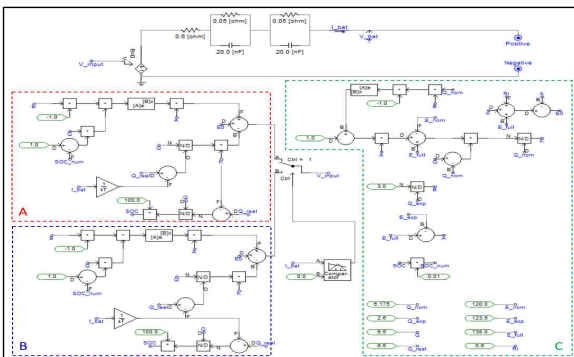


전해액 순환장치부 VRFB 배터리부  
[그림 1] VRFB-ESS의 구성

### 3. VRFB-ESS용 계통적합성 평가장치의 모델링

#### 3.1 VRFB용 배터리부 모델링

VRFB 배터리부에 대한 모델링은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 2 (A)는 방전 시 VRFB의 개방전압, 그림 2 (B)는 충전 시 VRFB의 개방전압을 산정하여 전압원에 입력한다. 또한, 그림 2(C)는 VRFB의 분극전압, 상수 전압, 배터리 용량, 지수영역 진폭 및 지수영역 시간 등과 같이 개방전압 산정에 필요한 파라미터를 산정한다[2].



[그림 2] VRFB 배터리부 모델링

#### 3.2 VRFB용 PCS부 모델링

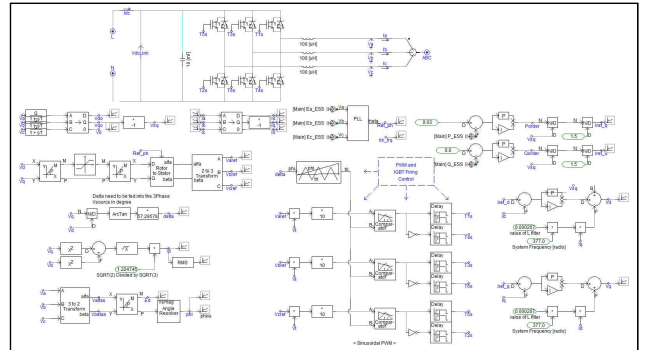
PCS부는 그림 3과 같이 6개의 반도체 스위치와 L-C필터, 전력 제어기로 구성되며, 비례적분(PI: proportional integral)

제어 알고리즘을 이용하여 유효전력과 무효전력의 제어를 수행한다. 여기서, 목표로 하는 ESS의 전력(유효전력, 무효전력)을 제어하기 위하여, ESS의 출력을 결정하는 dq축의 기준전류( $I_{d,ess}^*$ ,  $I_{q,ess}^*$ )를 산정한다. 즉, ESS의 목표 전력( $P_d^*$ ,  $Q_q^*$ )과 측정 값( $P_d(t)$ ,  $Q_q(t)$ )을 비교하여 전력차를 구한 후, 이를 비례적분하여 목표로 하는 dq축의 기준전류를 산정할 수 있다. 또한, 기준전류를 산정하는 식은 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고, 음의 값을 가질 때 ESS가 충전되고, 양의 값을 가지면 ESS는 방전기능을 수행한다.

$$I_{d,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P_d^* - P_d(t)) \quad (3)$$

$$I_{q,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q_q^* - Q_q(t)) \quad (4)$$

여기서,  $I_{d,ess}^*$ : d축 기준전류[A],  $I_{q,ess}^*$ : q축 기준전류[A],  $K_p$ : 비례제어 상수,  $K_i$ : 적분제어 상수,  $P_d^*$ : d축 목표 유효전력[W],  $P_d(t)$ : d축 현재 유효전력[W],  $Q_q^*$ : q축 목표 무효전력[var],  $Q_q(t)$ : q축 현재 무효전력[var]



[그림 3] PCS부 모델링

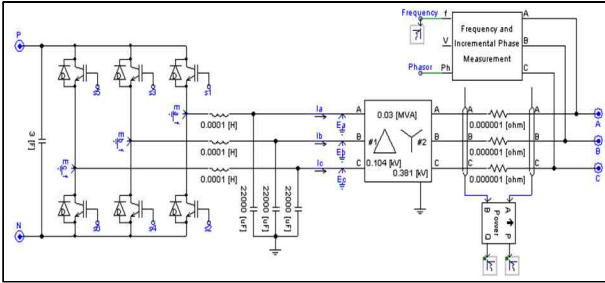
#### 3.3 계통모의장치부의 모델링

실제 계통과 동일한 외란을 발생시키는 계통모의장치부는 그림 4와 같이 제어부와 인버터부로 구성된다. 여기서, 제어부에서는 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답속도를 증가시키기 위하여, 식 (5)과 같이 목표전압( $V_{ac-ref}$ )과 현재 출력전압( $V(t)$ )의 차를 고려하여 비례제어신호를 산정하고, 오차를 누적하여 적분제어신호를 산정한다. 한편, 식 (6)는 삼각파의 반송파를 출력하는 제어신호를 나타내며, 식 (5)에서 생성된 기준파와 비교하여 PWM(Pulse Width Modulation) 신호로 변환된다. 상기의 관계식을 바탕으로, PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 계통모의장치 인버터를 모델링하면 그림 4와 같다[3].

$$Wave_{ref} = \left[ K_p \left( 1 - \frac{V(t)}{V_{ac-ref}} \right) + K_i \int_0^t \left( 1 - \frac{V(\tau)}{V_{ac-ref}} \right) d\tau \right] \cdot \sin(2\pi f(t)t + \phi(t)) \quad (5)$$

$$Wave_{carrier} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\omega t}{(2n-1)^2} \quad (6)$$

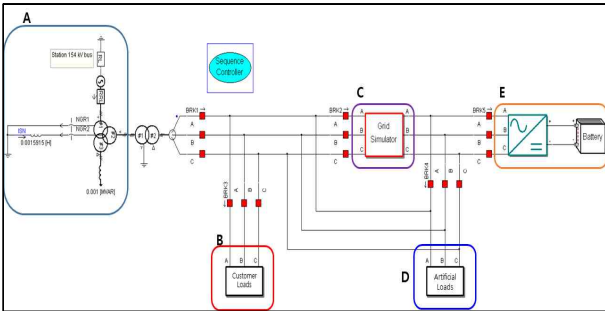
여기서,  $Wave_{ref}$ : 기준 파형,  $V(t)$ : 현재 전압,  $V_{ac-ref}$ : 목표 전압[V],  $f(t)$ : 목표 주파수[Hz],  $\phi(t)$ : 목표 위상,  $Wave_{ref}$ : 반송파 파형



[그림 4] 그리드시뮬레이터 인버터의 모델링

### 3.4 전체 평가장치 모델링

상기의 내용을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여, VRFB 배터리부, PCS부, 계통모의장치부 등으로 구성된 VRFE-ESS용 계통적합성 시험장치를 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, A부분은 한전 22.9kV 계통, B는 수용가 부하, C는 계통모의장치, D는 모의 RLC 부하, E는 VRFB-ESS를 나타낸다. 또한, 한전 22.9[kV]계통은 주변압기(45/60[MVA], 154/22.9 [kV])와 고압배전선으로 구성되며, 수용가 부하는 정전력 특성을 가진 부하로 구성한다.



[그림 5] 전체 평가장치의 모델링

## 4. 시뮬레이션 결과 및 분석

### 4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 250kW급 VRFB-ESS의 계통적합성을 평가하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정하여 round-trip 효율시험, 단독운전 방지 시험, FRT 시험을 수행한다. 여기서, round-trip 효율시험은 한국전지산업협회(KBIA)의 표준에 따라 0.25 C-rate 충·방전률로 3회 진행하는 것으로 상정하고, 단독운전 방지 시험은 KS C IEC 62116에 따라 ESS의 최대출력에서 계통 측을 차단하여 수행한다.

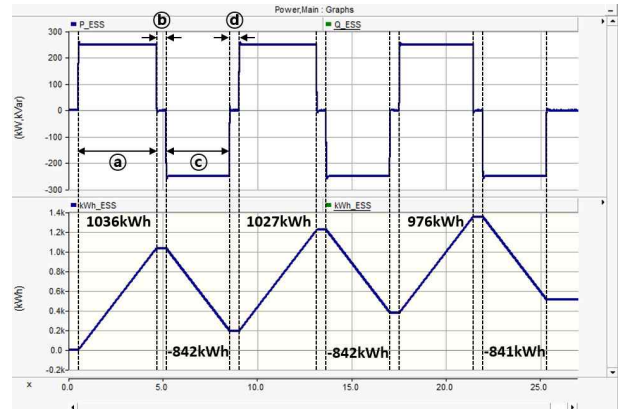
또한, FRT 시험은 분산전원 배전계통 연계 기술기준에 따라, 정격전압의 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.2배의 전압 외란을 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

VRFB-ESS	출력	250kW
round-trip	충·방전율	0.25 C-rate
	사이클 횟수	3
단독운전 방지	ESS 출력	250kW
	차단 시 계통측 유효/무효전력	ESS 출력의 ± 1% 이내
FRT	전압 외란[pu]	0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.2

### 4.2 round-trip 효율 특성

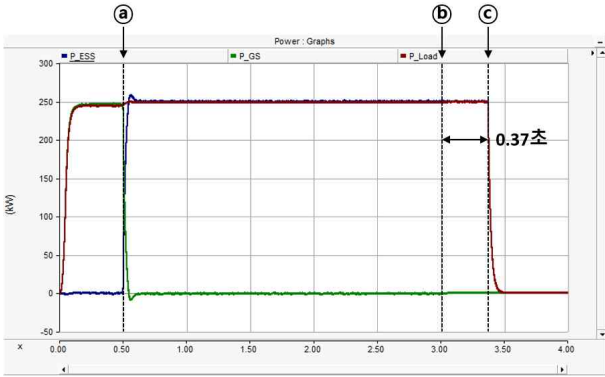
상기의 시뮬레이션 조건에 따라 round-trip 효율시험을 수행하여 산정된 VRFB-ESS의 출력 및 전력량을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 ㉠과 ㉡구간은 각각 ESS를 0.25 C-rate로 충전 및 방전을 수행한 구간이며, ㉢와 ㉣은 충전 및 방전종료 후 30분의 휴지시간을 나타낸다. 따라서, 3 cycle의 충·방전 효율의 평균값으로 산정된 round-trip 효율은 약 83.13[%]로 산정된다.



[그림 6] Round-trip 효율 특성

### 4.3 단독운전 방지 특성

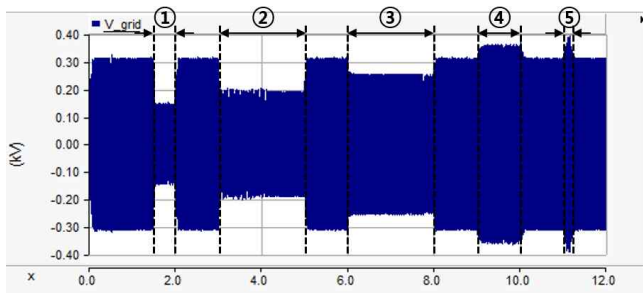
상기의 시뮬레이션 조건에 따라 VRFB-ESS의 단독운전 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 ㉠ 시점은 ESS의 방전이 시작되어 계통 측에서 부하 측으로 공급되는 전력이 감소하며, ㉡ 시점은 계통 측이 차단, ㉢ 시점은 ESS의 방전 종료 시점을 나타낸다. 따라서, 단독운전이 발생한 시점으로부터 약 0.37초에 ESS가 차단되어, 분산전원 배전계통 연계 기술기준에서 제시하는 0.5초 이내에 가압이 중단됨을 알 수 있다.



[그림 7] 단독운전 방지 특성

4.4 FRT 특성

상기의 모델링을 바탕으로, VRFB-ESS의 FRT 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8 (a)는 VRFB-ESS와 연계된 계통측 전압으로, ①, ②, ③, ④, ⑤구간은 각각 계통 기준전압의 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.2[p.u]의 전압외란이 인가된 시점을 나타낸다. 한편, 그림 8 (b)는 전압외란에 따른 ESS의 출력 특성을 나타내며, 계통 측 전압이 0.5[p.u]인 경우, 0.33초에 VRFB-ESS의 출력이 차단되고, 0.7[p.u]이면 1.08초, 0.9[p.u]이면 1.75초, 1.1[p.u]이면 0.6초, 1.2[p.u]이면 0.08초로 산정된다. 따라서, 계통측에서 전압외란이 인가되는 경우, VRFB-ESS는 분산전원 배전계통 연계 기술기준에서 제시하는 의무 운전지속시간 동안 목표전력으로 출력을 유지하여 계통과의 연계를 유지하고, 의무 분리시간 내에 계통과의 연계를 차단함을 알 수 있다.



(a) 계통측 전압외란



(b) VRFB-ESS의 출력 특성  
[그림 8] FRT 특성

[표 2] 분산전원 배전계통 연계 기술기준에 따른 FRT 기준

전압 범위 (기준전압에 대한 백분율[%])	의무 운전 지속시간 [초]	의무 분리시간 [초]	차단 동작시간 [초]
$V < 50$	0.15	0.5	0.33
$50 \leq V < 70$	0.16	2.00	1.08
$70 \leq V < 90$	1.5	2.00	1.75
$110 < V < 120$	0.2	1.00	0.6
$V \geq 120$	-	0.16	0.08

5. 결 론

본 논문에서는 화재 안전성이 확보된 VRFB-ESS의 충·방전 메커니즘을 제시하고, 관련 표준 및 기술기준에서 제시하는 시험방법에 따라, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 round-trip 효율시험, 단독운전 방지 시험, FRT 시험을 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 각 성능 및 계통연계 적합성을 평가한 결과, round-trip 효율은 한국전지산업협회(KBIA) 표준에 따라 0.25 C-rate로 3 cycle 충·방전하여 83.13[%]로 산정되고, 단독운전 방지 특성은 KS C IEC 62116에 따라 VRFB-ESS의 최대출력에서 계통 연계를 차단하면 약 0.37초에 ESS가 차단됨을 확인하였다. 또한, 분산전원 배전계통 연계 기술기준에 따라 FRT 특성을 평가한 결과, 모든 전압외란 조건에서 의무 운전지속시간 및 분리시간을 만족하여, 본 논문에서 제시한 VRFB-ESS의 계통연계 적합성 평가 모델링의 유효성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 국가과학기술연구회(NST)의 지원을 받아 수행한 연구(No.CPS22131-120)와 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008458, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

[1] Kyle Lourenssen, James Williams, Faraz Ahmadpour, Ryan Clemmer, Syeda Tasnim, “Vanadium redox flow batteries: A comprehensive review”, Journal of Energy Storage 25(2019)

[2] 신건, “PSCAD/EMTDC를 이용한 VRFB-ESS의 모델링에 관한 연구”, 2022년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집

[3] 최익준, “MW급 ESS용 이동형 성능평가 시험장치의 모델링 및 구현에 관한 연구”, 2021.11 한국산학기술학회 논문지 제22권 11호