

PSCAD/EMTDC를 이용한 VRFB-ESS용 이동형 시험장치의 모델링에 관한 연구

신건, 박찬욱, 이민행, 전진택, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:sheengun@koreatech.ac.kr

A Study on Modeling of Movable Test Device for VRFB-ESS using PSCAD/EMTDC

Jian Shen, Chan-Wook Park, Min-Haeng-Lee, Jin-Taek Jeon and Dae-Seok Rho
Dept. of Electrical, Electronic & Communication Engineering, Koreatech

요약

최근, 국내에서 발생한 리튬이온배터리 기반의 ESS의 화재로 인하여, ESS의 설치용량은 매년 감소하고 있는 추세이다. 이에 대한 대응방안으로, 화재 안전성이 확보된 VRFB(vanadium redox-flow battery) 기반의 대용량 ESS가 주목을 받고 있다. 여기서, VRFB는 기존의 리튬이온배터리 기반의 ESS에 비해 화재의 위험성은 거의 없지만 출력 성능이 비교적 낮은 것으로 평가되고 있고, 수십년간 개발 및 운용을 해온 유럽이나 일본과는 달리, 국내의 경우 VRFB-ESS를 계통에 연계하여 운용한 사례가 매우 적으므로, VRFB-ESS의 계통연계 적합성 및 성능에 대한 검증이 매우 미흡한 실정이다. 한편, VRFB-ESS는 현장의 환경 혹은 조립하는 사람에 따라 완성 품질이 달라지므로, 필드단위에서의 성능 및 안전성에 대한 시험평가가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 VRFB-ESS의 성능을 보다 정확하고 신뢰성 있게 검증하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 VRFB부, 계통모의장치부 등으로 구성된 VRFB-ESS용 이동형 시험장치의 모델링을 제안한다. 또한, 제안한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, LVRT, duty-cycle 및 round-trip 효율시험을 정확하게 수행할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

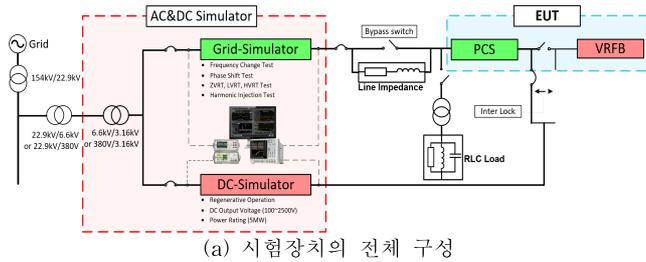
전 세계 ESS 시장은 25년에는 86.9GWh에서 30년에는 180GWh까지 늘어날 전망이다. 연이은 리튬이온배터리 기반의 ESS의 화재로 인하여, 2019년에는 3.7[GWh]의 ESS가 설치되어 2018년의 설치용량인 5.6[GWh]보다 33.9%가 감소하였고, 현재도 감소하고 있는 추세이다[1]. 따라서, 화재위험성이 높은 리튬이온배터리 기반 ESS의 대안으로 화재 안전성이 확보된 VRFB기반의 대용량 ESS가 주목을 받고 있다. 여기서, VRFB는 수성 전해액 내의 활물질이 산화-환원되어 충·방전되는 시스템으로 전기화학적 장치를 말하는데, 기존의 리튬이온배터리 기반의 ESS에 비해 화재의 위험성은 거의 없지만 출력 성능이 비교적 낮은 것으로 평가되고 있다. 또한, 수십년간 개발 및 운용을 해온 유럽이나 일본과는 달리, 국내의 경우 VRFB-ESS를 계통에 연계하여 운용한 사례가 매우 적으므로, VRFB-ESS의 계통연계 적합성 및 성능에 대한 검증이 매우 미흡한 실정이다 [2, 3]. 한편, VRFB-ESS는 각 제품의 품질과 성능 및 안전성

이 보장되더라도 현장의 환경 혹은 조립하는 사람에 따라 완성 품질이 달라지므로, 필드단위에서의 성능 및 안전성에 대한 평가가 요구되고 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 VRFB-ESS의 성능을 보다 정확하고 신뢰성 있게 검증하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 VRFB부, 계통모의장치부 등으로 구성된 VRFB-ESS용 이동형 시험장치에 대한 모델링을 제안한다. 또한, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, LVRT, duty-cycle 및 round-trip 효율시험을 정확하게 수행할 수 있음을 확인하였다.

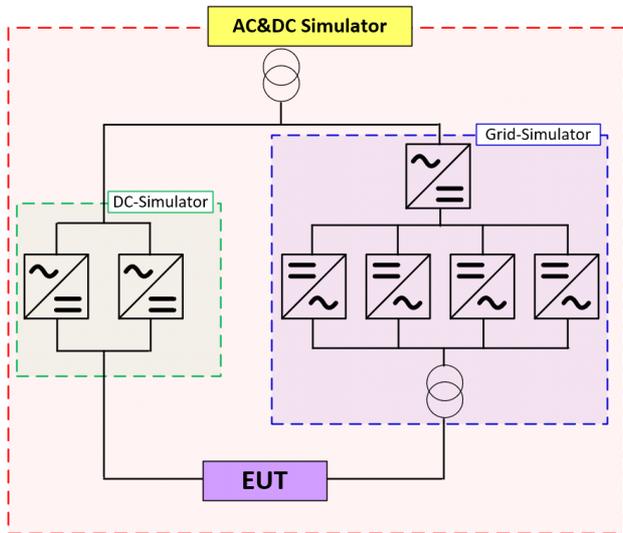
2. VRFB-ESS용 이동형 시험장치의 구성

VRFB-ESS용 이동형 시험장치는 그림 1과 같이 VRFB부, 계통모의장치부 등으로 구성한다. 여기서, 배전계통의 주파수 변동과 순시전압강하(sag), 순시전압상승(swell), 고조파, LVRT와 같은 계통외란을 유사하게 모의할 수 있는 계통모의장치는 양방향 전력변환장치를 이용하여 구성한다. 이 장치는 충전회로부, 정류기부, 저역통과 필터부, 인버터부 및 사인 필터부 등으로 구성된다. 즉, 정류기부와 인버터부를 통하

여 AC전력을 DC로 변환하고, DC전력을 다시 AC로 변환하여 전압과 주파수, 위상을 출력하며, 각각의 필터부를 통하여 전력변환 시 발생하는 고조파를 저감시킨다. 이 장치의 주요 기능은 전압설정범위를 0~550[V]까지 0.1[V] 단위로 전압변동이 가능하며, 주파수 불변상태에서 순간정전과 같은 전압급변이 가능하다. 또한, 정격 주파수는 0.1[Hz]단위로 최대 60±10[Hz] 까지 가변 가능하며, 고조파(1~50차)는 최대 10[%]까지 발생시킬 수 있다.



(a) 시험장치의 전체 구성



(a) 계통모의 장치의 구성

[그림 1] VRFB용 이동형 시험장치의 구성

3. VRFB-ESS용 이동형 시험장치의 모델링

3.1 VRFB부 모델링

목표로 하는 VRFB의 유효전력과 무효전력을 구하기 위하여, VRFB의 출력을 결정하는 d-q축의 기준전류(I_{ref-d} , I_{ref-q})를 먼저 산정하여야 한다. 즉, VRFB-ESS의 기준 DC 링크전압과 목표전력에 의한 DC 링크전압을 비교하여 전압차를 구한 후, 이 전압차를 비례적분(PI: proportional integral)하면 목표로 하는 d-q축의 기준전류를 구할 수 있다. 여기서, 기준전류를 산정하는 식을 나타내면 식 (1), 식 (2)와 같다[6].

$$I_d^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(V_{DC-d}^* + V_{DC-d}) \quad (1)$$

$$I_q^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(V_{DC-q}^* + V_{DC-q}) \quad (2)$$

여기서, I_d^* : d축 전류, I_q^* : q축 전류, V_{DC-d}^* : 기준 DC 링크전압, V_{DC-dq} : 목표 DC 링크전압

또한, 기준전류가 음의 값을 가질 때 VRFB를 충전시키고, 양의 값을 가질 때 VRFB를 방전시키기 위하여, 기본 전류 제어 알고리즘에 적용하면 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 전류제어알고리즘은 디커플링 회로이기 때문에 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d)(K_p + \frac{K_i}{s}) - I_q \times \omega L + V_{sq} \quad (3)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q)(K_p + \frac{K_i}{s}) - I_d \times \omega L \quad (4)$$

여기서, I_{ref-q} : 인버터 출력의 기준전류, I_q : 계통의 전류

3.2 계통모의 장치의 모델링

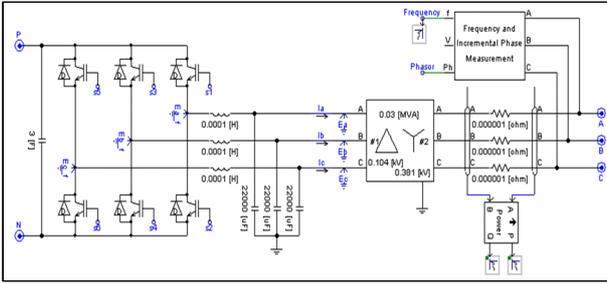
실 계통과 동일한 외란을 발생시킬 수 있는 계통모의 장치는 그림 2와 같이 제어부와 인버터부로 구성된다. 구체적으로 제어부에서는 목표로 하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성도 빠르게 하기 위하여, 식 (3)과 같이 PI제어 알고리즘을 이용한다. 여기서, 식 (3)의 첫 번째 항은 목표전압(V_{ac-ref})과 현재 출력전압($V(t)$)의 차를 고려하여 비례제어신호를 산정하고, 두 번째 항은 오차를 누적하여 적분제어신호를 구한다. 세 번째 항은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 제어신호를 나타낸다. 한편, 식 (4)는 삼각파의 반송파를 출력하는 제어신호를 나타내며, 식 (3)에서 생성된 기준파와 비교하여 PWM(Pulse Width Modulation) 신호로 변환된다.

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

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

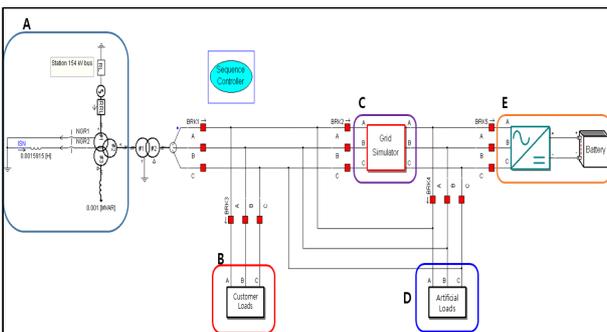
여기서, $Wave_{ref}$: 기준 파형, K_p : 비례 계수, K_i : 적분 계수, $V(t)$: 현재 전압, V_{ac-ref} : 목표전압, $f(t)$: 목표 주파수, $\phi(t)$: 목표 위상

상기의 관계식을 바탕으로, PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 계통모의장치 인버터를 모델링하면 그림 5와 같고, PWM으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 구동되는 IGBT는 계통모의장치 제어부에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시킨다.



[그림 2] 그리드시뮬레이터 인버터의 모델링

3.3 전체 VRFB-ESS용 이동형 시험장치 모델링
 상기의 내용을 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여, VRFB부, 계통모의장치부 등으로 구성된 이동형 성능평가 시험장치를 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서 A부분은 한전 22.9kV 계통, B는 수용가 부하, C는 계통모의장치, D는 모의 RLC 부하, E는 전기저장장치를 나타낸 것이다. 즉, 한전 22.9[kV]계통은 주변압기(45/60[MVA], 154/22.9 [kV])와 고압배전선로로 구성되며, 수용가 부하는 정전력 특성을 가진 부하로 구성한다. 또한, 계통모의장치는 제어부와 인버터부로 구성되며, 제어부에서는 목표하는 전압의 오차를 줄이고 응답특성도 빠르게 하기 위하여 PI제어 알고리즘을 이용하고, 인버터 부에서는 계통모의장치 제어부에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환하도록 구성한다. 한편, 모의 부하는 정입피던스 특성을 가진 RLC 부하로 구성하고, 전기저장장치는 전류제어알고리즘을 적용하여 유효전력과 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있도록 구성한다.



[그림 3] 전체 VRFB-ESS용 이동형 시험장치 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 VRFB-ESS용 이동형 시험장치 모델링의 성능을 검증하기 위하여, 표 1과 같이 시험조건을 상정하여, round-trip 효율시험, duty-cycle 추종시험 및 LVRT 시험을 수행한다. 여기서, round-trip 효율시험은 1 C-rate 충·방전

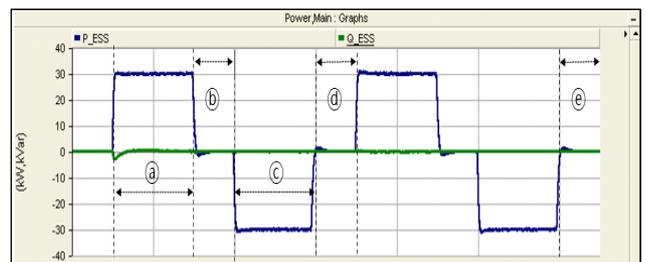
률로 2회 진행하는 것으로 상정하고, duty-cycle 효율시험은 PNNL-22010의 Average(2시간) 패턴을 사용하며, LVRT 시험은 0, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9의 전압을 적용한다.

[표 1] 성능검증을 위한 시뮬레이션 조건

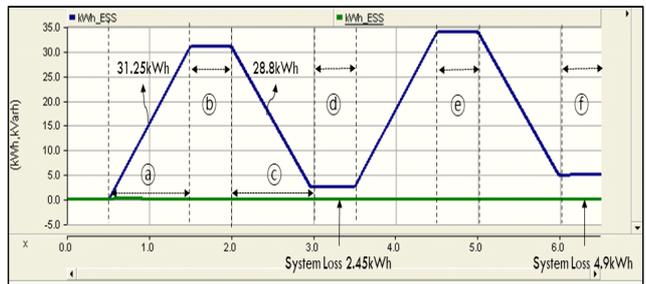
VRFB-ESS	출력	30kW
round-trip	충·방전율	1 C-rate
	사이클 횟수	2 Cycle
duty-cycle	패턴	PNNL-22010 (Average 2[h])
LVRT	전압강하크기[pu]	0, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9
	지속 시간[s]	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 1, 5

4.2 Round-trip 효율 특성

표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 round-trip 효율시험을 수행하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 4(a)는 2-cycle 동안 VRFB-ESS 운전모드(충전, 방전, 휴지기간)의 유효전력을 나타내고, 그림 4(b)는 VRFB-ESS의 적산된 에너지양(SOC)을 나타낸 것이다. 즉, ㉠구간은 VRFB-ESS를 0.45C-rate로 배터리의 충전종료전압까지 충전한 구간의 SOC 특성을 나타내며, 충전전력량은 약 700[kWh]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, ㉡구간은 VRFB-ESS를 0.45C-rate로 배터리의 방전종료전압까지 방전한 구간의 SOC 특성을 나타내며, 배터리의 방전전력량은 약 656[kWh]로 산정됨을 알 수 있다. 한편, ㉢, ㉣, ㉤구간은 VRFB-ESS의 충·방전 운전 후 최소 30분 이상의 휴지시간을 나타낸다. 따라서, round-trip 효율(충전량 대비 방전량)은 약 93.7[%]로 산정된다.



(a) VRFB-ESS의 출력



(b) VRFB-ESS의 에너지 누적량

[그림 4] Round-trip 효율 특성

4.3 LVRT 특성

상기의 시뮬레이션 조건에 의하여 LVRT 시험을 수행하면 그림 5와 같다. 여기서, 첫 번째 구간에서 0.15초 동안 0[pu]의 전압으로 저하되고, 두 번째 구간에서는 0.2초 동안 0.55[pu]의 전압이 지속됨을 알 수 있다. 또한 세 번째 구간 이후는 0.2초 ~ 5초까지 0.56[pu] ~ 0.9[pu]로 증가시켰을 때, VRFB-ESS가 계통과 연계되어 안정적으로 운전되고 있음을 확인할 수 있었다.

(a) 계통모의 장치의 전압특성

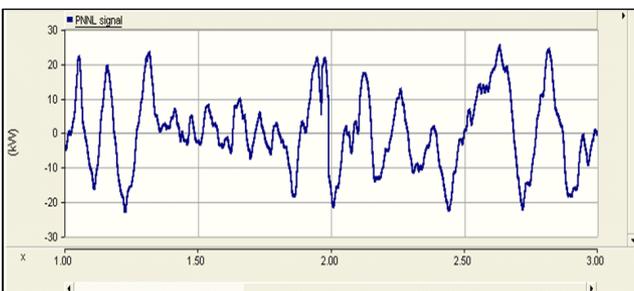


(b) VRFB-ESS의 출력 특성

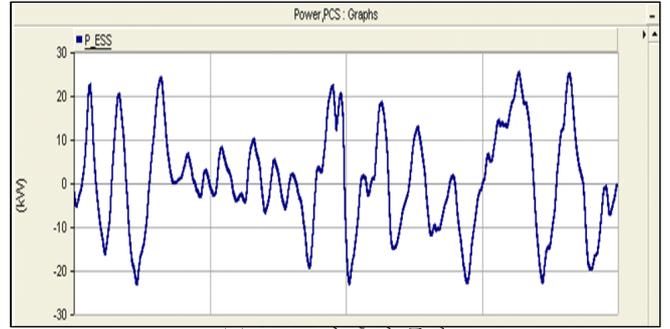
[그림 5] LVRT 특성

4.4 Duty-cycle 추종 특성

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 Duty-cycle 효율시험을 수행하면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6(a)는 PNNL-22010에서 제시한 주파수 패턴을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제어신호로 변환한 것을 나타내며, 총 1,800개의 신호가 4초 간격으로 출력되도록 상정하였다. 또한, 그림 6(b)는 전기저장 장치의 충·방전 운전을 나타낸 것으로, 그림 6(a)의 제어신호에 따라 전기저장장치의 출력이 추종되고 있음을 확인하였다.



(a) PNNL-22010 신호



(b) VRFB의 출력 특성

[그림 6] Duty-cycle 효율 특성

5. 결론

본 논문에서는 VRFB-ESS의 성능을 보다 정확하고 신뢰성 있게 검증하기 위하여, 현장에 설치된 VRFB의 계통 연계 적합성 및 성능을 평가 할 수 있는 VRFB-ESS용 이동형 시험장치를 제안하였다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제안한 시험장치에 대한 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 계통연계 적합성 및 성능 시험을 수행한 결과, VRFB-ESS가 정해진 용량과 시간동안 정확하게 충·방전 운전을 수행하였음을 알 수 있었다. 또한, Duty-cycle 효율시험에 대한 시험특성을 분석한 결과, PNNL-22010의 제어신호에 따라 VRFB-ESS의 출력이 정확하게 추종되고 있음을 알 수 있었으며, LVRT에 대한 시험특성을 분석한 결과, 모든 조건에서 VRFB-ESS가 계통에 연계되어 안정적으로 운전되고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), "Construction of Test Facilities for MW Class Energy Storage system and Power Converter", 2013.
- [2] 김상원, "레독스 흐름전지의 연구 동향 및 기술 분석", 화학공학소재연구정보센터, 2021.04.
- [1] SNE Research, "Redox Flow Battery 최근 기술 동향 및 시장 전망(-2025)", Premium market reports, 2020.08.