

## 흐름전지 기반의 BESS 시뮬레이터 구축

신성빈\*, 윤창우\*, 이영일\*  
 서울과학기술대학교 전기정보기술연구소\*

### Designing flow battery based BESS simulator

Seongbin Shin\*, Changwoo Yoon\*, Young-il Lee\*  
 RCEIT at Seoul National University of Science and Technology\*

**Abstract** - Vanadium Redox Flow Battery(VRFB, 바나든희름전지)는 흐름전지 기반의 배터리 저장장치로서 내부 전해질이 물 기반의 수용성 전해질로 구성되어 있어 화재에 강한 비(非)연소성 ESS이다. 본 논문에서는 흐름전지 기반의 BESS 시뮬레이터 구축의 일환으로, VRFB와 Dual Active Bridge Converter (DAB)을 각각 모델링하여, DAB를 통한 VRFB의 제어결과와 고려사항에 대해 소개한다.

#### 1. 서 론

세계적으로 환경문제가 더불어 기후변화가 악화되고 있는 가운데, 지구온난화에 대한 대처로 신재생에너지에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 하지만, 태양광이나 풍력과 같은 신재생에너지는 시간대에 따라 출력 에너지의 최대/최소 출력의 차이가 크고, 이로 인하여 재생에너지의 최대출력이 최고치인 경우 잉여에너지의 생산이, 최저치일때는 에너지 부족현상이 발생할 우려가 있다. 따라서, 신재생에너지의 출력을 균일화하기 위해 Energy Storage System (ESS)의 수요가 근래에 빠르게 증가하고 있다. ESS의 경우, 리튬이온 기반의 ESS가 많이 보급되어 있으나, 최근 리튬이온 배터리의 화재가 빈번하게 발생하는 점으로 인해, 화재에 상대적으로 취약한 주유소나 건물 등은 물론 여타 많은 장소에서 화재위험이 없는 ESS의 필요성이 대두 되었다.

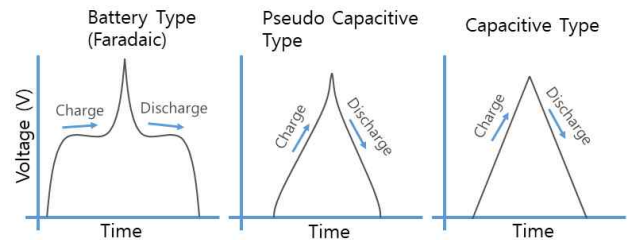
#### 2. 본 론

##### 2.1 BESS

##### 2.1.1 ESS 종류

Energy Storage System (ESS)은 에너지의 저장방식(화학, 전기, 기계, 전기화학 방식 등)에 따라 다양한 종류로 분류 할 수 있다. 예를 들어, Hydrogen Fuel Cell은 화학적으로 에너지를 저장하고, Supercharger는 전기적으로, 이차전지나 흐름전지는 전기화학적으로 에너지를 저장한다. [1]

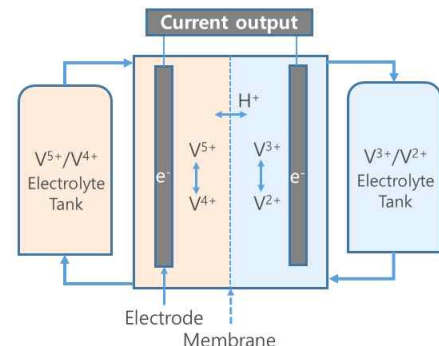
이차전지와 흐름전지 기반의 Battery Energy Storage System (BESS)는 이 중 전기화학방식으로 분류되는데, 전극을 통한 전기에너지의 교환이 일어난 뒤, 화학적으로 에너지가 축적되는 배터리의 특성으로 인하여, 그림 1과 같이 충방전 양 끝단 (배터리가 완전히 충전됨에 가깝거나, 완전히 방전됨에 가까운 경우)에서 전압의 급격한 Transient가 발생하게 된다. 이런 Voltage Transient는 BESS가 연결되어 있는 컨버터 및 계통에 필요이상의 부담을 가져 올 수 있기 때문에 지양되어야 하고, 따라서 Voltage Transient의 제어는 BESS와 계통을 연계하는 것에 있어서 주요과제 중 한 가지이다. 본 논문에서는 기존의 리튬이온배터리의 빈번한 화재로 인해 새롭게 대두된 화재 위험성이 적은 BESS인 Vanadium Redox Flow Battery(VRFB, 바나든희름전지)를 기반으로 배터리의 시뮬레이션을 만들어, 시뮬레이션 상에서 VRFB와 DAB (Dual Active Bridge Converter)를 연결하여 VRFB 출력전압을 PI Control을 통해 제어하는 과정을 시연해보았다.



<그림 1> 정전류 충방전시 전압의 차이 (좌)Battery type (중)Pseudo Capacitive type (우)Capacitive type

##### 2.1.2 VRFB의 모델링

VRFB란 바나듐 이온의 여러 충전상태를 이용한 흐름전지로서 흐름전지 중에서 상용화에 가장 가까운 ESS이다. 본 연구에서는 Matlab/Simulink로 흐름전지의 원리를 구현하였고, 모델링의 설명과 Stack(37 Cell 기준) 단위의 시뮬레이션 결과를 소개한다.



<그림 2> VRFB의 구조도

VRFB는 그림 2와 같이 V<sup>2+</sup>, V<sup>3+</sup>와 V<sup>4+</sup>, V<sup>5+</sup>가 각각 양쪽의 탱크에 쌓을 이루어 저장이 되어있는 상태에서 가운데 분리막을 통한 수소이온의 교환으로 발생하는 산화 및 환원을 통한 에너지의 저장/방출을 기본 원리로 한다. 이때 VRFB의 양 전극에서 발생하는 물질균형의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_E \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_{2c+}^{out} \\ c_{3c+}^{out} \\ c_{4c+}^{out} \\ c_{5c+}^{out} \end{pmatrix} = \frac{1}{F} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -I \\ +I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} J_{2Cross+} \\ J_{3Cross+} \\ J_{4Cross+} \\ J_{5Cross+} \end{pmatrix} + \frac{Q_S}{N_C} \begin{pmatrix} c_{2T+} - c_{2C+}^{out} \\ c_{3T+} - c_{3C+}^{out} \\ c_{4T+} - c_{4C+}^{out} \\ c_{5T+} - c_{5C+}^{out} \end{pmatrix}$$

<식 1> 양극에서 일어나는 전류와 바나듐 이온의 관계식

$$V_E \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} c_{2c-}^{out} \\ c_{3c-}^{out} \\ c_{4c-}^{out} \\ c_{5c-}^{out} \end{pmatrix} = \frac{1}{F} \begin{pmatrix} +I \\ -I \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} J_{2Cross-} \\ J_{3Cross-} \\ J_{4Cross-} \\ J_{5Cross-} \end{pmatrix} + \frac{Q_S}{N_C} \begin{pmatrix} c_{2T-} - c_{2C-}^{out} \\ c_{3T-} - c_{3C-}^{out} \\ c_{4T-} - c_{4C-}^{out} \\ c_{5T-} - c_{5C-}^{out} \end{pmatrix}$$

<식 2> 음극에서 일어나는 전류와 바나듐 이온의 관계식

( $V_F$ 는 Electrode의 부피,  $c$ 는 각 이온의 밀도,  $c_T$ 는 VRFB 전해질 탱크에 존재하는 이온의 밀도,  $F$ 는 Faraday's Constant,  $J$ 는 탱크를 빠져나가는 이온의 Flux,  $N$ 은 Cell의 개수,  $Q$ 는 Stack의 유량)

$$SoC_T = \frac{\sqrt{\frac{C_{2T-} \cdot C_{5T+}}{C_{3T-} \cdot C_{4T+}}}}{1 + \sqrt{\frac{C_{2T-} \cdot C_{5T+}}{C_{3T-} \cdot C_{4T+}}}}$$

### <식 3> SoC 계산식

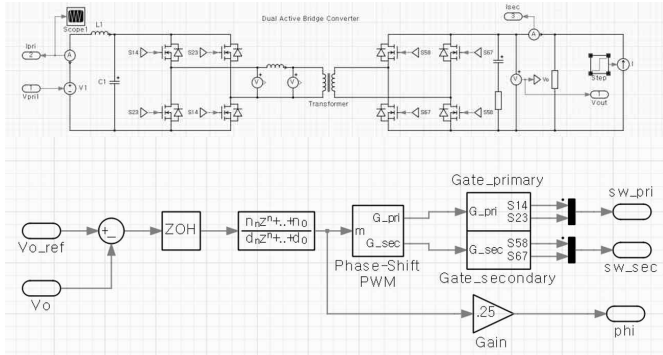
식 1, 2를 바탕으로 균형방정식을 만들면 바나듐 전해질 탱크의 이온 밀도를 도출 할 수 있는데, 이를 통해 VRFB의 SoC값을 구할 수 있다.

또한, Nernst 식을 이용하면 정해진 SoC값에 따른 VRFB의 단위 셀의 출력 전압을 구할 수 있으므로, 최종적으로 입력전류 I에 대한 출력전압 V를 도출하는 모델을 구현 할 수 있다.

$$E_{Cell} = E_{Cell}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{SOC^2}{1 - SOC^2} \right)$$

### <식 4> Nernst 식을 통한 VRFB 출력전압 유도식

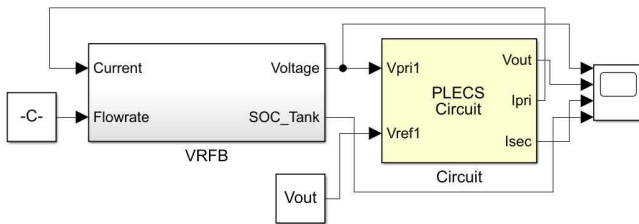
## 2.2 VRFB - DAB 연계 시뮬레이션



<그림 3> PLECS기반 DAB의 모델링

이어서, VRFB가 실제 Microgrid에 연결되는 상황을 가정하여 DAB Converter와 연계를 통한 시뮬레이션을 진행하였다. DAB는 그림 3과 같이 PLECS를 기반으로 설계하였고, PI 제어를 기반으로 모델링하였다.

상기 두 모델, VRFB와 DAB를 Matlab/Simulink상에서 연계하여 VRFB의 출력전압에 변동에 대응하는 DAB Control를 시뮬레이션하였다.

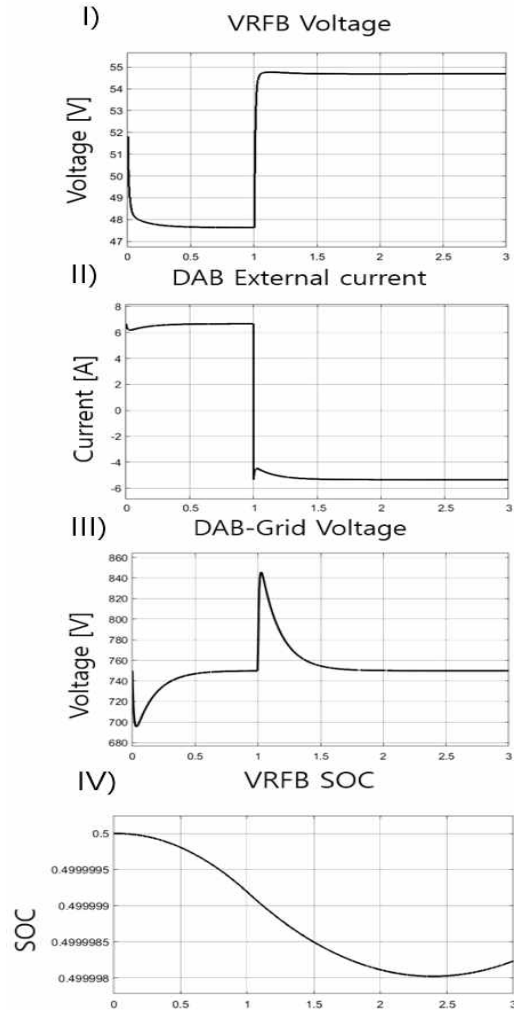


<그림 4> VRFB - DAB 연계 시뮬레이션

## 2.3 시뮬레이션 결과

그림 4처럼 Matlab/Simulink 상에서 VRFB와 DAB를 연결 후, Voltage transient가 가장 크게 발생하는 충전과 방전의 스위칭 구간의 시뮬레이션을 진행 하고, DAB에서 설계한 PI Controller의 작동에 대한 검증을 하였다. (Grid 레퍼런스 전압 (760V)) 결과적으로, 그림 5.I와 같이 VRFB상에서 방전 중 충전으로 전류방향을 스위칭 할 경우, 전류방향의 전환으로 (그림 5.II) 전압의 급격한 상승 (37셀 기반 1스택 기준 48V -> 55V)의 Voltage transient가 발생하는데, 그림 5.III와 같이 DAB를 통해 Grid로 출력되는 전압의 경우 0.5s 이내 레퍼런스 값으로 제어가 가능한 것을 확인 할 수 있었다. 또한, VRFB의 SoC의 경우 방전에

서 충전으로 스위칭 이후, 실제로 충전이 이루어 지는 것까지 딜레이가 생기는 것을 확인 할 수 있었는데(그림 5.IV), 이는 Stack에서 전류방향이 바뀌고 SoC에 실질적인 영향을 미치는 Tank의 바나듐이온 전해액의 변화가 오기까지의 딜레이로 인하여 발생하는 것으로 사료된다.



<그림 5> I) VRFB 전압 II) DAB 전류 III) DAB-Grid측 전압 IV) VRFB SoC

## 3. 결론

본 논문에서는 흐름전지 기반의 BESS 시뮬레이터 구축의 일환으로 Simulink와 PLECS에 기반한 시뮬레이션용 VRFB와 DAB의 모델을 제작하였고, PI Control을 통한 VRFB-DAB의 출력 전압의 제어를 진행하였다. 본 모델링을 통한 최적화는 향후 시뮬레이터의 구축에 기여를 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2019R1A6A1A03032119), 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “국제공동기술개발사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과임. (과제번호 20210379)

### [참고 문헌]

[1] C. K. Das, “Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 1205-1230, 2018