

# 역전기투석 시스템 계통연계 운전을 위한 모델링 및 시뮬레이션

정윤철, 좌은진, 최지연, 황교식, 한지형, 고희상, 정남조  
한국에너지기술연구원

## Modeling and Simulation of Reverse Electrodialysis System for Grid-Connected Operation

Yoon-Cheul Jeung, Eunjin Jwa, Jiyeon Choi, Kyo Sik Hwang, Ji-Hyung Han, Hee-Sang Ko, Namjo Jeong  
Korea Institute of Energy Research

### ABSTRACT

본 논문에서는 역전기투석 시스템의 제어기설계 및 운용을 위한 스택의 모델링 방법 및 전력변환장치를 연계한 계통연계 구성 방안을 제시한다. 시뮬레이션을 통해 역전기투석 시스템의 계통연계 동작을 확인한다.

### 1. 서론

기후 문제의 심각성이 두드러지고 탄소중립에 대한 관심이 높아짐에 따라 태양광 및 풍력발전을 중심으로 신재생에너지 발전 비중은 매년 가파르게 증가하고 있다.

변동성 재생에너지의 비중이 증가함에 따른 덩커브(Duck curve)와 같은 전력망의 안정성 문제가 보고되고 있으며, 국내에서도 출력제한 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하고자, 대용량 ESS(Energy Storage System), P2G(Power to Gas), P2H(Power to Heat) 등과 같은 에너지 전환 기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 집합 자원을 모집하여 운용하는 VPP(Virtual Power Plant)와 같은 개념도 부각되고 있으나 현재까지 명확한 해법은 제시되지 않고 있다.

한편, 역전기투석(Reverse Electrodialysis, RED)은 전기를 이용해 이온을 분리하는 전기투석(Electrodialysis, ED)의 반대되는 개념으로, 그림 1과 같이 이온교환막을 이용하여 두가지 용액의 농도 차이에 의한 이온의 분리 및 이동을 통해 전력을 생성하는 방식이다. RED는 환경 변화에 영향을 크게 받지 않고 전력을 생산할 수 있어 덩커브 완화 및 기저 발전 기여 등 다양한 형태로 활용될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

1950년도에 RED의 개념이 제안된 이래로, 실험실 규모로 소재 및 스택기술 개발을 통한 장기안정성 향상, 전력밀도 개선 등에 관한 연구가 수행되었다. 최근에는 직병렬 연결 등을 통한 출력 용량 증대 목적의 연구와 함께 전력제어 방안에 관한 연구들이 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 최초의 파일럿 규모의 발전 시스템은 네덜란드에서 2013년도에 최초로 구축하였다. 일본에서는 하수 방류수를 이용한 발전 시스템을 구축한 바 있다. 국내의 경우 한국에너지기술연구원에서 해수와 담수를 활용하는 염분차발전 시스템 연구를 시작하여, 2020년에 20kW급 독립 계통 파일럿 플랜트를 최초 구축하였다<sup>[2-3]</sup>. 이 외로 담수화 설비의 에너지 절감을 위한 RED 시스템에 대한 연구 등이 진행되었다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 RED의 출력 특성 및 등가회로 모델링 방법을 소개하고 계통연계 시스템 구성 방안을 제시한다. PLECS 시뮬레이션을 통해 계통연계 성능을 확인한다.

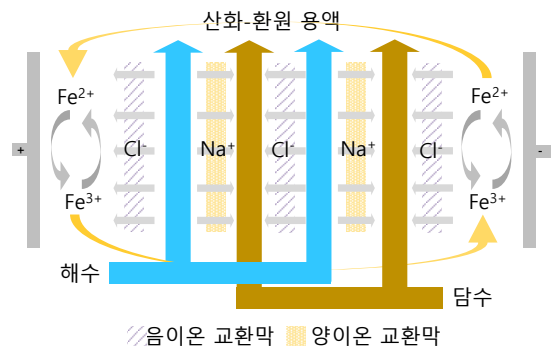


그림 1. 해수-담수 활용 역전기투석 발전 개념도  
Fig. 1 Schematic of the RED

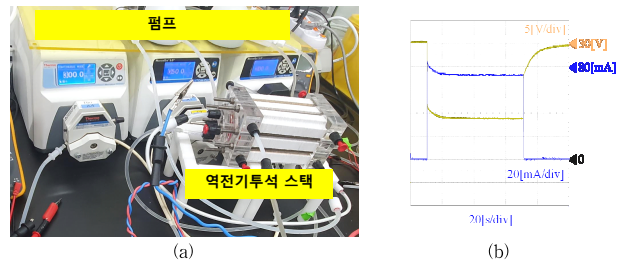


그림 2. 역전기투석 실험장치 및 출력 특성  
(a) RED 실험장치, (b) RED 부하변동 특성  
Fig. 2 Experimental setup and output characteristics of the RED

## 2. 역전기투석 시스템 모델링 및 계통연계

### 2.1 역전기투석 출력 특성 및 스택 모델링

RED는 무부하 조건에서 최대 출력 전압이 발생 되며, 부하가 증가함에 따라 전압이 낮아지는 특성을 보인다. 그림 2에 RED 스택 모델링을 위한 실험장치와 부하 변화에 따른 출력 전압 변화 그래프를 보인다. 파라미터 도출을 위한 RED 스택의 무부하 전압은 31V, 최대 출력 전력은 11.25W이다.

그림 3에 RED 스택의 등가 모델을 보인다. RED는 스택의 구조, 전극 및 이온교환막의 설계에 따라 강해지는 전압의 크기와 동작 특성에 차이가 있다. 제어기 설계를 위한 파라미터 도출을 위해서는 설계되는 RED 스택별로 등가 모델 도출을 위한 실험이 필요하다. 본 논문에서는 등가 모델 도출을 위해 입력되는 용액의 농도, 온도, 압력 등의 조건은 일정하다고 가정한다. 그림 2 (b)와 같이 얻을 수 있는 부하 변동 상황에서의

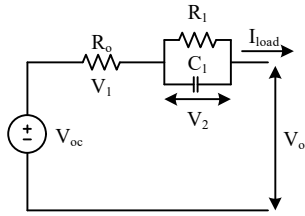


그림 3. 역전기투석 스택의 등가회로 모델  
Fig. 3 Equivalent circuit model of the RED stack

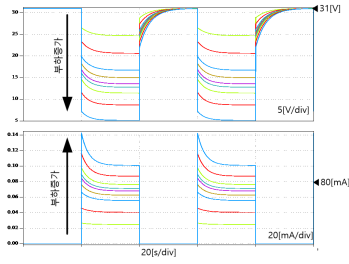


그림 4. 저항부하 변화에 따른 역전기투석 스택 모델 응답  
Fig. 4 Output characteristics of the RED stack model

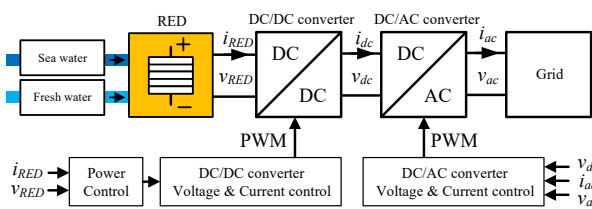


그림 5. 계통연계 운영을 위한 역전기투석 시스템 개념도  
Fig. 5 Schematic diagram of the electrodesalination system for grid-connected operation

표 1 역전기투석 모델 파라미터  
Table 1 Parameters of RED stack model

전력	R0	R1	C1	OCV
11.25W	166.42 [Ω]	90 [Ω]	0.04 [F]	31 [V]

전압강하 및 동특성을 바탕으로 표 1과 같은 파라미터를 얻을 수 있다. 정격 출력 기준에서 가장 실험 결과와 오차가 낮은 응답을 가지는 파라미터 값을 선정하였다. 그림 4에 저항 부하 변화에 따른 모델의 응답을 보인다.

## 2.2 역전기투석 시스템의 계통연계

RED의 계통연계를 위해 그림 5와 같이 시스템을 구성할 수 있다. DC/DC 컨버터는 변동되는 RED 출력 전압과 전류를 제어한다. 계통에 연계된 AC/DC 컨버터는 계통연계 동작을 수행하며, 직류링크 전압 및 계통측 전류를 제어한다. RED는 부하전류의 크기에 따라 전압이 변화하며 스택 특성에 따라 출력이 변동되는 상황에서 스택에서 출력되는 전압이 안정적인 상태로 수렴하는 속도가 달라지므로 이를 고려한 제어를 설계하였다.

## 3. 시뮬레이션

본 논문에서는 표 1의 파라미터의 직병렬 조건을 고려하여 1kW급의 단일 스택을 가정하고, 그림 5와 같은 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6에 RED의 계통연계 시뮬레이션 결과를 보인다. RED는 점차 출력을 높여가며 최대 출력 지점에 도달한다. RED의 최대 출력은 1.23 kW, 무부하

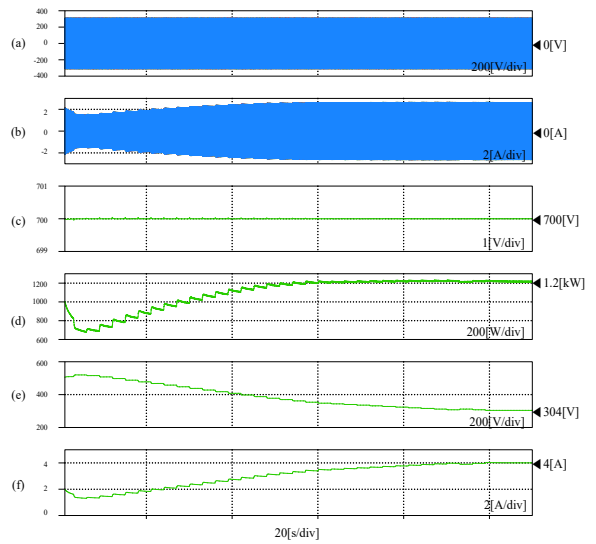


그림 6. 역전기투석 시스템의 계통연계운전  
(a) 계통전압, (b) 계통전류, (c) 직류링크전압,  
(d) 출력전력, (e) RED 출력전압, (f) RED 출력전류  
Fig. 6 Grid-Connected Operation of RED system

조건에서의 출력 전압은 621.2V, 최대출력 조건에서의 출력 전압은 310.6V이다. 그림 6(a)는 계통측 교류 전압이며 380V 60Hz의 일정한 전압을 유지한다. 그림 6(b)는 계통측으로 전달되는 전류이며, 출력전류는 점차 증가하여 2.64A에 도달한다. 그림 6(c)의 직류링크 전압은 700V로 일정하게 유지되고 있다. 그림 6(d)에 RED 스택의 출력전력을 보인다. 출력이 점차 증가하여 1.23kW의 전력을 계통측으로 전달한다. 그림 5(e), (f)는 RED 스택의 출력 전압 및 전류이며, 전류의 크기가 증가함에 따라 전압은 감소하고 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 역전기투석 시스템의 계통연계 운영을 위해 RED 스택의 모델링 방법을 보이고, 계통연계 시스템 구성 방안을 제시하였다. PLECS 소프트웨어를 활용한 시뮬레이션을 통해 역전기투석 스택에서 발전되는 전력이 계통측으로 전달되는 동작을 확인하였다.

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C1-2426)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다. 또한, 2024년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과입니다. (CRC23031-000)

## 참고 문헌

- [1] R. E. Pattle, "Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile", Nature 174(4431), pp. 660-660, 1954.
- [2] 한국에너지기술연구원, "전기충전 인프라 구축용 염분차발전 원천기술 개발 연구보고서", 2020.
- [3] 한국에너지기술연구원, "RED 염분차발전의 장기운전 신뢰성 향상 기술 연구보고서", 2021.
- [4] 한국에너지기술연구원, "해수담수화 연계 염분차 발전을 위한 분리막 및 융합시스템 핵심원천기술 개발 연구보고서", 2021.