

# 계통운영 보조서비스를 위한 알칼라인 수전해 스택 모델링 및 시뮬레이션

김기훈<sup>\*\*\*</sup>, 강길현<sup>\*\*\*</sup>, 정윤철<sup>\*</sup>, 강경수<sup>\*</sup>, 정남조<sup>\*</sup>, 고희상<sup>\*</sup>, 최영준<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한국에너지기술연구원, <sup>\*\*</sup>제주대학교

## Modelling and Simulation of Alkaline Electrolysis Stack for Grid Ancillary Services

Gi-Hoon Kim<sup>\*\*\*</sup>, Gil-Hyeon Kang<sup>\*\*\*</sup>, Yoon-Cheul Jeung<sup>\*</sup>, Kyoung-Soo Kang<sup>\*</sup>,  
Nam-Jo Jeong<sup>\*</sup>, Hee-Sang Ko<sup>\*</sup>, Yeong-Jun Choi<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Korea Institute of Energy Research, <sup>\*\*</sup>Jeju National University

### ABSTRACT

본 논문은 전력계통 안정화를 위한 목적의 계통운영 보조서비스를 지원하기 위한 수전해 시스템의 전력변환장치 설계 및 제어기법 개발에 활용할 수 있도록, 기존에 운용되고 있는 알칼라인 수전해장치의 스택의 등가모델을 개발하고, 파라미터를 도출한다. 수전해장치의 전력변환장치로 운용 중인 사이리스터 기반 12 Pulse 정류기를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안하는 모델을 검증한다.

### 1. 서론

높은 에너지 밀도를 갖는 수소는 다양한 활용이 가능한 최적의 청정에너지원으로 주목받고 있다. 최근에는 풍력 및 태양광과 같은 변동성 재생에너지원의 비중증가에 대한 문제 해결을 위해 MW급 이상의 대용량 수전해 장치를 통한 전력계통 안정화 방안이 보고되고 있다.

대용량 수전해 장치의 최적 활용을 위해 그림 1과 같이 높은 전력밀도를 갖는 슈퍼커패시터(Supercapacitor, SC)와 배터리에너지저장장치(Battery energy storage system, BESS), 높은 에너지밀도를 갖는 수소 생산을 위한 수전해(Electrolyzer, EZ)를 조합하여 변동성 재생에너지원의 발전전력을 관리하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 논문에서는 변동성 재생에너지원과 연계되어 운전하는 수전해용 전력변환장치 개발 및 안정성 분석을 위한 알칼라인 수전해 스택의 등가 모델을 개발하고, 실제 운용중인 30kW급 장치의 운전데이터를 활용하여 파라미터를 도출한다. 시뮬레이션 및 실험데이터의 비교를 통해 개발된 모델을 검증한다.

### 2. 알칼라인 수전해 장치 모델링

#### 2.1 알칼라인 수전해 스택 모델링

수전해 스택은 수전해 셀을 직렬로 적층하여 제작된다. 수전해 셀 전압은 식(1)과 같이 표현된다<sup>[1]</sup>.

$$v_{cell} = v_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} i + s \cdot \log \left( \frac{t_1 + t_2/T + t_3 T^2}{A} i + 1 \right) \quad (1)$$

여기서,  $v_{rev}$ 는 가역(Reversible) 셀 전압[V],  $r_1$ ,  $r_2$ 는 전해질의 Ohmic 저항[Ωm<sup>2</sup>],  $T$ 는 온도[°C],  $A$ 는 전극 면적[m<sup>2</sup>],  $i$ 는 입력 전류 [A],  $s$ 는 전극 과전압 계수[V],  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ 는 전극 과전압 계수[A<sup>-1</sup>m<sup>2</sup>] 이다.

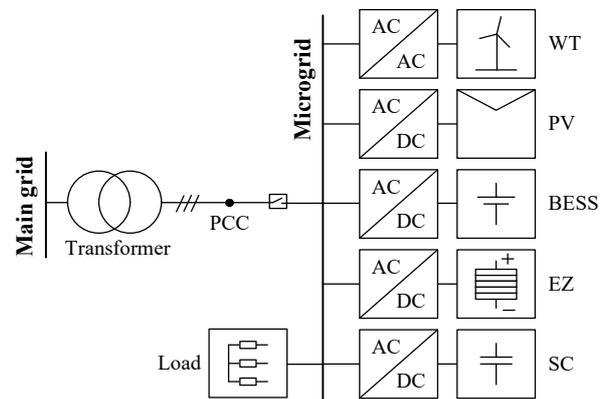


그림 1 수전해가 포함된 마이크로그리드

Fig. 1 Microgrid with electrolyzer

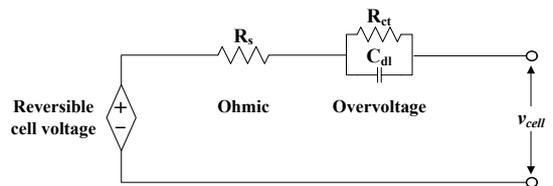


그림 2 수전해 셀 Randles circuit

Fig. 2 Randles circuit of Electrolysis cell

표 1 알칼라인 수전해 스택 파라미터

Table 1 Alkaline electrolysis stack parameters

$V_{rev}$	1.229 [V]	$s$	0.4729 [V]
$r_1$	6.326e-4 [Ωm <sup>2</sup> ]	$t_1$	5.23092 [A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> ]
$r_2$	7.5e-6 [Ωm <sup>2</sup> ]	$t_2$	-4.34777e+2 [A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> ]
$T$	75 [°C]	$t_3$	3.410251e+3 [A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> ]
$A$	0.068 [m <sup>2</sup> ]	$C_{dl}$	0.1 [F]
$n$	25	$I$	86 - 295 [A]

식(1)의 모델은 저항성분만 고려되어 제어기 설계를 위해서는 입력전류 변동에 따른 전압의 시정수가 추가적으로 고려되어야 한다. 본 논문에서는 그림 2에 보이는 Randles circuit을 이용하여 수전해 스택의 모델을 개발한다<sup>[2]</sup>. 식 (1)에서  $R_s$ ,  $R_{ct}$ 를 구할 수 있으며 스택 전압은 식(2)와 같다. 여기서,  $R_s$ 는 Ohmic 저항,  $R_{ct}$ 는 활성화 저항,  $n$ 은 직렬 연결된 셀의 개수이다.

$$V_{stack} = n(V_{rev} + R_s I + R_{ct} i) \quad (2)$$

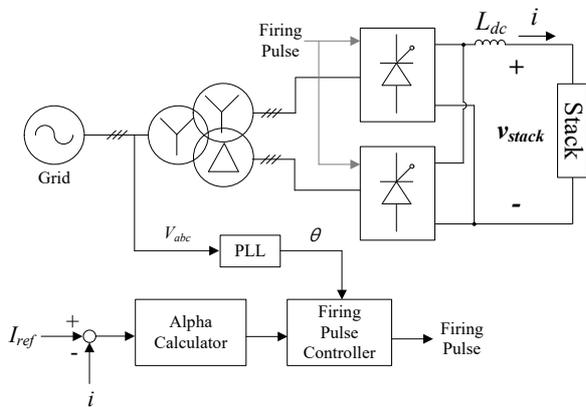


그림 3 12 Pulse 정류기 모델  
Fig. 3 12 Pulse rectifier model

표 2 12 Pulse 정류기 파라미터  
Table 2 12 Pulse rectifier parameters

$V_{LL}$	381 [V]	$L_{dc}$	0.05 [H]
$C_{tr}$	0.05 [MVA]	$n_{Y-Y}$	1:1
$n_{Y-d}$	1:1.732	$t_{pulse}$	$5e-4$ [s]

수전해 스택의 커패시턴스  $C_{dl}$ 은 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 여기서,  $\tau$ 는 측정된 전압 시정수이다.

$$C_{dl} = \frac{\tau}{nR_{cd}} \quad (4)$$

30kW급 알칼라인 수전해장치 시험을 통해 표 1과 같이 Randles circuit에 대응하는 수전해 스택의 파라미터를 도출하였다.

### 2.2 사이리스터 기반 12 pulse 정류기 모델링

실제 운용중인 30kW급 알칼라인 수전해 장치의 동특성과 개발된 모델을 비교하기 위해 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 12 pulse 정류기를 그림 3과 같이 구성하였다. 여기서,  $I_{ref}$ 는 수전해 스택 입력 전류지령치로 시험 시 측정된 전류 데이터가 입력된다. 정류기의 파라미터는 표 2에 보인다.  $V_{LL}$ 는 계통측 선간전압,  $L_{dc}$ 는 DC 측 인덕턴스,  $C_{tr}$ 은 변압기 용량,  $n_{Y-Y}$ 는 Y-Y 결선 권수비,  $n_{Y-d}$ 는 Y-d 결선 권수비,  $t_{pulse}$ 는 사이리스터의 출력 펄스 지속시간이다.

### 3. 시뮬레이션

그림 4에서 6은 각각 수전해 스택 입력 전류 비교 결과, 수전해 스택 입가 전압 비교 결과, 그리고 수전해 스택의 V-I 커브 비교로 시뮬레이션 결과와 실험 데이터를 비교하였다. 전압 및 전류의 상대오차 평균은 각각 0.22%, 0.17%로 도출되었으나, 그림 6의 V-I 커브의 경우 시정수에 따라 오차가 발생하였으나, 실제 데이터에서는 180 A, 등가모델에서는 189A에서 직선 형태를 보이며 유사한 추세로 동작하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 실제 알칼라인 수전해 장치 시험 데이터를 기반으로 수전해 스택 등가모델을 개발하고 12 Pulse 정류기를 모델링하여 등가모델의 정확도를 실제 데이터와 비교하였다.

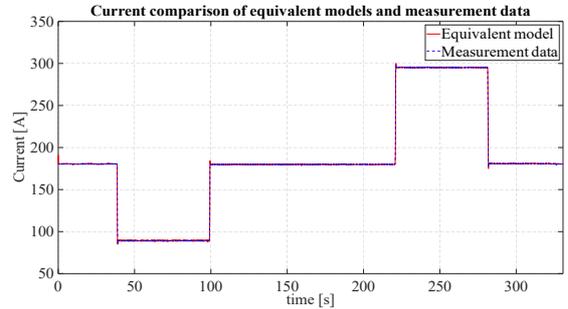


그림 4 수전해 스택 입력 전류 비교 결과  
Fig. 4 Electrolyzer stack input current comparison

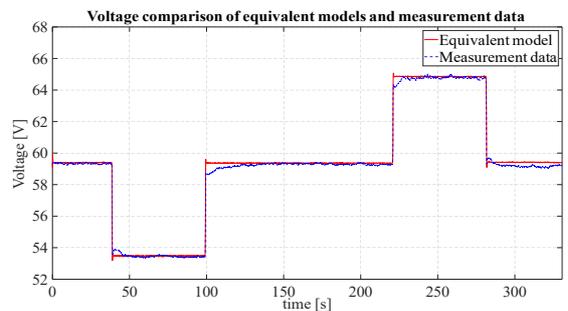


그림 5 수전해 스택 전압 비교 결과  
Fig. 5 Electrolyzer stack voltage comparison

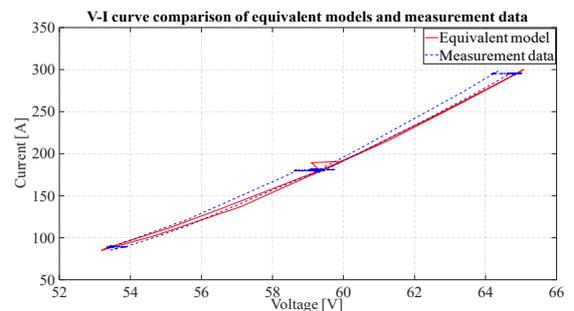


그림 6 수전해 스택 V-I 커브 비교 결과  
Fig. 6 Electrolyzer stack V-I curve comparison

개발된 스택의 등가모델은 상대오차 평균이 0.22%로 낮아, 컨버터 및 계통운영 보조서비스 알고리즘 개발에 활용될 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (RS-2023-00234707) 또한, 과학기술정부의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과입니다. (CRC23031-000)

### 참고 문헌

- [1] Ø. Ulleberg, "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, No. 1, pp. 21-33, 2003, Jan.
- [2] J. E. B. Randles, "Kinetics of rapid electrode reactions", Discussions Faraday Soc., vol. 1, pp. 11-19, 1947, Mar.