

MW급 ESS용 이동형 성능평가 시험장치의 모델링 및 구현에 관한 연구

최익준, 한병길, 이후동, 김경화, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

Modeling and Implementation of Movable Performance Evaluation Test Equipment for MW Scale ESS

Ik-Joon Choi, Byeong-Gill Han, Hu-Dong Lee, Kyung-Hwa Kim, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약 최근 세계적으로 자원 고갈과 심각한 기후 변화로 에너지에 대한 관심이 증폭되면서 스마트그리드와 신재생 에너지 기술이 각광받고 있다. 이러한 기술의 가장 핵심적인 요소인 ESS는 각 제품의 품질과 성능 및 안전성이 보장되더라도 현장에 설치하는 사람 혹은 운용환경에 따라 특성이 달라지므로, 현장에 설치된 ESS에 대한 성능 및 안전성 시험평가기술의 개발이 요구되고 있다. 또한, 미국 및 독일과 같은 선진국에서는 ESS의 성능과 안전성을 정확하게 평가하기 위하여, H/W와 S/W에 의한 성능시험을 요구하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 현장에 설치되어 운용중인 ESS의 성능과 안전성을 정확하게 평가하기 위해, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS용 성능평가 시험장치를 모델링하고, 이를 바탕으로 MW급 이동형 성능평가 시험장치를 구현한다. 또한, 현장에 설치되어 있는 ESS를 대상으로 현장시험평가를 수행한 결과, LVRT 시험을 비롯해 round-trip 효율시험 및 단독운전방지시험에 대한 MW급 ESS의 성능을 정확하게 평가할 수 있어, 본 논문에서 제시한 성능평가 시험장치의 유용성을 확인할 수 있었다.

Abstract Recently, the smart grid and renewable energy technologies are paid great attention due to global resource depletion and severe climate change. The installation quality of ESS, which is one of the core components, may be different depending on the corresponding working condition and installation environment despite guaranteeing the quality and safety of each component in ESS. Hence, the technology of site acceptance test (SAT) for ESS is required. This test is required not only for the performance testing by H/W equipments but also for the performance verification by S/W tool, to more accurately and reliably validate the performance of the ESS, especially in advanced countries such as USA and Germany. Therefore, this paper proposes modeling of SAT equipment for ESS by using PSCAD/EMTDC to evaluate the performance and reliability of ESS on-site. Furthermore, MW scale movable test equipments are implemented based on the proposed modeling. The simulation and test results of SAT for ESS installed in the field confirm that the characteristics of round-trip efficiency, low voltage ride through (LVRT), and anti-islanding for ESS performance can be accurately evaluated. The results confirmed the usefulness of the presented modeling and implemented movable test equipments.

Keywords : Movable Performance Test Equipment, Grid Simulator, Site Acceptance Test, Factory Acceptance Test, Round-Trip, Anti-islanding, Low Voltage Ride Through, Energy Storage System, PSCAD/EMTDC

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20191210301940, No.20182410105070)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received August 27, 2021

Accepted November 5, 2021

Revised September 27, 2021

Published November 30, 2021

1. 서론

최근 세계적으로 자원 고갈과 심각한 기후 변화로 그 린 에너지에 대한 관심이 증폭되면서 스마트 그리드와 신재생에너지 기술이 각광받고 있다. 이러한 기술의 핵심 적인 요소인 ESS(energy storage system)는 전력변환 장치부(power conversion system, PCS)와 배터리로 구성되는데, 각각의 장치들은 공장인수시험(factory acceptance test, FAT)을 수행한 후 현장에 설치된다. 하지만, ESS는 각 제품의 품질과 성능 및 안전성이 보장 되더라도 현장의 환경 혹은 조립하는 사람에 따라 완성 품질이 달라지므로, 현장에 설치된 ESS의 성능 및 안전 성에 대한 현장평가시험(site acceptance test, SAT)기 술의 개발이 요구되고 있다. 또한, 미국 및 독일과 같은 선진국에서는 ESS의 성능과 안전성을 정확하게 평가하 기 위하여, H/W와 S/W에 의한 성능시험을 요구하고 있 는 실정이다[1-6]. 따라서, 본 논문에서는 현장에 설치되 어 운용중인 ESS의 성능과 안전성을 정확하게 평가하기 위해, PSCAD/EMTDC를 이용하여 MW급 성능평가 시 험장치의 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 MW급 이동 형 성능평가 시험장치를 구현한다. 또한, 시험장치를 이 용하여 ESS와 연계하여 운용하는 경우, 설치환경에 따라 전기적, 자기적 간섭현상에 대응할 수 있는 방안을 제시 한다. 여기서, ESS용 이동형 성능평가 시험장치는 실 계 통과 유사한 외란(sag, swell, harmonic, interruption)을 발생 시킬 수 있는 계통모의장치(grid simulator)와 RLC부하를 이용한 단독운전시험장치, 시 험을 자동으로 수행하고 데이터를 수집할 수 있는 모니 터링 및 제어장치 등으로 구성된다. 상기에서 제시한 MW급 시험장치의 모델링과 구현한 이동형 시험장치를 바탕으로 시뮬레이션 및 특성시험을 수행한 결과, round-trip 효율시험과 단독운전(anti-islanding)방지 시험, LVRT(low voltage ride through)시험에 있어서 모델링에 의한 결과와 계통모의장치에 의한 특성이 거의 동일함을 알 수 있어, 본 논문에서 제안한 MW급 이동형 성능평가 시험장치의 유용성을 확인하였다.

2. MW급 ESS용 이동형 성능평가 시험장치의 특성분석

2.1 ESS용 이동형 시험장치의 구성

ESS의 안전성과 성능평가를 수행하는 MW급 이동형 시험장치는 Fig. 1과 같이 계통모의장치(grid simulator), 단독운전시험장치(anti-islanding test equipment), 모니터링 및 제어장치(monitring & control system) 등으로 구성된다. 여기서, 가장 핵심적 인 기능을 수행하는 계통모의장치는 배전계통에서 발생 하는 각종 외란(harmonic, interruption, sag, swell) 을 모의할 수 있는 전력변환장치로서, 현장의 다양한 계 통연계전압에 유연하게 대응할 수 있도록, 입·출력 측에 각각 전압 가변용 변압기와 노이즈 컷 변압기로 구성된다. 또한, 단독운전시험장치는 저항성부하, 유도성부하, 용량성부하를 조합하여 구성된다. 한편, 모니터링장치는 계측장비를 이용하여 계통모의장치의 1차측과 2차측, 단 독운전시험장치의 입력 측, ESS의 AC 및 DC측 등의 시 험에 필요한 전압, 전류, 주파수 등과 같은 데이터를 실시간으로 계측 및 수집을 수행할 수 있다. 또한, 제어장치는 시험장치용 UI(user interface)를 이용하여 현장평가시 험의 시퀀스에 따라 계통모의장치와 단독운전시험장치, 수배전반을 제어하여 특성시험을 수행할 수 있다.

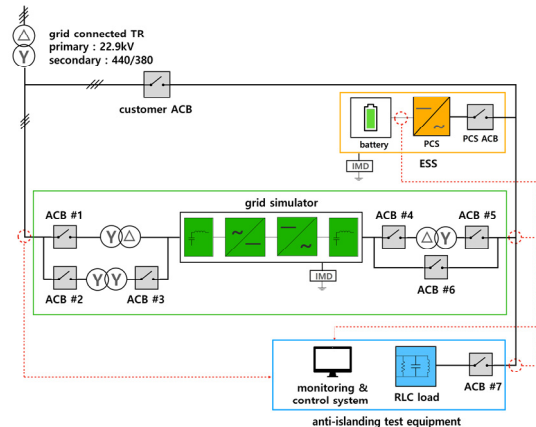


Fig. 1. Configuration of movable test device for ESS

2.2 ESS용 성능평가 시험장치의 운용사례 분석

시험장치를 이용하여 변압기 용량이 작은 수용가에 시 험을 하는 경우, 초기 운전 시 수용가 측 변압기에 흐르 는 전류는 입력변압기의 정격 전류의 10배까지 상승하 여, 수용가 측 보호기기가 동작하는 현상이 발생할 수 있 다. 이에 따라, Fig. 2와 같이 시험장치용 입력변압기의 기동전류를 제한할 수 있는 초기충전회로를 추가하여 시 험을 수행한다.

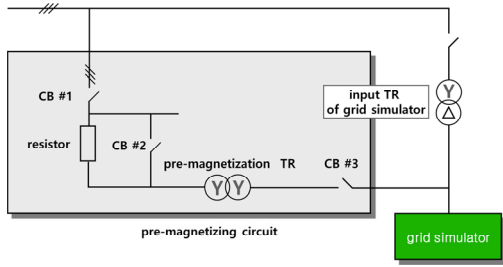


Fig. 2. Pre-magnetization circuit of input transformer for test device

또한, LVRT 시험과 같은 빠른 응답속도를 요구하는 특성시험을 수행하는 경우, 150[ms] 동안 0[pu]의 전압을 유지해야 하지만, ESS용 연계용 변압기와 시험장치용 출력변압기의 여자전류로 인해 전압출력특성이 저하되는 현상이 발생할 수 있다. 이에 따라, Fig. 3과 같이 시험장치의 출력 측에 바이패스 회로를 구성하여 응답속도를 개선할 수 있다.

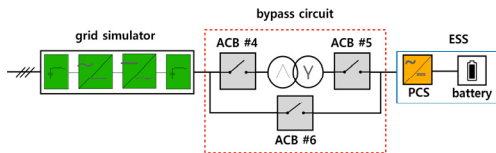


Fig. 3. By-pass circuit for test device

한편, 지락사고를 검출하는 IMD는 ESS와 시험장치에 각각 설치되는데, 시험장치를 ESS에 연계하는 경우, Fig. 4와 같이 각 장치의 공통접지에 의하여 폐회로가 형성되어 IMD 간의 간섭현상으로 인해 시험장치가 정지할 수 있으므로, 시험장치의 IMD 기능을 제외시키고 시험을 수행한다.

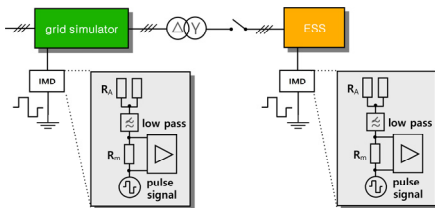


Fig. 4. IMD circuit for test device and ESS

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 MW급 ESS용 성능평가 시험장치 모델링

3.1 ESS 모델링

ESS는 Fig. 5와 같이 배터리부와 PCS부로 구성된다. 여기서, 배터리부는 용량에 따라 수십대~수십대의 랙으로 구성되며, 랙 BMS를 포함하여 배터리를 보호하고 안전하게 운용한다. 구체적으로, 랙 BMS는 배터리 모듈 및 랙의 전압과 전류, 온도 등을 계측하고, 이 정보들을 바탕으로 비정상적인 상태(과전압, 과전류, 고온 등)가 발생할 경우, 랙에 설치된 차단기를 제어하여 안전하게 회로를 신속하게 차단하는 기능을 수행한다. 한편, PCS부는 Fig. 5와 같이 6개의 반도체 스위치와 L-C필터, 전력제어기로 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 Eq. (1), Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있고, 음의 값을 가질 때 ESS가 충전되고, 양의 값을 가지면 ESS는 방전기능을 수행한다.

$$I_{d,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P_d^* - P_d(t)) \quad (1)$$

$$I_{q,ess}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q_q^* - Q_q(t)) \quad (2)$$

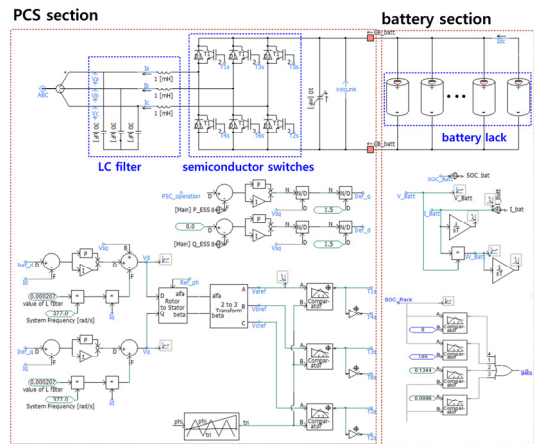


Fig. 5. Modeling of ESS

where, $I_{d,ess}^*$: d component of reference current of ESS, $I_{q,ess}^*$: q component of reference current of ESS, K_p : proportional gain, K_i : integral gain, P_d^* : d component of reference active power, $P_d(t)$: d component of actual active power, Q_q^* : q component of reference reactive power, $Q_q(t)$: q component of actual reactive power

3.2 계통모의장치의 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 컨버터부와 인버터부로 구성된 계통모의장치의 모델링을 수행하면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 컨버터부는 Fig. 6(a)와 같이 입력용 Y- Δ 변압기와 양방향 반도체 스위치, L-C필터, 컨버터용 제어기로 구성된다. 구체적으로, 컨버터용 제어기는 DC링크전압을 제어하기 위해 PI제어 알고리즘을 이용하며, 목표로 하는 DC링크 전압을 제어하기 위해 d-q축의 기준전류($I_{d,link}^*$, $I_{q,link}^*$)를 산정해야 한다. 여기서, DC링크 전압의 기준전류는 Eq. (3), Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$I_{q,link}^* = 0 \quad (4)$$

where, $I_{d,link}^*$: d component of reference current of link, $I_{q,link}^*$: q component of reference current of link, V_{link}^* : reference voltage of DC link, $V_{link}(t)$: actual voltage of DC link

한편, 인버터부는 Fig. 6(b)와 같이 Δ -Y 변압기와 양방향 스위치, L-C필터, 인버터용 제어기로 구성된다. 구체적으로, 인버터용 제어기는 실 계통과 동일한 외란의 발생과 목표로 하는 AC전압의 오차를 줄이고 응답속도를 향상시키기 위하여, Eq. (5)와 같이 PI제어 알고리즘을 채택한다. 여기서, Eq. (5)의 첫 번째 항은 현재 출력 전압($V(t)$)과 목표전압(V^*)의 차를 고려하여 비례제어기의 출력 신호를 산정하고, 두 번째 항은 두 전압 차이의 오차를 누적하여 적분제어기의 출력 신호를 산정한다. 세 번째 항은 목표전압의 주파수와 위상을 결정하는 제어신호를 나타낸다.

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

where, $Wave_{ref}$: reference wave, V_{ac}^* : reference voltage of AC, $V_{ac}(t)$: actual voltage of AC, $f(t)^*$: reference frequency, $\phi(t)^*$: reference of phase

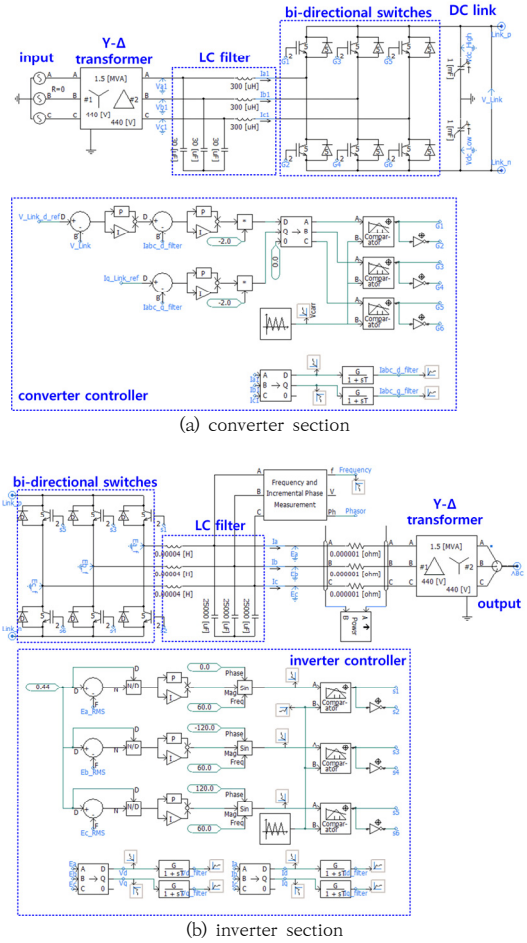


Fig. 6. Modeling of grid simulator

3.3 단독운전시험장치의 모델링

단독운전은 계통에서 고장이 발생하는 경우, ESS가 정지하지 않고 지속적으로 부하에 전력을 공급하는 것을 의미하며, 배전계통연계 기술기준에서는 사고 발생 시 ESS가 계통으로부터 안전하게 정지(0.5초 이내)할 수 있도록 단독운전방지 기능을 포함하도록 요구하고 있다. 따라서, 단독운전 방지시험은 계통과 유사한 공진조건을 모

의하기 위해 ESS와 병렬로 연결된 RLC부하를 이용한다. 이때, RLC부하의 공진특성을 나타내는 척도는 공진지수(quality factor, Q_f)로 정의되며, 이는 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{\sqrt{Q_L \times Q_C}}{P_R} \quad (6)$$

where, Q_f : quality factor, P_R : active power of R, Q_L : reactive power of L, Q_C : reactive power of C

한편, 단독운전시험장치를 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있고, 이 장치는 한전계통(22.9[kV])과 수용가 부하(정전력 부하), 모의부하(정임피던스 부하), ESS, 제어 및 모니터링 장치 등으로 구성한다. 또한, 단독운전 조건을 실험 계통 운용조건에 근접하게 수행하기 위해, 모의부하 이외에 수용가 부하를 사용한다[7].

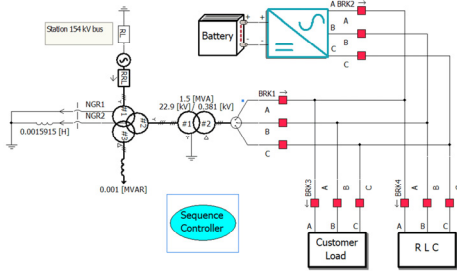


Fig. 7. Modeling of anti-islanding test equipment

3.4 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 바탕으로, PSCAD/EMTDC를 이용한 전체 시스템 모델링은 Fig. 8과 같이 ESS, 계통모의장치 및 단독운전시험장치 등으로 구성된다. 여기서 A 부분은 한전계통(22.9[kV]), B는 계통모의장치, C는 수용가 부하, D는 모의 RLC 부하, E는 ESS를 나타낸 것이다.

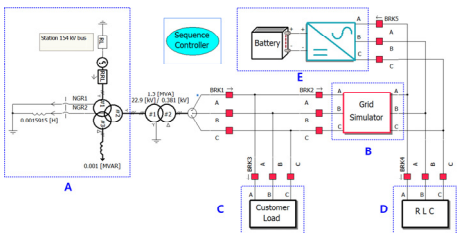


Fig. 8. Entire modeling of movable test equipment for ESS

4. MW급 ESS용 이동형 성능평가 시험장치 구현

4.1 계통모의장치

배전계통의 주파수변동과 순시전압강하(sag), 순시전압상승(swell), 고조파, LVRT와 같은 계통외란을 유사하게 모의할 수 있는 계통모의장치는 양방향 전력변환장치를 이용하여 구성한다. 이 장치는 Fig. 9와 같이 충전회로부, 정류기부, 저역통과 필터부, 인버터부 및 사인 필터부 등으로 구성된다. 즉, 정류기부와 인버터부를 통하여 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.

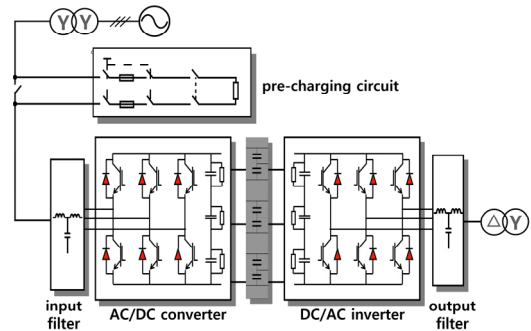


Fig. 9. Configuration of grid-simulator

4.2 단독운전시험장치

단독운전시험장치는 Fig. 10과 같이 모의 RLC 부하, 계측 및 제어장치와, ESS, AC전원으로 구성된다. 여기서, 계측 및 제어장치부는 ESS와 모의 RCL부하의 전력을 계측하고 ESS의 출력과 RLC부하부의 상호시험조건을 고려하여, 스위치 S_{AC} 를 개방시켜 단독운전 조건을 구현한다. 또한, 모의부하(RLC)는 임피던스 특성을 이용하여 유효전력과 무효전력을 모의하며, 저항성(R)과 유도성(L), 용량성(C) 부하로 구성한다. 구체적으로, 저항성부하는 1[W] 단위로 제어가 가능하고 최대 용량은 상당 500[kW]이며, 용량성 및 유도성부하는 1[var] 단위로 제어가 가능하고 최대 용량은 상당 500[kVar]이다.

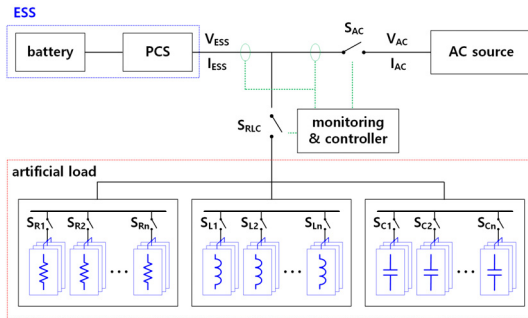


Fig. 10. Configuration of anti-islanding test equipment

4.3 모니터링 및 제어장치

모니터링 및 제어장치용 UI는 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 11(a)는 모니터링용 UI이고, Fig. 11(b)는 제어장치용 UI이다. 구체적으로, 모니터링용 UI는 계통모의장치와 단독운전시험장치, ESS의 실시간 전압, 전류, 전력을 계측하여 데이터 수집 기능을 수행하며, 제어장치용 UI는 단독운전방지시험, LVRT시험, round-trip시험, 전압 및 주파수 특성시험 등을 시퀀스에 따라 자동으로 수행할 수 있다.

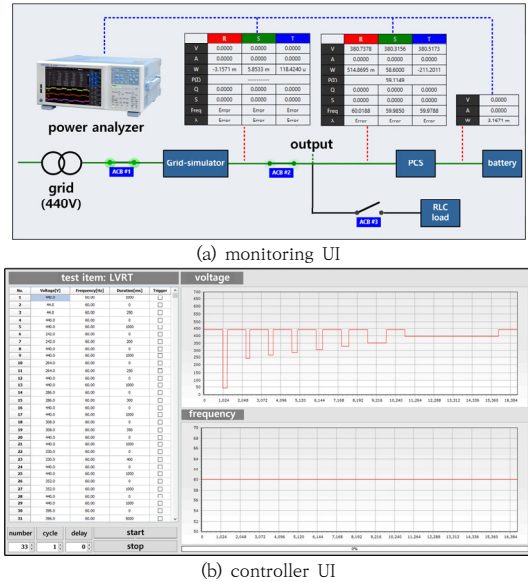


Fig. 11. Configuration of monitoring and controller UI

4.4 전체 시스템 구현

이동형 시험장치의 전체 시스템은 Fig. 12와 같이 계통모의장치, 단독운전시험장치, 모니터링 및 제어장치로 구성된다.

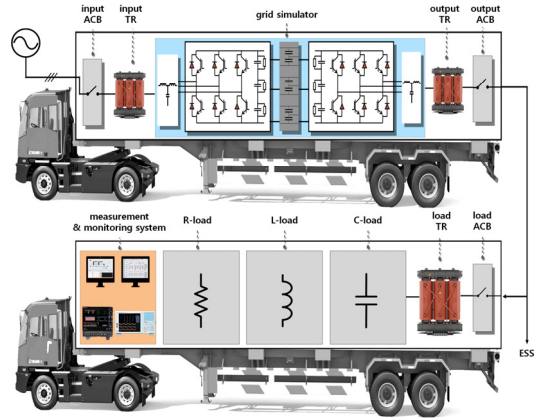


Fig. 12. Configuration of entire system

5. MW급 ESS용 성능평가 시험장치의 특성분석

5.1 시뮬레이션 및 시험 조건

본 논문에서 제시한 MW급 ESS용 성능평가 시험장치의 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 및 시험조건은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리 용량은 2[MWh]로 상정하며, round-trip 시험에서 충·방전률은 0.45C-rate, 배터리의 SOC의 운용범위는 10[%] ~ 43.5[%]인 조건으로 상정하며, 단독운전방지 시험은 100[kW], 300[kW], 500[kW]의 부하를 대상으로 하고, LVRT시험은 0.55[p.u], 0.6[p.u], 0.65[p.u], 0.7[p.u], 0.75[p.u], 0.8[p.u], 0.9[p.u]전압이 0.15초, 0.2초, 0.25초, 0.3초, 0.35초, 0.4초, 1초, 5초 동안 각각 지속되도록 설정한다[8-14].

Table 1. Simulation and test conditions

ESS	battery[MWh]	2
	PCS[MW]	1
round-trip	charging/discharging rate	0.45-rate
	operation range of SOC	10%~43.5%
anti-islanding	number of Cycle	1~2 cycle
	output power of ESS	100[kW], 300[kW], 500[kW]
LVRT	rated voltage[V]	440
	voltage reference[PU]	0.9, 0.8, 0.75, 0.7, 0.65, 0.6, 0.55, 0
	duration time[s]	5, 1, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25, 0.2, 0.15

5.2 PSCAD/EMTDC에 의한 특성분석

(1) Round-trip 효율시험

Table 1의 시뮬레이션 조건에 따라 round-trip 효율시험을 수행하면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 13(a)는 2-cycle 동안 ESS 운전모드(충전, 방전, 휴지기간)의 유효전력을 나타내고, Fig. 13(b)는 ESS의 적산된 에너지양(SOC)을 나타낸 것이다. 즉, ㉠구간은 ESS를 0.45C-rate로 배터리의 충전종료전압까지 충전한 구간의 SOC 특성을 나타내며, 충전전력량은 약 700[kWh]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, ㉡구간은 ESS를 0.45C-rate로 배터리의 방전종료전압까지 방전한 구간의 SOC 특성을 나타내며, 배터리의 방전전력량은 약 656[kWh]로 산정됨을 알 수 있다. 한편, ㉢, ㉣, ㉤, ㉥, ㉦구간은 ESS의 충·방전 운전 후 최소 30분 이상의 휴지시간을 나타낸다. 따라서, round-trip 효율(충전량 대비 방전량)은 약 93.7[%]로 산정된다.

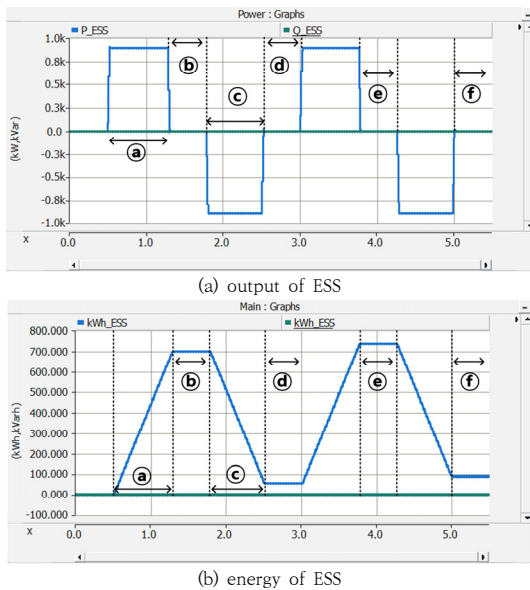


Fig. 13. Characteristics of round-trip efficiency

(2) 단독운전방지시험

상기의 시뮬레이션 조건에 따라 단독운전방지시험을 수행하면 Fig. 14와 같다. 여기서, Fig. 14(a), 14(b), 14(c)는 각각 100[kW], 300[kW], 500[kW]의 부하조건이고, ㉠구간은 ESS의 출력과 RLC 부하를 동일한 조건으로 설정한 경우이며, 전류 오차가 정격 전류의 10[%] 이하가 되도록 제어한 것을 나타내며, ㉡ 구간은 계통의

전원을 차단시켜 단독운전을 모의한 경우이다. 즉, Fig. 14(a), Fig. 14(b), Fig. 14(c)의 ㉡ 구간에서 각각 ESS가 약 261[ms], 217[ms], 254[ms] 동안, 운전이 지속된 후 정지함을 알 수 있다. 따라서, ESS가 분산형전원 배전계통 연계 기술기준에 부합하는 단독운전방지 기능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

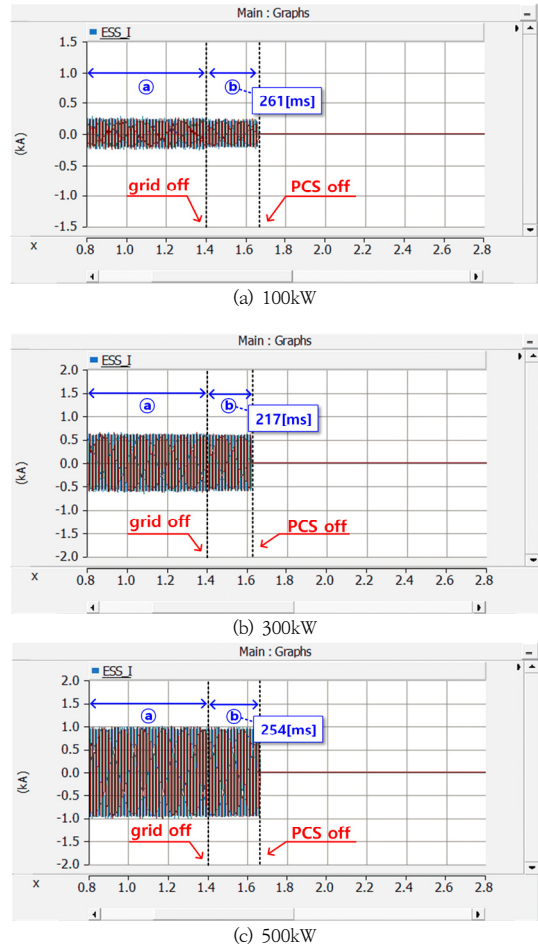


Fig. 14. Characteristics of anti-islanding

(3) LVRT 시험

상기의 시뮬레이션 조건에 의하여 LVRT 시험을 수행하면 Fig. 15와 같다. 여기서, 첫 번째 구간에서 0.15초 동안 0[pul]의 전압으로 저하되고, 두 번째 구간에서는 0.2초 동안 0.55[pul]의 전압이 지속됨을 알 수 있다. 또한 세 번째 구간 이후는 0.2초 ~ 5초까지 0.56[pul] ~ 0.9[pul]로 증가시켰을 때, 목표로 하는 LVRT의 출력특성을 구현할 수 있음을 알 수 있다.

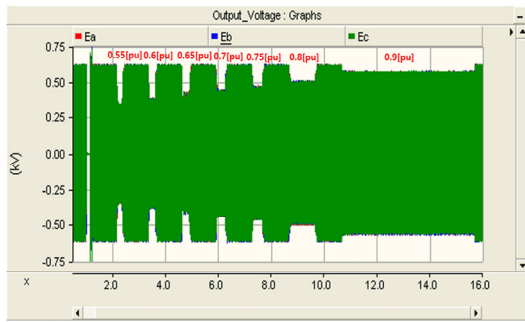
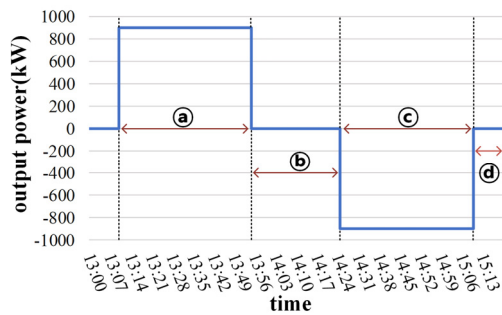


Fig. 15. Operation characteristics of LVRT

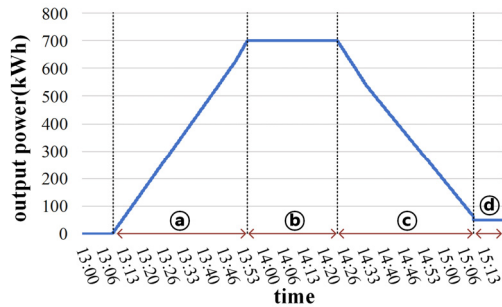
5.3 MW급 이동형 성능평가 시험장치에 의한 특성 분석

(1) Round-trip 효율시험

Table 1의 시뮬레이션 조건에 따라 round- trip 효율시험을 수행하면 Fig. 16과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 16(a)는 1-cycle 동안 ESS 운전모드(충전, 방전, 휴지시간)의 유효전력을 나타내고, Fig. 16(b)는 ESS의 적산된 에너지양(SOC)을 나타낸 것이다. 즉, ㉠구간은 ESS를 0.45C-rate로 상한충전전압까지 충전한 SOC



(a) output power of ESS



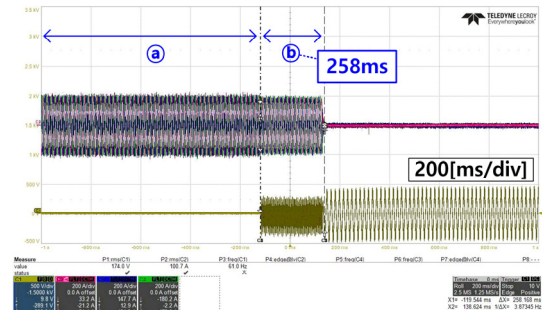
(b) energy of ESS

Fig. 16. Characteristics of round-trip efficiency

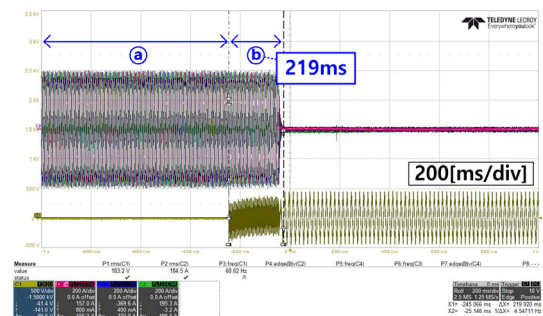
상태를 나타내며, 이때 충전전력량은 약 700[kWh]로 산정된다. 또한, ㉢구간은 ESS를 0.45C-rate로 방전종지 전압까지 방전한 상태이며 이때 방전전력량은 약 649[kWh]로 산정된다. 한편, ㉡, ㉣ 구간은 ESS의 충-방전 운전 후 최소 30분 이상의 휴지시간을 나타낸다. 따라서, round-trip 효율(충전량 대비 방전량)은 약 92.7[%]로 산정된다.

(2) 단독운전방지시험

MW급 이동형 시험장치로 ESS 출력이 100[kW], 300[kW], 500[kW]인 경우에 대하여 단독운전방지시험을 수행하면 Fig. 17과 같다. 여기서, 첫 번째 구간에서는 ESS의 출력과 단독운전시험장치의 RLC 부하를 ESS 출력과 동일하게 설정하여, 전류 오차가 정격 전류의 10[%] 이하가 되도록 제어한 것을 나타내며, 두 번째 구간에서는 계통으로부터 전원을 차단시켜 단독운전조건을 모의한 경우를 나타낸다. 즉, Fig. 17(a), Fig. 17(b), Fig. 17(c)에서 각각 ESS가 약 258[ms], 219[ms], 257[ms] 동안, 운전이 지속된 후 정지함을 알 수 있다. 따라서, ESS가 세 가지 경우에 대하여 분산전원 계통연계 기술기준에 부합하는 단독운전방지 제어특성을 가지고 있음을 알 수 있다.



(a) 100kW



(b) 300kW

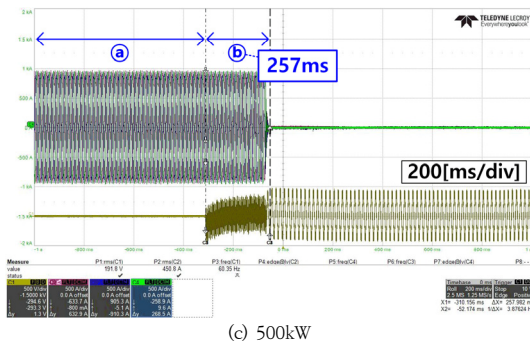


Fig. 17. Operation characteristics of anti-islanding

(3) LVRT 시험

Table 1의 시험조건에 따라, 구현한 계통모의장치에 의한 LVRT 시험을 수행하면 Fig. 18과 같다. 구체적으로, 첫 번째 구간에서 0.15초 동안 0[p.u.]의 전압으로 저하되고, 두 번째 구간에서는 0.2초 동안 0.55[p.u.]의 전압이 지속됨을 알 수 있다. 또한 세 번째 구간 이후는 0.25[s]~0.5[s]까지 0.6[p.u.]~0.9[p.u.]로 증가시켰을 때, 목표로 하는 LVRT의 출력특성을 구현할 수 있음을 알 수 있다.

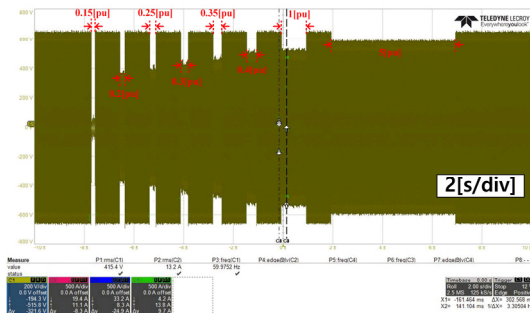


Fig. 18. Operation characteristics of LVRT

5.4 종합분석

Table 2와 같이 MW급 현장평가 시험장치를 이용하여, 상기의 조건과 동일하게 시험을 수행한 결과, PSCAD/EMTDC에 의한 결과와 거의 동일한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

Table 2. Comparison result of simulation and test

test items	simulation results	test results
round-trip	93.7[%]	92.7[%]
anti-islanding	261[ms]	258[ms]
	217[ms]	219[ms]

	254[ms]	257[ms]
LVRT	0.55[p.u.] / 0.2[s]	0.55[p.u.] / 0.2[s]
	0.6[p.u.] / 0.25[s]	0.6[p.u.] / 0.25[s]
	0.65[p.u.] / 0.3[s]	0.65[p.u.] / 0.3[s]
	0.7[p.u.] / 0.35[s]	0.7[p.u.] / 0.35[s]
	0.75[p.u.] / 0.4[s]	0.75[p.u.] / 0.4[s]
	0.8[p.u.] / 1[s]	0.8[p.u.] / 1[s]
	0.9[p.u.] / 5[s]	0.9[p.u.] / 5[s]

6. 결론

본 논문에서는 현장에 설치되어 있는 ESS의 성능을 검증하고 신뢰성을 평가하기 위해, PSCAD/EMTDC를 이용하여 ESS용 성능평가 시험장치를 모델링 하고, 이를 바탕으로 MW급 이동형 성능평가 시험장치를 구현하여, 세 가지 시험에 대한 특성을 분석하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PSCAD/EMTDC의 모델링을 바탕으로, round-trip 효율에 대한 특성을 분석한 결과, ESS의 용량은 약 656[kWh]이고, 효율은 약 93.7[%]임을 알 수 있었다. 또한, MW급 이동형 시험장치를 이용하여, 시뮬레이션과 동일한 조건으로 시험을 수행한 결과, ESS의 용량은 약 640[kWh]이고, round-trip 효율은 약 92.7[%]임을 알 수 있었다. 따라서, 시뮬레이션과 시험에 의한 결과 값이 거의 동일한 특성을 나타냄을 알 수 있었다.
- (2) PSCAD/EMTDC의 모델링을 바탕으로, 단독운전에 대한 출력 특성을 분석한 결과, 각각 ESS가 100[kW], 300[kW], 500[kW]의 단독운전 조건에서 약 261[ms], 217[ms], 254[ms] 동안 운전이 지속된 후 정지함을 알 수 있었다. 또한, MW급 이동형 시험장치를 이용하여, 시뮬레이션의 조건과 동일하게 시험을 수행한 결과, 각각 ESS가 약 258[ms], 219[ms], 257[ms] 동안 운전이 지속된 후 정지함을 알 수 있었다. 따라서, 시뮬레이션과 시험장치에 의한 단독운전 조건에서의 지속시간이 약 3[ms], 2[ms], 3[ms] 정도 차이가 발생하지만, 분산전원 계통연계 기술기준(0.5초) 이내에 ESS가 계통에서 탈락되므로, 단독운전방지에 문제가 없음을 알 수 있었다.
- (3) PSCAD/EMTDC의 모델링을 바탕으로, LVRT에 대한 시험특성을 분석한 결과, 목표 전압과 지속 시간을 구현할 수 있음을 알 수 있었고, 모든 시험

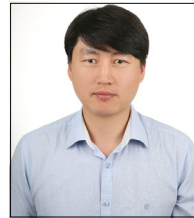
조건에서 ESS가 안정적으로 계통에 연계되어 운전되고 있음을 알 수 있었다. 또한, MW급 이동형 시험장치를 이용하여, 동일한 조건에서 시험을 수행한 결과, 계통모의장치가 동일한 전압과 지속시간을 출력할 수 있음을 알 수 있어, 본 논문에서 제시한 시험평가장치의 유용성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] Eung-Sang Kim, "Microgrid and ICT Technology", *The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 29, no. 4, pp. 12-25, 2015. 7.
- [2] IEEE 1547.1, "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System", June, 2005
DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2005.96289>
- [3] IEEE 1547.6, "IEEE Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks", Sept., 2011
DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6022734>
- [4] IEC 61000-4-11, "Voltage dips, short interruptions and voltage variation immunity test", 2014
<https://webstore.iec.ch/publication/63503>
- [5] IEC 62933-2-1, "Electrical energy storage(EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification", 2017
<https://webstore.iec.ch/publication/27124>
- [6] IEC 62933-5-1, "Electrical energy storage(EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems - General", 2017
<https://webstore.iec.ch/publication/33665>
- [7] SGSF-025-5-x, "Electrical energy storage system- Part x Site acceptance test method", 2019
- [8] SPS-C-KBIA-10104-03-7312, "Secondary lithium- ion battery system for battery energy storage systems-performance and safety requirements, 2018
- [9] PNNL-22010 ('2012, Protocol for Uniformly Measuring and Expressing the Performance of Energy Storage Systems)
<https://www.batterystandards.info/node/1178>
- [10] IEC 61400-21 "Wind turbines-Part 21 Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines", 2008
<https://webstore.iec.ch/publication/29528>
- [11] IEC 62116 "Utility-interconnected photovoltaic inverters- Test procedure of islanding prevention measures", 2014
<https://webstore.iec.ch/publication/6479>
- [12] Min-Kwan Kang, Sung-Sik Choi, Jae-Beom Park, Yang-Hyeon Nam, Eung-Sang Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on the Modeling Method of Performance Evaluation System for MW Scaled Energy Storage System Using the PSCAD/EMTDC", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 66, no. 6, pp. 885-891, 2017. 6.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.885>
- [13] Jae-Beom Park, Mi-Sung Kim, Dae-Seok Rho, "Characteristic Analysis and Implementation of 30kW Portable Test Equipment for Performance Evaluation in Energy Storage System", *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 67, no. 6, pp. 715-723, 2018. 6.
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.6.715>
- [14] Jae-Beom Park, Byung-Ki Kim, Mi-Sung Kim, Dae-Seok Rho, "A Study on the Site Acceptance Test(SAT) Evaluation Algorithm of Energy Storage System using Li-ion Battery", *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, vol. 20, no. 6, pp. 26-37, 2019. 6.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.6.26>

최 익 준(Ik-Joon Choi)

[정회원]



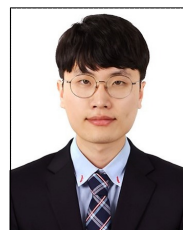
- 2006년 2월 : 원광대학교 전기전자공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

<관심분야>

ESS, 신재생에너지, 마이크로그리드

한 병 길(Byeong-Gill Han)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한밭대학교 전자제어공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 ~ 2020년 4월 : 한국화학융합시험연구원 연구원

- 2020년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력변환기, ESS, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 후 동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

〈관심분야〉

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

김 경 화(Kyung-Hwa Kim)

[준회원]



- 2021년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사과정 재학 중

〈관심분야〉

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

〈관심분야〉

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석