

파랑에너지의 특성을 반영한 파력발전용 전기적 시스템의 출력 성능 및 안전성 확인을 위한 실험적 연구

노 찬¹ · 임창혁¹ · 김경환² · 신승호^{2,†}

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양에너지연구본부 연구원
²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양에너지연구본부 책임연구원

Experimental Study to Verify Performance and Safety of Electrical System for Wave Energy Converter Reflecting Characteristics of Wave Energy

Roh Chan¹, Chang-Hyuk Lim¹, Kyung-Hwan Kim², and Seung-Ho Shin^{2,†}

¹Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Principal Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

본 연구에서는 실험역의 파랑에너지 특성을 모사하는 입력조건을 기반으로 30 kW급 파력발전용 전기적 시스템의 시제품에 대한 성능 및 안전성을 확인하였다. 파랑에너지의 맥동성 및 불규칙성을 모사할 수 있는 파력에너지 모의장치를 구성하였다. 파력에너지 모의장치는 백터 인버터와 유도전동기로 구성되며, 파력발전 수치시뮬레이션을 통해 산정된 터빈 시스템의 토크를 적용하여 파력에너지 입사 특성을 충분히 모사할 수 있다. 파력에너지의 입사는 규칙과 조건과 불규칙과 조건을 적용하였으며, 시제품의 출력 성능 및 안전성 확인을 수행하였다. 파력에너지 모의 장치는 30 kW급 영구자석 동기발전기, AC/DC 컨버터, ESS 시스템 등의 제반 시제품을 통해 계통에 연계하였다. 파력발전용 전기적 시스템의 성능은 변동하는 입력에너지에 따른 최대출력제어의 확인을 통하여 이루어졌고, 안전성은 연속 운전 및 최대 출력 운전을 통해서 확인하였다.

Abstract – In this study, the performance and safety of a prototype of a 30 kW class wave power electric system was verified based on the input conditions that simulate the wave energy characteristics of the real sea area. A wave energy simulation device that can simulate the pulsation and irregularities of wave energy was constructed. The wave energy simulation device is composed of a vector inverter and an induction motor, and it is possible to sufficiently simulate the wave energy incident characteristics by applying the torque of the turbine system calculated through numerical simulation of wave power generation. For the incidence of wave energy, regular wave conditions and irregular wave conditions were applied, and the output performance and safety of the prototype were verified. The wave energy simulation device was connected to the system through various prototypes such as a 30 kW class permanent magnet synchronous generator, AC/DC converter, and ESS system. The performance of the electric system for wave power generation was achieved through verification of the maximum output control according to the fluctuating input energy, and the safety was verified through continuous operation and maximum output operation.

Keywords: Wave energy converter(파력발전장치), Wave energy simulator(파력에너지 모의장치), Torque control(토크 제어), Power performance(출력 성능), Safety(안전성), Electrical system(전기적 시스템)

[†]Corresponding author: shinsh@kriso.re.kr

1. 서 론

파력 발전은 세계의 에너지 수요를 감당할 수 있는 유망한 에너지 원 중의 하나이다(Barstow *et al.*[2008]; Mackay[2012]). 파력 발전은 전세계적으로 2-3TW의 잠재력을 갖고 있는 것으로 분석되며, 풍력 및 태양광 발전과 함께 재생에너지를 이끌어갈 중요한 에너지원이 될 전망이다. 파랑에너지를 이용한 재생에너지 시스템에 관한 연구가 다수 진행되고 있으며(Falnes[2007]; Falcao[2010]), 관련 기술의 진전으로 이미 몇몇은 실제 해양에서의 실증테스트를 완료하였다(Ekstrom *et al.*[2015]; Lopez *et al.*[2013]).

파력발전의 상용화를 위한 기술적 리스크 해소 방안 중의 하나에 파랑에너지의 맥동성 및 불규칙 특성에 맞추어 에너지 흡수(Power Take-off, PTO) 시스템의 제어를 원활히 하는 것이 있다. 관련 연구에서는 파력 에너지를 전기에너지로 변환하기 위한 다양한 개념과 접근 방식이 제안되고 있으며, 일부 장치는 분석적, 수치적, 실험적 방법으로 확인되어 왔다(Ekstrom *et al.*[2015]; Lopez *et al.*[2013]; Lavidas[2020]; Korde[2020]).

지금까지 주어진 파랑 조건 하에서 최대의 발전량을 추출하기 위한 대부분의 연구는 파력발전장치의 전기 역학 및 전력 성능을 감당하는 각 주요 시스템 간의 결합 또는 손실이 무시되고 각기 독립적으로 수행하는 것으로 다루어져 왔다. 또한 개발된 대부분의 제어방법은 단순히 파랑 에너지로부터 에너지 흡수를 증가시키는 방법에 초점을 맞추어 이상적인 동력 인출 장치를 고려하는 등의 비현실적인 시도가 많았다. 이의 해소를 위해 수치 해석적 방법으로는 파도 측에서 계통까지 또는 전기 부하 측에 이르기까지 모든 구성요소를 통합하는 수학적 모델을 개발한 연구들이 진행되었고, 물리적으로는 수조 실험이나 실험실 실험을 수행하기도 하였다(Shadman *et al.*[2018]; Garcia-Rosa *et al.*[2015]; Wen *et al.*[2020]; Roh *et al.*[2020]).

al.[2020]).

파랑에너지에서 계통 측까지 전체 에너지 변환단계를 실험적으로 검토함에 있어서는 다음과 같은 한계가 존재한다. 파력발전장치의 상사(예를 들어Froude 상사)를 고려할 때 기하학적 상사가 ϵ 로 표시되면 동력전달장치 전력 스케일은 $\epsilon^7/2$ 이다(Heller[2012]; Falcao and Henriques[2014]). 이것은 큰 수조에서 파력발전장치를 테스트 할 수 있는 가장 큰 규모(약 1:10)에서도 전기시스템의 전력 규모가 약 $(1/10)^7/2$, 1/3162임을 의미한다. 이 축척에서 대용량 파력발전장치(예 : 1 MW)의 정격 전력은 실제 물리적 시험을 수행하기에는 너무 작은 316W 규모로 구현될 수 밖에 없는 지경에 이른다.

그러나 실험적인 검토에 있어 주요 대상이 전기 장비의 응답과 전기시스템의 제어 전략을 시험하는 것이라면, 충분한 전력 규모의 실험실에서 발전기 및 전기시스템의 시험을 통해 소기의 목적을 달성할 수 있다(Carrelhas *et al.*[2019]). 발전기는 실제 동력전달장치의 토크와 회전 속도를 모의하는 파력에너지 모의장치에 의해 기계적으로 구동될 수 있다. 즉, 파랑에너지 모의 장치를 발전기에 연결함으로써 파랑에너지의 변동 특성을 충분히 모사하도록 제어할 수 있다. 또한 파랑에너지를 이용해 발전기를 구동하는 에너지변환 장치의 기계적 출력 특성은 시간 영역 수치 시뮬레이션을 통해 구현하여 반영할 수 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션과 실험을 연동하여 파력발전장치의 특성을 반영한 실험장치를 구성하였고, 이를 기반으로 파력발전용 전기적 시스템의 성능과 안전성을 확인한다. 파력발전용 전기시스템은 30 kW급 영구자석 동기발전기, AC/DC 컨버터, ESS 시스템을 통해 계통 연계를 하였고, 해당 시스템이 실제 해상에서 조우하게 될 파랑 조건을 부여하면서 실험을 진행했다. 이를 통해 실험에서 발생할 수 있는 제반 문제를 사전에 파악함으로써 실험역 설치 및 운영의 수월성을 확보할 수 있다.

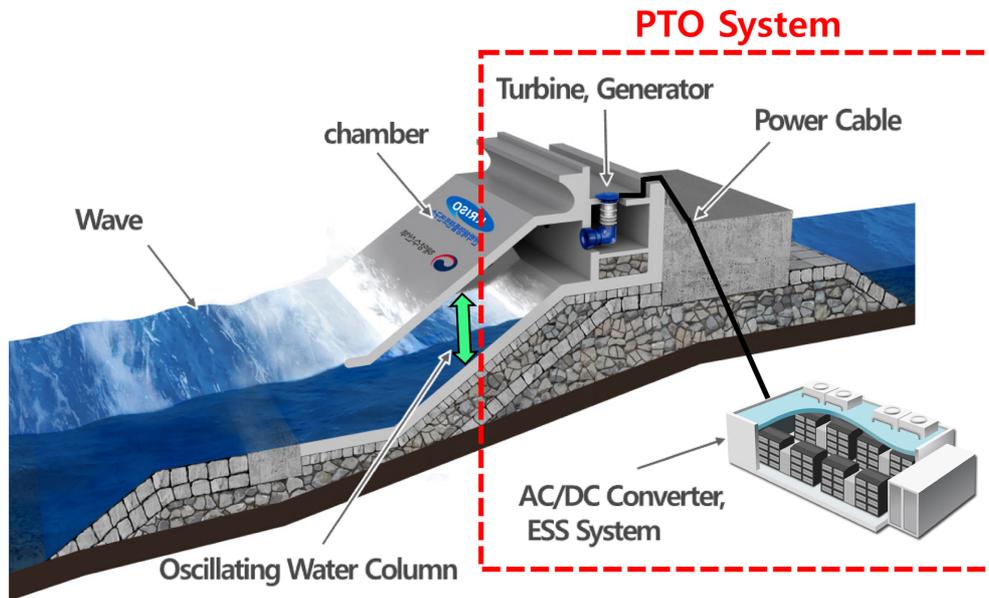


Fig. 1. Configuration of oscillating water column type wave energy converter (Roh *et al.*[2020]).

2. 파력발전시스템 구성

진동수주형 파력발전장치는 파랑에너지를 공압에너지로 변환하는 진동수주실과 공압에너지를 전기에너지로 변환하는 동력전달장치 (Power Take-off, PTO) 시스템으로 구성된다. 동력전달장치 시스템은 터빈 시스템, 발전기, 전력변환장치로 구성된다. 터빈 시스템의 효율(<46%)(Roh et al.[2020])이 발전기 및 전력변환장치의 효율(>90%)보다 상대적으로 변화가 크므로 동력전달장치 시스템의 성능은 터빈 시스템의 효율을 최대로 할 때 최대 효율을 얻을 수 있다. 결과적으로 터빈 시스템의 효율을 최대로 이끌어 내기 위해서는 전기적 부하의 제어가 필요하다.

2.1 파력발전용 동력전달장치의 시스템 구성

진동수주형 파력발전의 공압은 수주실 내 수면의 상하운동에 의해 왕복성 유동으로 나타나는데, 이의 흡수를 위한 터빈시스템은 웰스터빈과 임펄스터빈으로 구분된다. 본 연구에서는 자기기동성과 입력에너지의 변동성에 대한 대응이 우수한 임펄스 터빈을 적용하였다. 임펄스터빈의 동적 모델은 정상상태이며 단방향 유속으로 가정하여 구성할 수 있다. 임펄스터빈의 동적 모델은 입력 계수(C_A)와 토크 계수(C_T)를 이용해서 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 실험적으로 도출할 수 있다(Roh et al.[2020]).

$$C_A = \frac{\Delta p Q}{k * v_w^3 * \left(1 + \frac{1}{\varnothing^2}\right)} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T_m}{k * v_w^3 * \left(1 + \frac{1}{\varnothing^2}\right) * r_t} \quad (2)$$

입력 계수는 압력 차(Δp), 유량(Q), 유속(v_w) 및 터빈형상계수(k)를 이용해서 계산할 수 있고, 터빈 계수는 토크(T_m)와 유속(Q), 터빈형상계수(k) 및 터빈 직경(r_t)을 이용해서 계산할 수 있다.

식 (1), 식 (2)를 이용해서 터빈 시스템의 효율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta_{Turbine} = \frac{P_m}{P_{pne}} = \frac{T_m * \omega_r}{\Delta p Q} = \frac{C_T}{C_A * \varnothing} \quad (3)$$

식 (3)에 나타난 것과 같이 터빈 시스템의 효율은 흐름계수(\varnothing)에 관한 함수이기 때문에 \varnothing 를 이용한 임펄스터빈의 수학적 모델링은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Roh et al.[2020]).

$$C_A = 0.0015\varnothing^6 - 0.0193\varnothing^5 + 0.0283\varnothing^4 + 0.5313\varnothing^3 - 2.8521\varnothing^2 + 5.3347\varnothing - 0.0819 \quad (4)$$

$$C_T = 0.0075\varnothing^6 - 0.1391\varnothing^5 + 0.9676\varnothing^4 - 3.1118\varnothing^3 + 4.3434\varnothing^2 - 0.6471\varnothing - 0.0651 \quad (5)$$

\varnothing 은 $0.5 < \varnothing < 2.5$ 이내의 값으로 가정한다(Roh et al.[2020]). C_T 은 너무 작은 값에서 음수의 값으로 시작하기 때문에 \varnothing 의 범위는 일정 값 이상에서만 하는 것으로 하였다. 본 연구에 사용된 모델은 30 kW급 임펄스 터빈의 모델을 적용하였다.

파력발전용 전기적 시스템은 발전기, AC/DC 컨버터, ESS 시스템으로 구성된다. 터빈 시스템의 기계적 에너지는 발전기를 통해서 전기적 에너지로 변환하게 된다. 발전기의 출력은 터빈 시스템의 각속도에 따라서 가변 전압과 가변 주파수의 출력 특성을 나타낸다. 가변 전압과 가변주파수의 출력은 AC/DC 컨버터를 통해서 일정한 전력으로 변환되고, 이는 배터리에 저장되게 된다. 파력발전 특성상 평균 전력과 최대 출력 전력의 차이가 매우 크게 나타나 전기적 시스템을 설계하는 것이 어렵다. 즉, 파력발전의 특성을 반영한 전기적 시스템 설계는 안정적 출력을 위해서 AC/DC 컨버터는 배터리 시스템에 연결되고, 일정 이상의 전력이 배터리에 충전 되었을 때 DC/AC 인버터를 이용해서 계통으로 출력하도록 구성한다. 배터리 용량 선정 및 충방전 시나리오는 입력에너지와 운용알고리즘에 따라서 최적의 상태를 선택할 수 있다(Roh et al.[2020]).

본 연구에서는 파력발전장치의 시뮬레이션을 기반으로 터빈 시스템의 출력 토크를 파력발전 모의장치를 이용해 구현하였고, 이를 실제 파력발전용 전기적 시스템과 연결을 통해 성능 및 안전성 확인을 진행하였다.

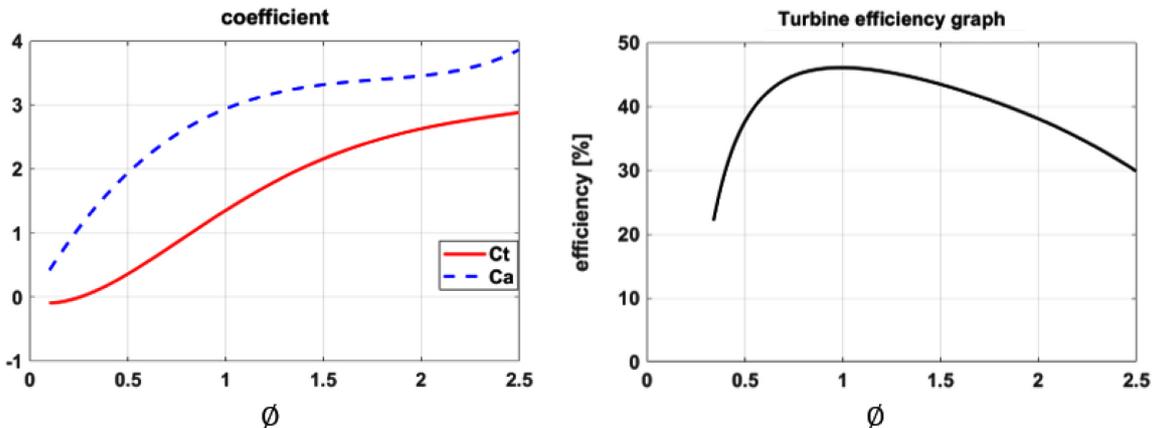


Fig. 2. Impulse turbine system efficiency graph (Roh et al.[2020]).

2.2 파력발전용 제어시스템 구성

2.2.1 최대출력제어(Maximum Power Point Tracking, MPPT)

재생에너지 시스템은 입력 에너지가 불규칙하게 변화하기 때문에 최대 출력을 얻기 위해서는 적절한 제어가 필요하다. 즉, 입력 에너지에 따라서 최대 출력을 얻을 수 있는 전기적 부하 제어가 수반되어야 한다. 앞 서 설명한 것과 같이 파력발전용 동력전달장치 시스템의 효율은 터빈의 효율에 지배적이기 때문에 터빈의 효율이 최대가 되도록 제어 되어야 한다. 우선적으로, 터빈 시스템이 전달하는 기계적 전력은 터빈 시스템의 효율을 반영해서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{mech} = \eta_{Turbine} * P_{pne} \tag{6}$$

이를 터빈 계수를 기반으로 터빈의 회전속도를 이용해서 나타내면 터빈의 기계적 토크는 다음과 같이 계산할 수 있다(Roh et al.[2020]).

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \left(\eta_{Turbine} * C_A * k * \left[1 + \frac{1}{\phi^2} \right] * r_t^3 * \phi \right) * \omega_r^2 \tag{7}$$

터빈의 효율을 최대로 하는 전기적 부하 제어는 위의 식을 이용해서 계산할 수 있으며 식 (7)의 기계적 토크의 최적 값을 이용해서 다음과 같이 계산할 수 있다(Roh et al.[2020]).

$$T_m^* = T_{m,opt} \left(\eta_{Turbine,max} * C_{A,opt} * k * \left[1 + \frac{1}{\phi_{opt}^2} \right] * r_t^3 * \phi_{opt}^3 \right) * \omega_r^2 \tag{8}$$

AC/DC 컨버터의 부하 제어를 통해서 전기적 기준 토크를 만족할 때 파력발전장치의 최대출력을 얻을 수 있다.

2.2.2 정격출력제어(Rated Power Control, RPC)

정격 이상의 에너지는 발전 시스템의 손상을 야기할 수 있기 때문에 이에 관한 제어가 필요하다. 기존의 풍력발전과 같은 경우는

피치제어를 통해서 이를 실현할 수 있지만, 파력발전장치는 터빈으로 들어오는 유량을 밸브를 통해서 제어할 수 있다.

병렬로 구성된 바이패스 밸브와 직렬로 구성된 유량제어 밸브를 통해서 정격 이상의 에너지를 어느정도 극복할 수 있지만 파랑에너지의 맥동성 및 불규칙성에 의해 순간적으로 정격 이상의 에너지가 시스템으로 유입될 수 있다. 본 연구에서는 기존의 정격출력 제어와 별개로 본 논문에서는 순간적인 정격 이상의 에너지를 극복할 수 있는 전기적 시스템을 설계하였고, 이를 실험적으로 전기적 시스템의 안전성을 확인하였다.

3. 파력발전용 전기적 시스템의 실험 구성

파랑에너지의 특성을 반영하여 전기적 시스템의 성능 및 안전성 확인을 진행하였다. 파랑에너지의 특성은 별도의 유체동역학 및 PTO 시스템의 연성 시뮬레이션을 통해 터빈 시스템의 기계적 토크를 계산하였고, 이를 파력발전 모의장치를 통해 구현하도록 하였다. 파력발전 모의장치는 전기적 시스템과 연결하였고, 전기적 시스템은 파랑에너지 조건을 변화시켜가며 최대출력제어 및 정격출력제어의 출력 성능 및 안전성을 확인하였다. 전기적 시스템의 실험 구성도는 다음 Fig. 3에 나타난다.

3.1 실험시스템 사양 및 특성 분석

파력발전실험용 전기적 시스템은 파력에너지 모의장치와 실험역에 설치될 발전기 및 관련 전력변환장치를 연결하여 구성된다. 먼저, Fig. 4에 나타난 것과 같이 파력발전 모의장치는 백터 인버터와 유도전동기로 구성하고, 토크 제어를 통해서 터빈 시스템의 기계적 출력을 모사하였다. 파력에너지 모의장치의 사양은 4극 440 V, 65 kW급 농형 유도전동기와, 440 V, 75 kW급 정격 백터인버터로 구성된다. 파력에너지 모의장치는 -1800 RMP에서 1800 RPM까지의 속도 범위와 859 Nm/1000 rpm의 토크 사양으로 구성된다.

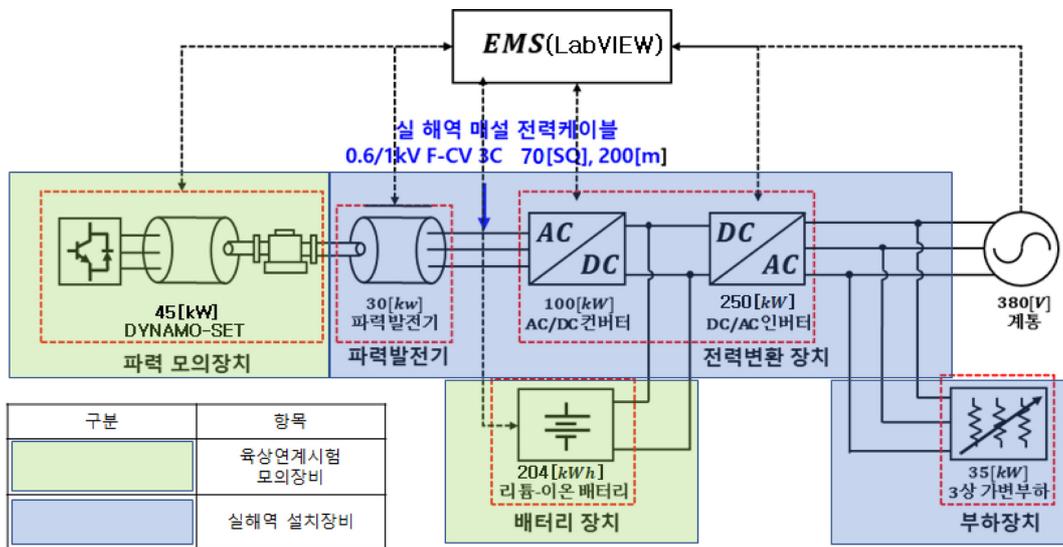


Fig. 3. Configuration of electric system test for wave energy converter.

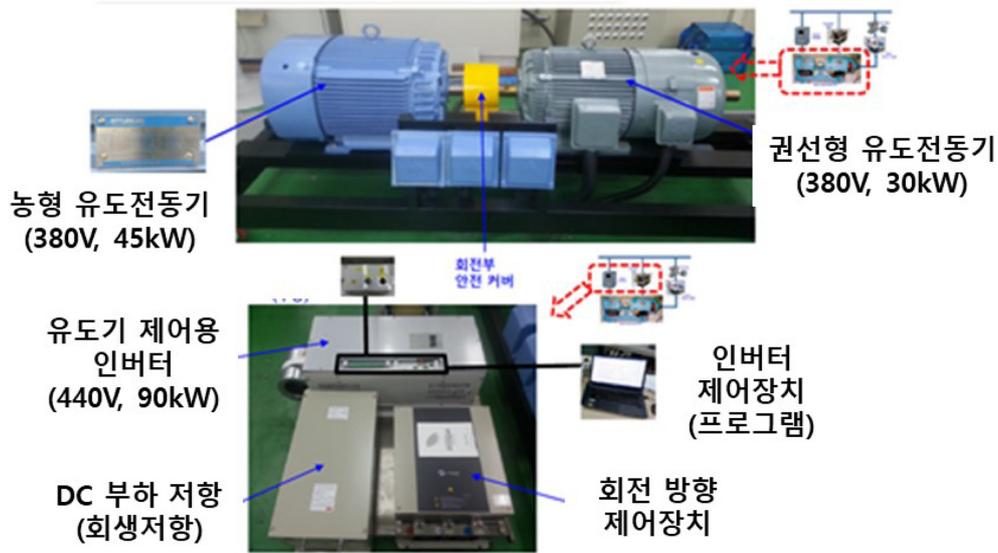


Fig. 4. Photograph of wave energy simulator.

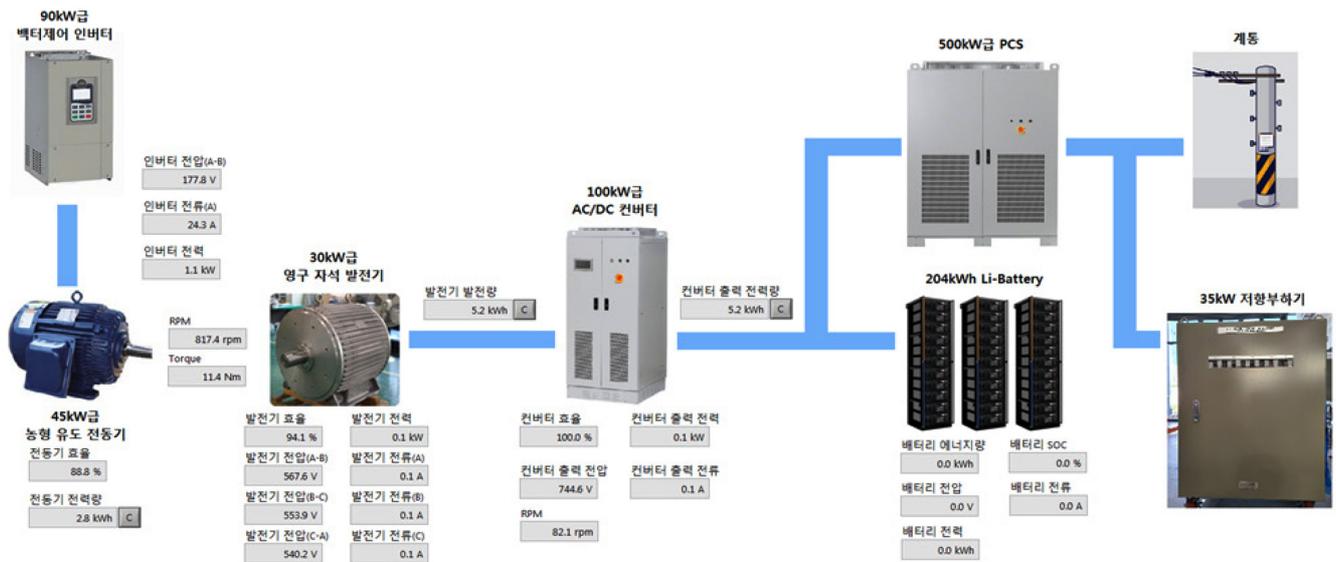


Fig. 5. Construction of electric system for wave power generation.

파력에너지 모의장치는 본 연구에서 요구하는 정격 800 RPM, 30 kW급 영구자석 동기발전기의 구동이 가능한 범위이다. 파력에너지 모의장치는 토크 제어를 통해서 규칙과 및 불규칙과 특성을 구현하였다.

Fig. 5에 나타난 파력발전 전기시스템의 구성은 영구자석 동기발전기, AC/DC 컨버터, ESS 시스템, 가변저항부하로 구성된다. 파랑에너지의 변동성에 따라서 다양한 영역에서 발전이 가능한 30 kW급 영구자석형 동기발전기를 선정했으며, 발전기의 전기적 토크 제어를 위한 100 kW급 AC/DC 컨버터를 선정하였다. ESS 시스템은 Li 배터리를 사용하였으며, 배터리의 전력은 500 kW급 PCS를 통해서 계통과 연계하였다. 또한, 독립 운전 성능 확인을 위한 35kW급 가변저항부하를 추가적으로 설치하였다.

3.2 실험요소

파력발전용 전기시스템의 시험 항목은 다음과 같이 출력 성능과 안전성 확인으로 구분할 수 있다. 입력 에너지의 변화에 따른 최대 출력을 얻을 수 있는 부하 제어 알고리즘에 관한 성능 확인과 연속 운전에 따른 시스템의 온도 및 정격 이상의 에너지에서 시스템의 반응 특성 분석을 통한 안전성 확인을 진행하였다.

우선적으로 파력발전 모의장치의 출력 특성을 확인하기 무부하운전을 진행하였고, 규칙과 및 불규칙과 조건에서 파력발전 모의장치의 특성을 확인하였다. 다음으로 파력발전용 전기적 시스템의 성능 확인을 위한 시험 항목은 다음과 같이 구성된다.

- 배터리 연계형 AC/DC 컨버터 최대출력제어(MPPT) 시험
- 배터리 연계형 DC/AC 인버터 독립운전시험

- 배터리 연계형 DC/AC 인버터 계통연계운전 시험
시스템 안전성 확인을 위한 시험 항목은 다음과 같이 구성된다.
- 정격 출력 조건에서 연속운전 시험(4시간)
- 발전기-AC/DC 컨버터의 최대출력 시험(100 kW)

4. 결과 및 고찰

4.1 파력발전장치 무부하 출력 시험

Fig. 6은 파력에너지 모의장치의 제어에 따른 PMSG의 무부하 출력 전압 특성을 나타낸다. 무부하 출력 전압 특성은 규칙과 및 불규칙과 조건에서 확인하였다. 시뮬레이션을 통해서 계산된 터빈 각 속도 변화에 따라서 파력에너지 모의장치는 규칙과 및 불규칙과의

특성을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 이를 이용해서 파력발전장치의 특성을 반영한 전기적 시스템의 성능 확인 및 안전성 확인이 가능할 것이다.

4.2 파력발전용 전기시스템 출력성능 확인

4.2.1 배터리 연계형 AC/DC 컨버터 최대출력제어(MPPT) 시험
배터리 연계형 최대출력제어 시험은 규칙과 및 불규칙과 조건 모두에서 진행하였다. 최대출력제어 시험은 터빈 시스템의 효율을 최대로 할 수 있는 알고리즘을 적용하였다. 이는 수 초 단위의 입력 에너지의 변화에 따른 AC/DC 컨버터의 제어 성능으로 확인할 수 있다.

Fig. 7은 파력에너지의 특성에 따른 AC/DC 컨버터의 최대출력

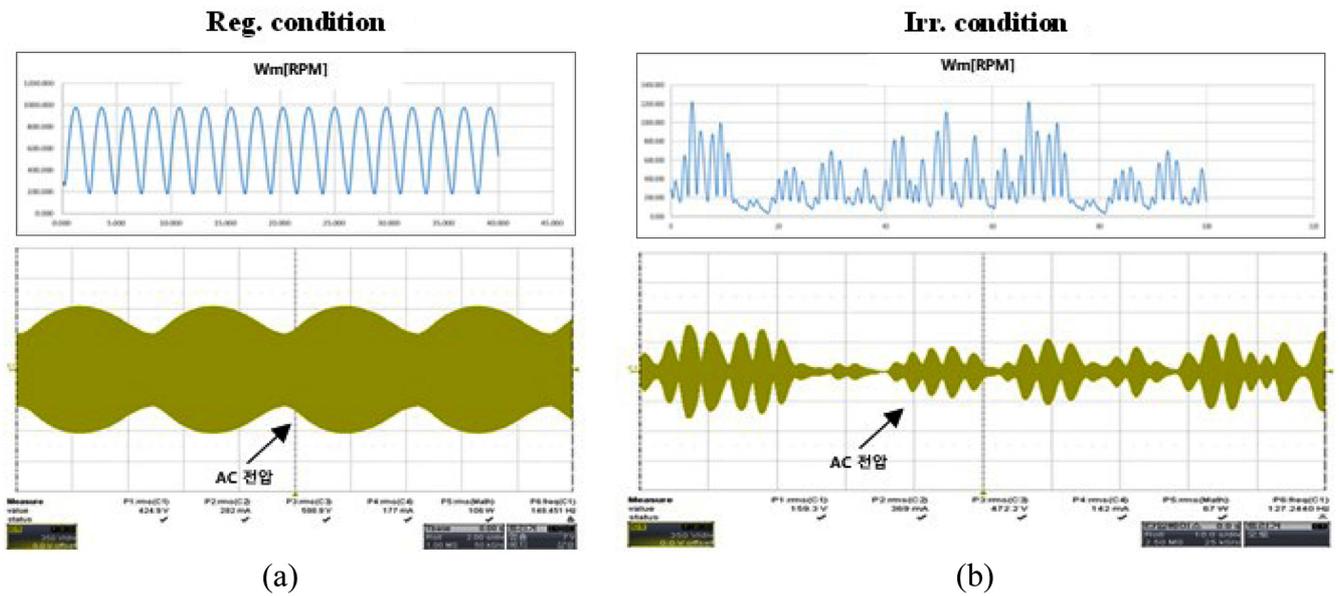


Fig. 6. No-load output voltage characteristics of PMSG reflecting the characteristics of wave energy under (a) regular wave and (b) irregular wave condition.

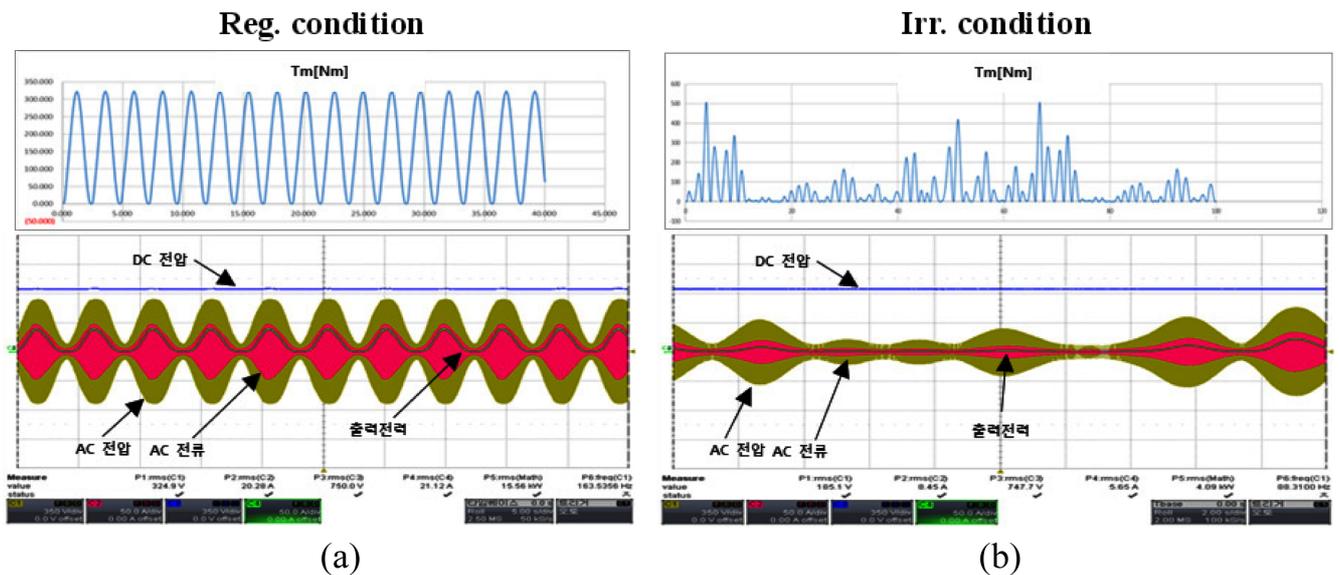


Fig. 7. Maximum power control result according to the characteristics of wave energy under (a) regular wave and (b) irregular wave condition.

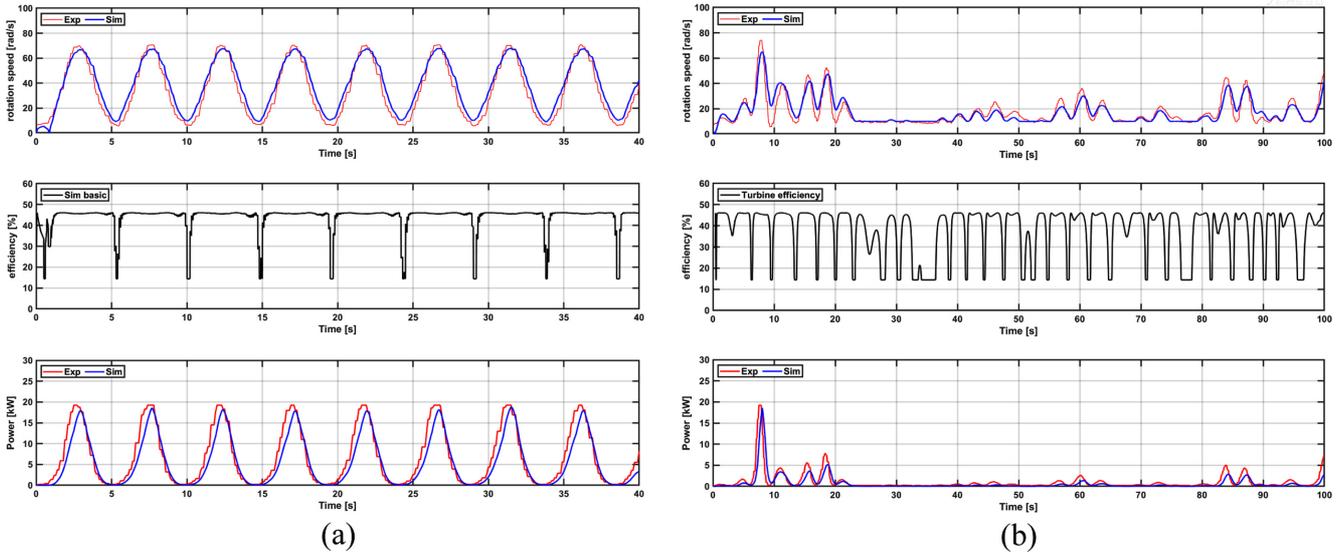


Fig. 8. Performance verification according to maximum power point tracking (MPPT) using simulation and experiment: turbine angular speed, turbine efficiency, output power generation under (a) regular wave and (b) irregular wave condition.

제어 시험 결과를 나타낸다. 규칙과 및 불규칙과 조건에서 AC/DC 컨버터는 최대출력을 위한 부하 제어가 가능한 것을 확인할 수 있다. 특히 에너지가 급격하게 변화하거나 작은 에너지가 들어오더라도 무난하게 부하가 제어됨을 확인할 수 있었다. 부하 제어의 궁극적인 목적은 터빈 시스템의 효율을 최대로 이끌어내는 것으로 실험의 결과로 계측된 각속도 및 발전출력과 동일한 조건의 수치 시뮬레이션의 결과 비교를 통해 부하 제어의 성능을 확인한다.

Fig. 8(a)에 나타난 것과 같이 규칙과 조건에서 시뮬레이션의 계산된 토크를 이용해서 실험한 전기적 시스템의 출력 성능과 시뮬레이션의 결과가 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 특히 실험의 데이터를 이용해서 계산된 터빈의 효율은 대부분의 구간에서 최대 효율을 만족하는 것을 확인할 수 있고, 이는 최대출력제어 알고리즘이 정확하게 구현된 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)에 나타난 것과 같이 불규칙과 조건에서도 시뮬레이션의 계산된 토크를 이용해서 실험한 전기적 시스템의 출력 성능과 시뮬레이션의 결과가 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 규칙과 조건과 유사하게 실험의 데이터를 이용해서 계산된 터빈의 효율은 대부분의 구간에서 최대 효율을 만족하는 것을 확인할 수 있고, 이는 최대출력제어 알고리즘이 정확하게 구현된 것을 확인할 수 있다. 다만 규칙과 조건과 다르게 에너지가 낮은 구간이 존재할 때는 낮은 효율을 나타내지만, 이러한 구간은 입력 에너지도 작기 때문에 큰 영향은 없다.

4.2.2 배터리 연계형 DC/AC 인버터 독립운전시험

도시지역은 계통에서 에너지에 대한 수요가 어렵거나, 계통에서 에너지를 공급 받을 수 없는 경우가 많아 출력된 발전량을 이용한 독립 운전이 요구된다. 본 연구에서는 가변저항 부하를 이용해서 배터리 연계형 DC/AC 인버터의 독립 운전을 실험을 진행하였다. 배터리에 저장된 에너지는 독립 부하 변화에 따라서 출력을 변화

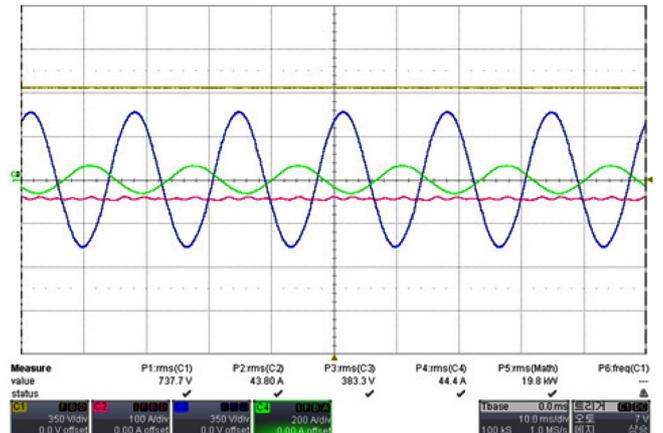


Fig. 9. Load power supply results according to the stand-alone mode of the battery-connected DC/AC inverter(battery voltage(y)/current(p), inverter voltage(b)/current(g)).

시키고 이에 따른 출력 성능을 확인한다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이 DC/AC 인버터는 부하의 크기에 따라서 출력 전류가 변화하게 되고, 이에 따라서 전력을 공급할 수 있다. 부하에 전력을 공급하고 있기 때문에 전압과 전류는 반대의 위상을 갖는 것을 확인할 수 있으며, DC/AC 인버터를 이용함으로써 배터리의 DC 출력을 부하의 3상의 전력으로 변환시켜서 에너지 공급이 가능한 것을 확인할 수 있다. 부하 변화에 따른 배터리 전압과 SOC의 값은 다음 Table 1에 나타난다.

Table 1. Battery voltage and SOC according to load change

부하 지령치		9 kW	20 kW	30 kW
측정값	배터리 전압	767.9	731.5	728.5
	배터리 SOC	50.5	50.5	50.5

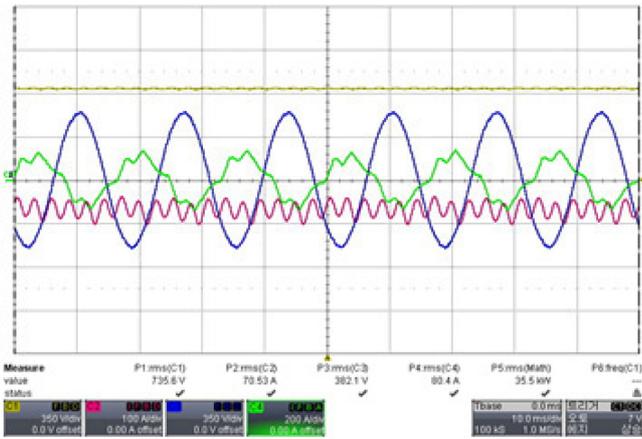


Fig. 10. Load power supply results according to the grid-connected mode of the battery-connected DC/AC inverter(battery voltage(y)/current(p), inverter voltage(b)/current(g)).

본 연구에서 사용된 ESS 시스템은 출력 부하에 비해 용량이 크기 때문에 Table 1에 나타난 것처럼 출력 부하를 변동하더라도 배터리 전압과 SOC에는 큰 영향을 주지 않는다.

4.2.3 배터리 연계형 DC/AC 인버터 계통연계운전 시험

계통 연계형 발전은 생산된 전력을 계통이 요구하는 전력의 형태로 변환해서 보낼 수 있다. 본 연구에서는 계통 연계를 통해 생산된 전력을 계통으로 전송하는 실험을 진행하였다.

Fig. 10에 나타난 것과 같이 DC/AC 인버터는 배터리의 에너지에 따라서 출력 전류가 변화시켜 전력을 계통에 공급할 수 있다. 계통의 상태에 따라서 전력의 양은 변화시킬 수 있고, 배터리의 에너지에 따라서 출력 전력을 조절할 수 있다. DC/AC 인버터를 이용해서 배터리의 DC 출력을 계통이 요구하는 3상의 전력으로 변환시켜서 에너지 공급이 가능한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 파력에너지의 변동 특성을 반영한 전기적 시스템의 성능 확인을 진행하였다. Fig. 11은 계통 연계형 DC/AC 인버터의 출력 지령치 변화에 따른 출력 특성을 나타낸다.

입력 에너지가 수 초 단위의 짧게 변화하더라도 전기적 부하 제어를 통해서 최대 출력을 얻는 것을 확인할 수 있었고, 계통에 상태에 따라서 독립 운전 및 연계 운전이 가능한 것을 확인할 수 있다. 결론적으로 본 연구에서 수행된 파력발전용 전기적 시스템의 출력 성능이 적합한 것을 확인하였다.

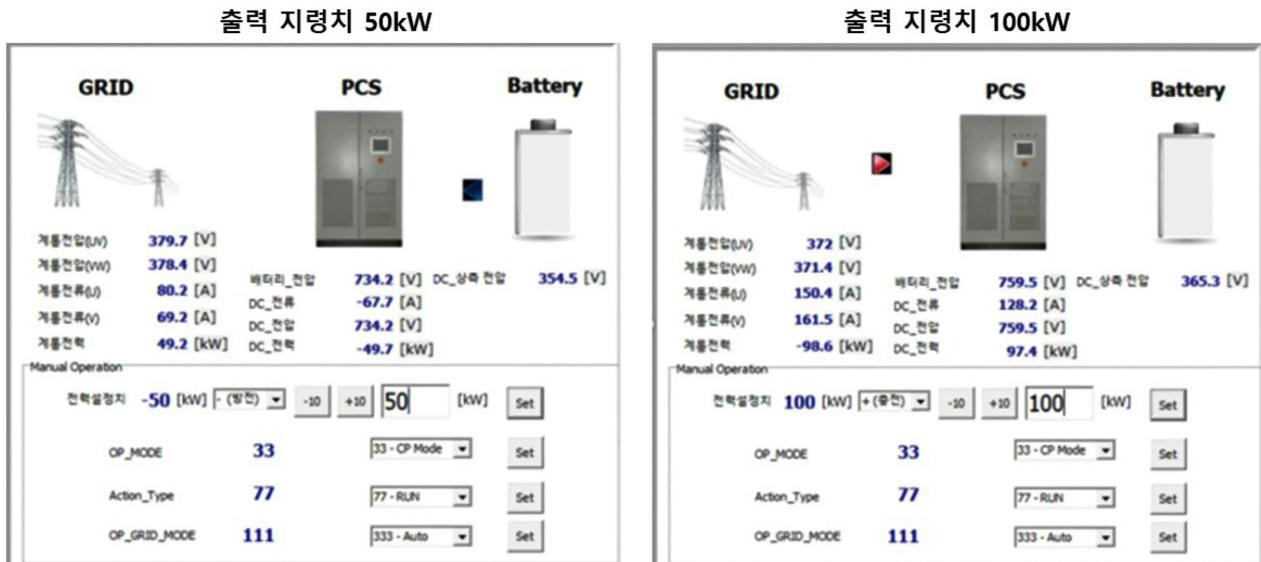


Fig. 11. Output characteristics according to the change of the output command value of the grid-connected inverter.

Table 2. Output power and battery system characteristics at rated power

	1 h	2 h	3 h	4 h
발전기 출력 전압	510.6 V	485.6 V	478.9 V	490.0 V
발전기 출력 전류	36 A	34.2 A	35.3 A	34.7 A
발전기 출력 주파수	190 Hz	190 Hz	190 Hz	190 Hz
발전기 출력 파워	31.2 kW	29.1 kW	30.6 kW	29.8 kW
3상 부하 선간전압	380.9 V	379.3 V	376.7 V	378 V
3상 부하 상전류	52.4 A	52.3 A	52.6 A	52.8 A
배터리 전압	714 V	714 V	715 V	716 V
배터리 SOC	34%	41%	49.2%	58%

4.3 파력발전용 전기시스템 안전성 확인

실제 시스템의 운용 시 성능 확인뿐만 아니라 안전성에 관한 확인도 필수적인 요소이다. 즉, 실제 시스템 운용하는 것과 같이 4시간 연속 운전에 관한 시험 항목과 파랑에너지의 급격한 변화를 반영한 최대 출력에서의 안전성을 확인하였다.

우선적으로 정격 출력에서 4시간 연속 운전하였을 때 시스템의 안전성에 대해서 성능을 확인하였다. 정격 출력에서 발전기의 출력 특성 및 배터리 시스템의 특성은 다음 Table 2에 정리하였다.

Fig. 12는 정격 출력 조건에서 4시간 연속 운전에 따른 AC/DC 컨버터의 온도 측정 결과를 나타낸다. 초기 동작이후 일정 이상의 온도까지는 상승하고 이후 포화된 온도 특성을 나타내고 있다. 포화된 온도는 약 50도 이하로 시스템은 안전한 것을 확인할 수 있

다. 시간에 따른 온도 변화는 Table 3에 정리하였다.

다음으로는 최대 출력조건에서 시스템 안전성을 확인하였다. 파랑에너지는 평균대비 급격하게 큰 에너지가 들어올 수 있는 특징이 있다. 본 연구에서는 대상지 환경 조건에서 발생할 수 있는 최대 조건을 고려하여 100 kW의 출력을 간헐적으로 동작시켜 시스템의 안전성을 확인하였다.

Fig. 13는 최대 출력 조건을 간헐적으로 작용시켰을 경우에 대한 발전기와 AC/DC 컨버터의 안전성을 확인하였다. 본 연구 대상지 해역에서 발생할 수 있는 최대 출력은 100 kW로 산정되었으며 이를 토대로 이용해서 보수적으로 본 시스템에 관한 안전성을 확인하였다. Fig. 13에 나타난 것과 같이 짧은 시간 동안 100 kW의 출력을 반복적으로 동작시켜 시스템의 안전성을 확인하였다. 최대 출력 조

Table 3. Output power and battery system characteristics at rated power

	1 h	2 h	3 h	4 h
Ambient (1)	21°C	26.5°C	26.5°C	26.5°C
판넬내부(상부) (2)	24°C	29.7°C	29.7°C	29.7°C
판넬내부(하부) (3)	21.2°C	22.6°C	22.6°C	22.6°C
Diode Stack (4)	27°C	28.4°C	28.4°C	28.4°C
Buck Stack (5)	31°C	34.4°C	34.4°C	34.4°C
Boost Stack (6)	24°C	29.4°C	29.4°C	29.4°C
Reactor-Core (7)	33°C	41.6°C	41.6°C	41.6°C
Reactor-Coil (8)	36°C	48.7°C	48.7°C	48.7°C

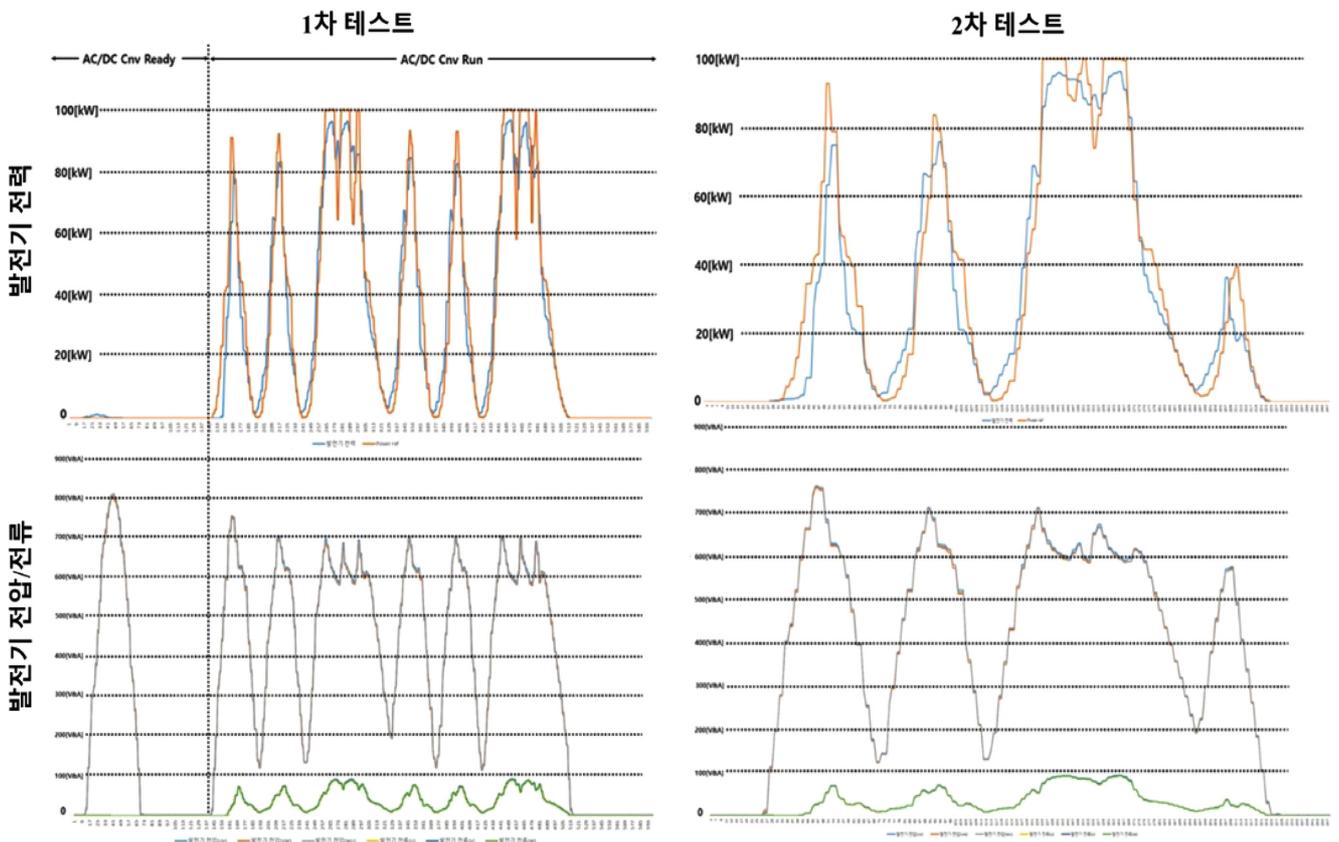


Fig. 12. Temperature measurement of AC/DC converter according to continuous operation at rated output.

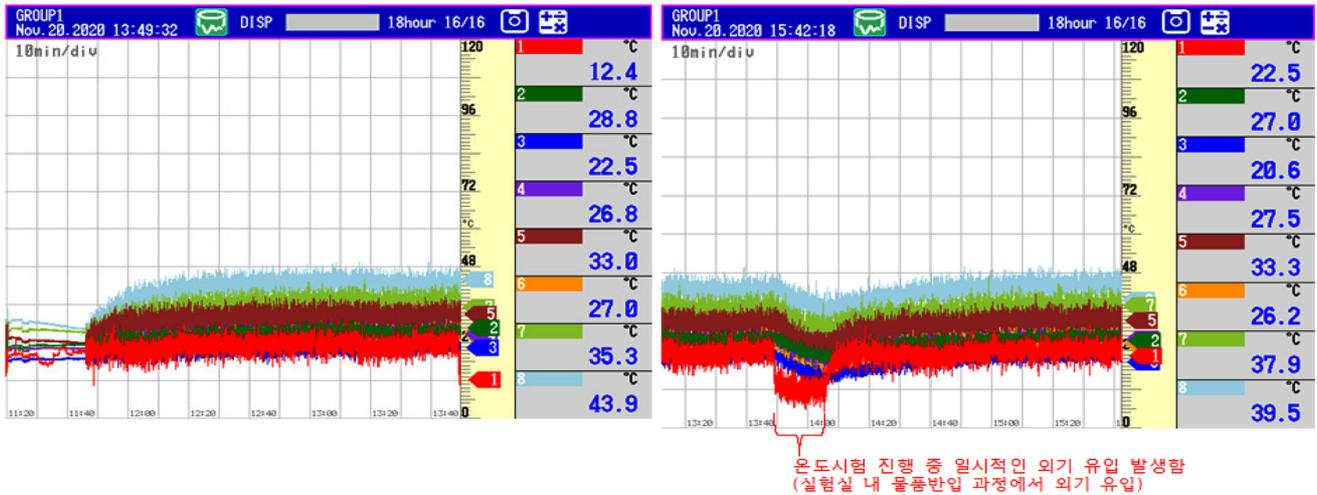


Fig. 13. Output characteristics of AC/DC converter under maximum output condition.

건에 관한 실험은 총 2회 진행하였으며, 1차/2차 실험 결과는 모두 Fig. 13에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 파랑 에너지의 특성을 반영한 입력 조건을 기반으로 30 kW급 파력발전용 전기적 시스템의 성능 및 안전성을 실험적으로 확인하였다. 입력에너지가 수 초 단위로 변화하는 파랑 에너지의 특성을 반영한 파력에너지 모의 장치를 구성하였고, 이를 파력발전용 시뮬레이터와 실시간 연동해서 터빈 시스템의 토크를 모사하였다. 파력발전 모의 장치에서 생성된 입력 에너지는 30 kW급 영구자석 동기발전기, AC/DC 컨버터, ESS 시스템을 통해 계통 연계를 하였고, 이는 해당 시스템이 실제 현장에서 겪게 될 동일 조건을 실험적으로 부여하고 성능 및 안전성을 확인한 것이다. 파력발전장치의 특성은 규칙과 조건과 불규칙과 조건을 적용하여 출력 성능 및 안전성 확인을 진행하였다. 출력 성능은 AC/DC 컨버터의 최대출력제어, 계통 연계 및 독립운전모드를 확인하였고, 안전성 확인은 4시간 연속 운전 및 최대 출력 특성에 관한 분석을 진행하였다. 이를 통해 실험역 설치 전 입력에너지의 특성을 반영하여 파력발전용 전기적 시스템의 출력 성능 및 안전성을 확인할 수 있고, 실험역에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 점검할 수 있다. 향후 실험역 설치를 통해서 기존의 실험 데이터와 실험역 출력데이터를 이용해 비교 확인 연구를 수행할 것이다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가 R&D사업 “방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발(PMS4590)”과 선박해양플랜트연구소의 주요 사업인 “파력발전 통합성능 및 구조안전성 해석기반 구축을 위한 WECAN 개발(PES3980)”에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Barstow, S. Mork, G. Mollison, Cruz, D.J., 2008, Wave tank and wavemaker design, in: J. Cruz (Ed.), Ocean Wave Energy Current Status and Future Perspectives, Springer-Verlag, pp. 93-132.
- [2] Carrelhas, A.A.D. Gato, L.M.C. Henriques, J.C.C. Falcão, A.F.O. Varandasb, J., 2019, Test results of a 30 kW self-rectifying biradial air turbine-generator prototype. *Renew Sustain Energy*, 109, 187-198.
- [3] Ekstrom, R. Ekegård, B. Leijon, M., 2015, Electrical damping of linear generators for wave energy convertersda review, *Renew Sustain Energy*, 42(11), 6-28.
- [4] Falcao, A.F.O., 2010, Wave energy utilization: a review of the technologies, *Renew Sustain Energy Rev*, 14(3), 899-918.
- [5] Falcao, A.F.O. Henriques, J.C.C., 2014, Model-prototype similarity of oscillating water-column wave energy converters, *Int. J. Mar. Energy*, 6, 18-34.
- [6] Falnes, J., 2007, A review of wave-energy extraction. *Mar Struct*, 20(4), 185-201.
- [7] Garcia-Rosa, P.B. Bacelli, G. Ringwood, J.V., 2015, Control-informed geometric optimization of wave energy converters: the impact of device motion and force constraints. *ENERGIES*, 8(12), 13672-13687.
- [8] Heller, V., 2012, Development of wave devices from initial conception to commercial demonstration, in: A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, Oxford, 79-110.
- [9] Korde, U., 2020, Control system applications in wave energy conversion. In: *OCEANS 2000 MTS/IEEE conference and exhibition*.
- [10] Lavidas, G., 2020, Selection index for wave energy deployments (siwed): a near-deterministic index for wave energy converters, *Energy*, 196, 117-131.
- [11] Lopez, I. Andreu, J. Ceballos, S., Martínez D. Alegría I. Kortabar-

- ria I., 2013, Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, *Renew Sustain Energy*, 27(4), 13-34.
- [12] Mackay, E.B.L., 2012, Resource assessment for wave energy, in: A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy*, Ocean Energy, 8, Elsevier, Oxford.
- [13] Roh, C. Kim, K.W. Park, J.Y. Park, S.W. Kim, K.H. Kwak, S.S., 2020, Power performance analysis according to the configuration and load control algorithm of power take-off system for oscillating water column type wave energy converters. *Energies*, 13(23), 6415.
- [14] Roh, C. Lim, C.H. Kim, K.H. Hong, K.Y. Shin, S.H., 2020, A Study on Verification of Energy Storage System Operational Algorithm for Wave Energy Converters Linked Microgrid. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 23(2), 81-96.
- [15] Shadman, M. Estefen, S.F. Rodriguez, C.A. Nogueira, I.C.M., 2018, A geometrical optimization method applied to a heaving point absorber wave energy converter. *Renew Energy*, 115, 533-546.
- [16] Wen, Y. Wang, W. Liu, H. Mao, L. Mi, H. Wang, W. Zhang, G., 2020 A shape optimization method of a specified point Absorber wave energy converter for the south China sea, *ENERGIES*, 11(10), 2645.

Received 17 March 2021

Revised 28 March 2021

Accepted 15 April 2021