

파력발전 장치의 최대전력 운전을 위한 가변부하 시스템

안현성, 김영철*, 차한주
충남대학교, 한국기계연구원*

Variable Load System for Maximum Power Operation of Wave Power Generation System

Hyunsung An, Young Cheol Kim*, Hanju Cha
Chungnam National University, Korea Institute of Machinery & Materials*

ABSTRACT

본 논문은 파력발전 장치의 최대 전력 운전을 위한 가변 부하 시스템을 구현하고 해상 및 육상 실험을 통해 검증하였다. 파력 장치는 가변 스프링, 댐퍼, 질량, 동기발전기, 가변 부하 시스템 등으로 구성되었으며, 동기발전기는 최대 출력을 발생시킨다. 파도 조건에 따라 달라지는 부하의 크기는 최적부하계산 알고리즘을 통해 선정되었으며, 제안된 부하 시스템을 통해 부하의 크기를 가변시켰다. 파력발전 장치는 수조 장치를 통해 파도 진폭의 크기(200mm~600mm)와 주파수(0.2Hz~1Hz)를 가변시켜 발전된 전력을 비교 분석하였으며, 해상 시험을 통해 시스템의 성능을 검증하였다.

1. 서론

최근 신재생 에너지원에 대한 관심이 증가함에 따라 태양광, 풍력, 파력, 수력 등의 친환경적인 에너지원을 통한 발전시스템이 크게 주목받고 있다. 우리나라의 경우 3면이 바다로 둘러싸여 있어 해양에너지의 이용에 대한 잠재력이 크다. 해양에너지 중에는 바다의 파도를 이용한 파력발전 시스템이 있으며 진동수주형, 월파/월류형, 가동물체형 등이 있다^{[1][2]}. 파력발전 시스템은 기계적인 부분과 전기적인 부분이 결합된 구조로써 전기적인 부하의 상태에 따라 기계적인 운동에너지에 영향을 주는 댐핑의 크기가 달라지며, 이는 발전 성능에 큰 영향을 준다. 이는 두 개의 결합 상태를 고려하여 파력발전 시스템이 최대전력을 발전할 수 있는 운전 기법이 연구되어야 한다.

본 논문에서는 파력발전 시스템이 최대전력 운전을 할 수 있는 부하를 구현하기 위한 가변 부하 시스템을 구현하였으며, 최적 부하를 기법을 제안하고 지상 수조 실험 및 해상 실험을 통해 시스템의 성능을 검증하였다.

2. 파력발전 장치

2.1 파력발전 최대전력운전

그림 1은 파력발전 시스템의 기계적인 부분과 전기적인 부분의 모델링을 보여주며, 기계적인 부분은 스프링(k), 댐퍼(c), 질량(m)으로 모델링 된다. 전기적인 부분은 동기발전기와 부하이며, 발전기 출력이 부하와 연계되고 기계적인 부분과 전기적인 부분은 결합상수 k_t 를 통해 표현 된다. 이 때, 결합상수

는 r_1 과 r_3 의 비를 고려해야한다. 기본적인 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현되며, 여기서 z 는 x 와 y 의 상대변위($x-y$)다. 발전기에서 출력되는 전압과 전력이 $V=k_t\dot{z}$ 와 $P=V^2/2R$ 이면 상대속도(\dot{z})는 식 (2)와 같으므로 전력은 식 (3)과 같다. 여기서 dP/dR 이 0인 지점이 최대 전력점이 되므로 식 (3)을 R 에 대해 미분하면 최대전력을 위한 최적 부하(R_{opt})를 구할 수 있으며, 시스템의 공진주파수(ω_n)와 파도의 주파수(ω)가 일치하는 점($r=1$)에서 최대전력을 얻을 수 있다. 하지만 파도의 주파수가 시스템의 공진주파수와 정확히 일치하기 힘들기 때문에 불규칙적인 파도 주파수에 대응하여 최대전력을 위한 최적 저항의 추정이 필요하다. 본 논문에서는 파도의 불규칙적인 상황을 극복하기 위해서 3가지의 모드로 동작할 수 있게 설계되어 있으며, 각 모드에 따라 스프링, 댐핑 고유진동 주파수가 달라진다. 각 세부적인 파라미터는 실험결과의 표1에 포함되어있다.

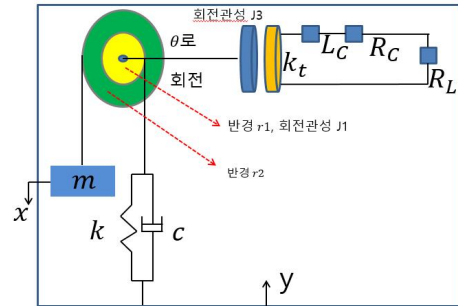


그림 1 파력발전 장치 모델링
Fig. 1 Modeling of wave power generation system

$$m\ddot{x} + c\dot{z} + kz = m\ddot{y} \quad (1)$$

$$\dot{z} = \frac{m\omega^2 Y}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2(\zeta_c + \zeta_m)r)^2}} \quad (2)$$

$$P_L = \frac{k_t^2 m^2 \omega_n^4 r^6 Y^2 R_L}{2(m^2 \omega_n^2 (1-r^2)^2 (R_C + R_L)^2 + r^2 (c_m (R_C + R_L) + k_t^2)^2)} \quad (3)$$

2.2 가변부하 시스템

앞서 설명한 최적부하 저항을 만들기 위한 가변부하 시스템은 저항 지령치에 따라 동작하게 되며, 그림 3과 같이 3상 정류기, IGBT, 부하 등으로 구성된다. 지령치에 따라 스위칭 듀

티가 결정되며, 스위칭에 따라서 고정된 저항(R_1, R_2)이 가변 저항처럼 모델링 될 수 있다. 부하 시스템은 2상의 병렬 구조로 하여 가변되는 부하의 범위를 넓게 적용 시킬 수 있다.

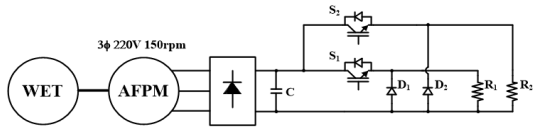


그림 2 파력발전 장치 구성도
Fig. 2 Structure of wave power generation system

발전기의 ac출력을 dc로 변환할 경우 발전기 출력이 3상 부하를 연계했을 때의 전력(P_{ac})과 그림 2와 같이 구성했을 때 dc측의 전력(P_{dc})이 식 (4)와 같은 관계를 만족해야만 한다. 식 (5)는 dc 전력을 표현하고 있으며, 저항 지령치에 따라 식 (6)에 의해 계산된 듀티에 의해 최적 저항이 구현 된다. 이러한 부하 시스템은 파력 발전의 최적 운전 조건을 만족하게 된다. 여기서 R 은 dc측의 고정된 저항이며, T 는 스위칭 주기이다.

$$\frac{V_{ac}^2}{R_{ac}} = \frac{V_{dc}^2}{R_{dc}} \cdot (P_{ac} = P_{dc}) \quad (4)$$

$$P_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{DT} \frac{V_{dc}^2}{R} dt = \frac{V_{dc}^2}{R} D \quad (5)$$

$$D = \frac{V_{ac}^2}{R_{opt}} \frac{R}{V_{dc}^2} \quad (6)$$

3. 실험결과

그림 3은 제안된 가변부하 시스템 및 파력발전 시스템을 보여준다. 가변된 부하 시스템은 그림 3의 우측 시스템 상단부에 위치하여 제어를 하게 되며, 시스템 파라미터는 표 1과 같다. 실험은 지상 수조실험과 해상 실험을 통해 시스템의 성능을 확인하였다.

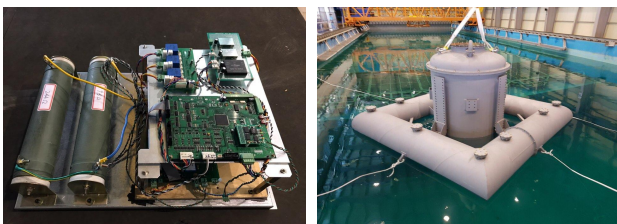


그림 3 가변부하 장치 및 파력발전 시스템
Fig. 3 Variable load and wave power generation system

표 1 파력발전 시스템 파라미터
Table 1 Parameters of wave power generation system

Mass	250kg	Total mass	4300kg
kt	267N/m/s	R	2.4Ω
load R	20Ω		
	모드 1	모드 2	모드 3
$C(Ns/m)$	887	417	345
$k(Nm)$	2024	20240	56220
$\omega_n(rad/s)$	1.5	3.8	6.2

지상 수조 실험의 조건은 0.2Hz에서 1Hz로 파도의 주파수를 가변시켰으며, 진폭은 약 200mm~400mm로 하였으며, 파도 주파수가 커질수록 진폭의 조건은 감소한다. 그림 4는 표 1에서 모드 2에 해당하는 조건으로 고유주파수 0.6Hz에 맞춰 실험한 결과로써 전력, 동기 발전기의 회전속도, 하우징의 가속도, 질량의 변위 등을 보여준다. 각 주파수에 따른 실험 결과는 표 2를 통해 볼 수 있으며, 결과 값은 평균 전력이다. 모드 2의 실험 조건으로 고유 공진 주파수인 0.6Hz에서 최대전력이 생산되는 것을 볼 수 있다. 또한, 불규칙적인 파도의 주파수와 진폭을 가지는 해상 실험을 통해 약 평균적으로 40~50W의 전력을 생산하는 것을 확인하였다.

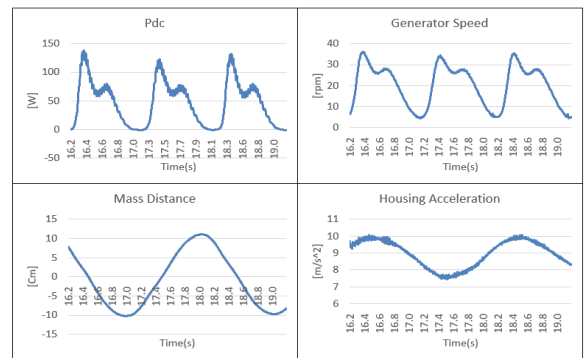


그림 4 파력발전 시스템 성능(파도 주파수 0.6Hz, 진폭 200mm)
Fig. 4 System performance(wave frequency 0.6Hz, amplitude 200mm)

표 2 파도주파수에 따른 전력
Table 2 Power according to wave frequency

주파수(Hz)	전력(W)	주파수(Hz)	전력(W)
0.2	0.24	0.3	4.9
0.4	26.8	0.5	29.6
0.6	46.6	0.7	26.1
0.8	1.3	0.9	0.25

4. 결론

본 논문은 파력발전 장치의 최대 전력 운전을 위한 가변 부하 시스템을 구현하고 해상 및 육상 실험을 통해 검증하였다. 파력 장치는 가변 스프링, 댐퍼, 질량, 동기발전기, 가변 부하 시스템 등으로 구성되었으며, 동기발전기는 최대 출력을 발생시킨다. 파도 조건에 따라 달라지는 부하의 크기는 최적부하계산 알고리즘을 통해 선정되었으며, 제안된 부하 시스템을 통해 부하의 크기를 가변시켰다. 파력발전 장치는 수조 장치를 통해 파도 진폭의 크기(200mm~600mm)와 주파수(0.2Hz~1Hz)를 가변시켜 발전된 전력을 비교 분석하였으며, 해상 시험을 통해 시스템의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

[1] Ki Bong Han and Hyoung Woo Lee, "The research of wide band vibration energy harvester using ocean wave", journal of the Korean society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 6 pp. 596-602, 2013
[2] 이현석, 오진석, "방파제 부착형 파력발전시스템의 터빈설치 방법에 따른 출력특성에 관한 연구, 한국해양공학회지 제 29권 제 4호, pp. 317-321, 2015년 8월