한국항해항만학회지 제33권 제6호, pp. 381~385, 2009 (ISSN-1598-5725)
Journal of Navigation and Port Research

해양시설물용 하이브리드 발전시스템 설계

정성영* · 오진석†

* 한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 선박전자기계공학부

A design of Hybrid power generation system for Ocean facilities

Sung-Young Jung · Jin-Seok Oh†*

* *Granduate school, Division of Mechatronics Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*
† *Professor, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

요 약 : 일반적으로 해양 시설물은 대부분 태양광 기반의 발전 시스템으로 구성된다. 태양광 발전 시스템은 날씨의 광량에 따라 변화한다. 태양광 발전 시스템은 흐린 날과 비오는 날에 전력 생산량이 감소한다. 태양광 발전량이 부족해지면 해양 시설물에 전력 부족이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문은 태양광과 파력 시스템을 복합한 하이브리드 발전 제어 시스템을 제안한다. 파력 발전 시스템은 웰스 터빈과 영구자석 발전기로 구성되어 있다. 제안하는 시스템을 특별한 지역에 설치하고 태양광 발전 전력과 파력 발전 전력을 측정하였다. 실험결과 태양광 전력은 파력에 비하여 안정적인 전원이다. 그러나 파력은 태양이 없는 동안에도 전력을 공급할 수 있다. 제안하는 하이브리드 시스템의 전력 특성이 태양광 시스템에 비하여 높은 안정성을 갖는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 부표, 하이브리드 발전, 파력 발전, 웰스 터빈, 태양광 발전, 해양 시설물

Abstract : *Generally power system of ocean facility composes a solar generation system.The power to be generated by the solar system is changed according to the amount of sunlight of weather conditions. Output power of solar system is decreased with weather condition such as cloudy day and rainy day. And the power shortage of the ocean facility can occur due to the lack of solar energy. To solve this problem, this paper proposes the power control system for solar-wave hybrid system. Wave generation system consists of wells turbine and permanent magnet synchronous generator(PMSG). This propose system set the specific area and measures the solar generation power and wave generation power. As a result of experiment, the solar power is a more static source than wave power, but the wave power provides energy during periods of no sunshine. The power characteristic of propose hybrid system have been obtained high reliability than a solar generation system.*

Key words : *Buoy, Hybrid generation, Wave power generation, Wells turbine, Solar power generation, ocean facilities*

1. 서 론

최근 환경 보호 및 기존 에너지 자원의 부족으로 인해 자연에너지를 이용한 대체에너지원 개발 방안이 강조 되고 있다. 대체에너지를 이용한 기술은 전력을 공급하기 어려운 해상이나 산간오지에 사용되고 있다. 해상 교통안전을 위해 설치되는 해양 시설물인 부표는 야간이나 안개 등의 해상 시야 확보가 어려운 상태에서 선박의 안전 항해를 돕기 위해 운영된다. 따라서 악천후 상태에서도 안정적인 전원 공급이 필요하다. 현재 국내에서 운영되고 있는 각종 항로 표지물들은 태양광을 이용한 독립형 전력 시스템이 대부분이다(Jo, 2007).

태양광 발전 시스템은 설치 제약 조건이 적어, 한국에서 가장 손쉽게 발전할 수 있는 대체 에너지원으로 많은 분야에 보급되어 있다. 하지만 해상에서는 육상과 달리 관리가 어렵고, 염분이나 조류의 배설물 등으로 인해 육상에 비해 발전율이 낮아지는 단점을 가진다. 또한 계절적, 기후적 요인인 장마, 태풍 등으로 인해 흐리거나 비가 오는 날은 태양광 발전량이 낮으므로 해양시설물의 전력 부족 현상을 초래하여, 안전성을 위협한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 조류 방지봉을 설치하여 조류의 접근을 막거나, 태양전지판 각도를 조절하는 등의 방안이 제시되고 있지만, 계절적, 기후적 요인에 의한 문제 해결책은 미비한 실정이다(해양수산부, 2006).

본 논문에서는 흐리고 비가 오는 날 태양광 발전량이 낮아지는 문제점을 보완하기 위하여, 태양광과 파력 발전 시스템을 결합한 하이브리드 형태의 발전 시스템을 제안한다. 본 연구에서는 이러한 하이브리드형 발전 시스템의 발전 특성을 실험을 통하여 검증하였다.

2. 파력 발전

2.1 해양 시설물용 파력 발전 구조

파력 발전 장치는 파랑이 가진 운동에너지를 기계적 에너지로

* 정회원, whswo85@nate.com 051)410-4866
† 교신저자 : 오진석(정회원), ojs@hhu.ac.kr 051)410-4283

변환하는 방식에 따라 분류된다. 대표적인 것으로는 수면에 떠 있는 부체를 파랑의 운동에 의하여 상하 또는 회전운동을 하도록 하여 발전기를 회전시키는 가동 물체형, 파랑의 작용에 의하여 공기가 압축·팽창될 때 발생하는 공기의 흐름으로 터빈을 돌려 발전하는 진동 수주형, 수중에서 파랑의 수압 변동을 흡수하여 공기나 물의 흐름으로 변환하는 수압 변형형이 있다. 본 논문의 실험에 사용된 진동 수주형은 가장 효율적인 에너지 흡수 방식으로 알려져 있어, 파력 발전 장치에 가장 많이 채택되어 사용된다(Cho, 2002).

진동 수주형 파력 발전은 파랑에 의해 진동하는 수면을 물체로 생각하여, 수면의 왕복운동으로부터 공기의 흐름을 만드는 것이다. 특히 입사파의 주파수가 공기실의 고유 주파수와 일치하면 공진 현상으로 공기실내의 수면의 상하 운동을 크게 증폭시켜 에너지 효율이 극대화된다. 공기실 내의 증폭된 수면의 상하 운동에 의해서 발생된 공기실의 변동압력은 공기실 상부에 설치된 2차 변환장치인 공기 터빈을 회전시켜 전기 에너지를 얻는다.

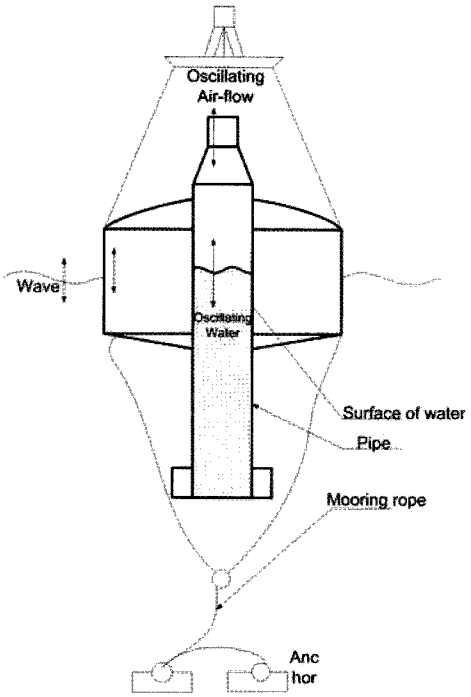


Fig. 1 Outline of navigation buoy

해양시설물인 부표에 설치된 파력 발전 시스템은 Fig. 1과 같은 구조를 갖는다. 부표 중앙의 공기실에 수주(水柱)를 두는 형태로, 공기실 상단에 Wells 터빈을 위치시켜 발전하는 형태로 구성된다. 공기실의 수주가 파도에 의하여 상하로 움직이면, 이러한 움직임에 따라 공기실의 공기가 상하로 움직이고, 공기의 움직임이 상층부의 터빈을 동작시켜 발전이 이루어지도록 구성하였다(Brito-Melo, 2002).

파고 및 주기가 변화하는 부표의 움직임에 따라 공기실의 수주가 변화하면서 발생하는 공기의 흐름에 따라 상부의 터빈이 회전하게 된다.

2.2 파력 발전 시스템 구조

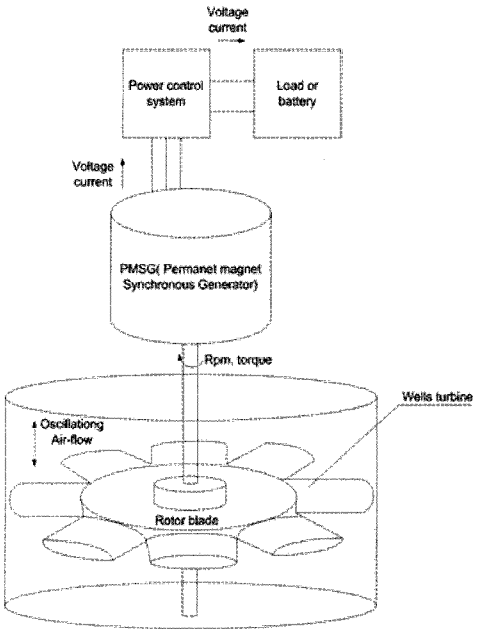


Fig. 2 Schematic of Wells turbine

Fig. 2은 Wells터빈의 발전부 구성을 나타낸 것이다. 발전 시스템은 발전 터빈과 발전기로 구성된다. 발전기의 경우 영구자석형 동기 발전기를 사용한다. 영구자석형 동기 발전기는 소형 풍력 발전 시스템에도 주로 사용된다. 일반적인 소형 풍력 발전 시스템과 달리 Wells터빈을 이용한 파력 발전 시스템은 높은 속도로 구동하기 때문에 터빈과 발전기 사이에 기어 box를 이용한 증속기가 없는 형태로 구성된다.

Wells 터빈은 입력되는 유량 및 주파수에 따라 출력 특성이 변화하게 되며 이러한 출력 특성 변화에는 터빈상수 C_t가 작용하여 동일한 입력 상에서도 출력 값이 변화하게 된다. 터빈 출력값은 식 1와 같은 형태로 구성된다(Cho, 2002; Brito-Melo, 2001; Anand, 2007; Setoguchi, 2003).

$$P_{gp} = \frac{1}{2}\rho_t C_t(\lambda) A_t V_t^3 = \omega T \tag{1}$$

이때 P_{gp}는 터빈에서 출력되는 전력이고 발전기에 입력 되는 기계적 출력이다. ρ_t는 터빈의 비중량, $C_t(\lambda)$는 주속비에 따른 터빈의 출력 상수를 나타낸 것이다. 이는 공기 유량이 동일하더라도 터빈 상수(C_t)가 터빈의 회전 속도에 따라 변화하게 된다. A_t는 터빈의 회전 면적, V_t^3 터빈에 미치는 풍속을 나타낸 것이다. w는 각 속도이고 T는 출력 토크를 나타낸다. 발전기는 영구자석 동기 발전기 임으로 발전기의 출력 전압은 식 (2)과 같다.

$$V(emf) = B\ell v \tag{2}$$

$V(emf)$는 발전기에서 유기되는 기전력(발전 전압), B는 자속, ℓ은 자속이 쇄교 되는 코일 길이, v는 발전기의 회전 속

도이다. 영구자석 동기 발전기에서 자속이 쇄교되는 코일의 길이는 고정된다. 그러므로 유기 기전력은 속도 v에 비례하게 된다. 발전기와 터빈이 직접 연결되어 있으므로 발전기의 회전 속도와 터빈의 회전 속도는 동일하다. 발전기의 전압은 발전기의 속도에 비례하고 발전기의 발생전류는 토크에 비례하게 된다.[7] Power controller는 PMSG(Permanent magnet synchronous motor)에서 생산되는 교류 전압을 직류 전압으로 변환 하는 정류기를 포함하고 있다. 직류로 변환된 전력은 축전지에 충전하거나 부하를 동작시키는데 사용한다.

일반적으로 단상 발전기의 출력 전압 $v(=\sqrt{2}\,Vsin\Theta)$가 단상 전파 정류 회로를 통하여 직류 전압으로 변화 될 때 직류 전압 e_d의 평균치 E_{ad}는 식 (3)과 같다.

$$E_{ab} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} e_d d\Theta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \tag{3}$$

또한, 3상 발전기 출력을 3상 전파 정류 회로를 거쳐 직류 전압으로 변환할 경우 선간 전압을 V_L이라고 하면 평균 출력 전압 E_{3ad}는 식(4)와 같다(suk, 2009).

$$E_{3ad} = 1.35\,V_L \tag{4}$$

본 연구에서는 3상 파력 발전기와 태양광 발전 시스템을 연동한 하이브리드 발전 체계를 구축하여 실험을 수행하고자 한다.

3. 실험 시스템 구성

3.1 하이브리드 발전 구조

하이브리드 발전 체계는 태양광 발전 시스템과 파력 발전 시스템의 발전량을 효율적으로 축전지에 충전하기 위한 제어 시스템이다. 태양광 발전 제어 시스템은 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 충전 제어기로 구성되어 있다. 하드웨어 적으로 일반적으로 많이 사용되는 Buck converter구조로 되어 있다 (Jo, 2007; Fanney, 2006).

파력 발전 제어 시스템은 파력 발전 전압이 일정 전압 이상일 때 축전지로 충전을 수행한다. 파력 발전 전압은 출력 전력의 맥동이 크기 때문에 출력 제어기가 일정 전력량으로 유지되도록 출력량을 조절하여 충전한다.

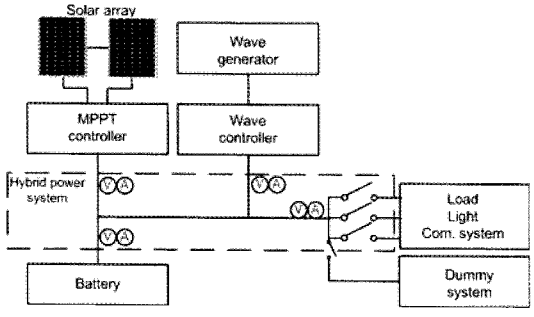


Fig. 3 Hybrid power system of buoy

하이브리드 전력 제어기는 태양광 및 파력 발전에서 발생되는 전력량을 제어하고 각 부하 시스템에 공급되는 전력량을 제어한다. 축전지는 일정 전압 범위를 유지해야하므로, 더미 회로 등을 통하여 과잉 발전 전력을 소모하여 축전지를 보호한다. Fig. 4는 하이브리드 제어 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 제어 시스템은 크게 3개의 파트로 나누어진다. 주제어기, 측정 보드, 하이브리드 파워 스위치이다. 하이브리드 파워 스위치는 MosFET과 다이오드로 구성되며 주제어기의 신호에 따라 축전지를 충전하거나 부하에 전원을 공급하는 동작을 수행한다. 측정 보드는 홀센서를 이용하여 전류를 측정하고 분압회로로 전압을 측정하여 A/D converter를 통하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. 주제어기는 측정 모듈의 측정된 값을 SPI 통신을 통하여 수집하고 하이브리드 파워 스위치를 제어 한다. 또한 태양광 MPPT제어기와 wave power control system과는 CAN통신을 통하여 시스템의 정상 동작 상태를 파악하여 RS-232c통신을 통하여 RF-modem으로 현재 상태를 전송한다.

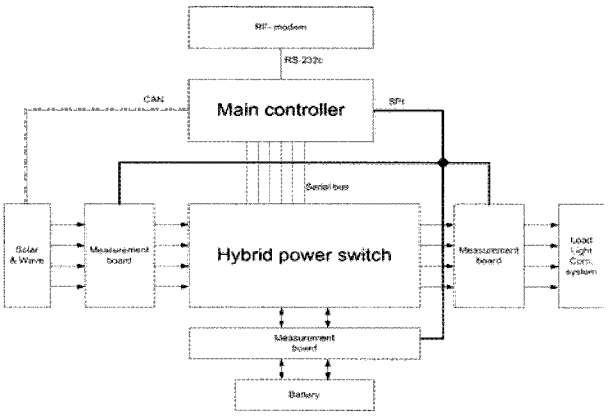


Fig. 4 Hybrid control system of buoy

Table 1은 하이브리드 전력 시스템의 구성 사양을 나타낸 것이다. 해상의 부표는 파도에 의하여 회전하기 때문에 태양전지판을 평면상에서 180° 방향으로 설치하여 부표가 회전하더라도 최소한의 발전이 가능하도록 하였다. 태양전지판과 파력 발전기의 사양의 최대 생산 전력량을 나타낸 것이다. 부표의 전체 전원은 12V로 2V 축전지 6개를 직렬 연결한 형태로 구성된다.

Table 1 Specifiactions of Hybrid power system

Item	Details
Battery	2V200AH * 6EA
Solar panel	80W * 2EA
Wave generator	80W * 1EA
Lamp	30W LED lamp
Power Switch	MosFET(IRFP150A) Diode(FEP30JP)
Main controller chip	PIC18F4585
RF-communication modem	2.4GHz(RF), RS-232c

3.2 모니터링 시스템

Fig. 5는 하이브리드 발전 모니터링 시스템을 나타낸 것이다. 하이브리드 시스템에서 태양광과 파력 발전에서의 전력량을 계측하여 이를 통신으로 육상까지 연결하여 실험을 수행하였다. 육상 시스템은 바다에서 육상 까지 RF-modem을 이용하여 무선 통신을 하고 육상에서 실제 모니터링 위치까지는 TCP/IP제어기를 이용하여 LAN을 통한 통신을 수행하였다. 파력 발전 시스템과 태양광 발전 시스템의 발전량을 1분당 1번씩 계측하여 발전 특성을 실험하였다.

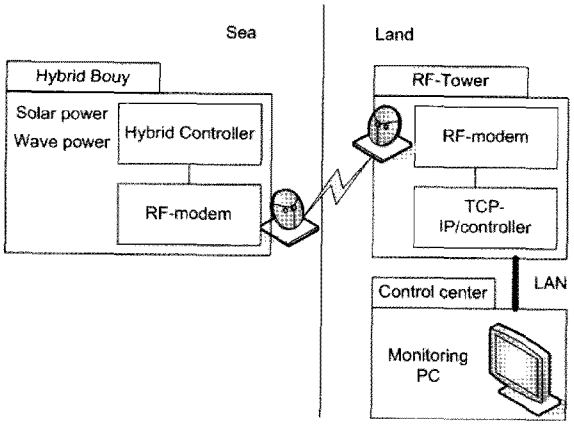
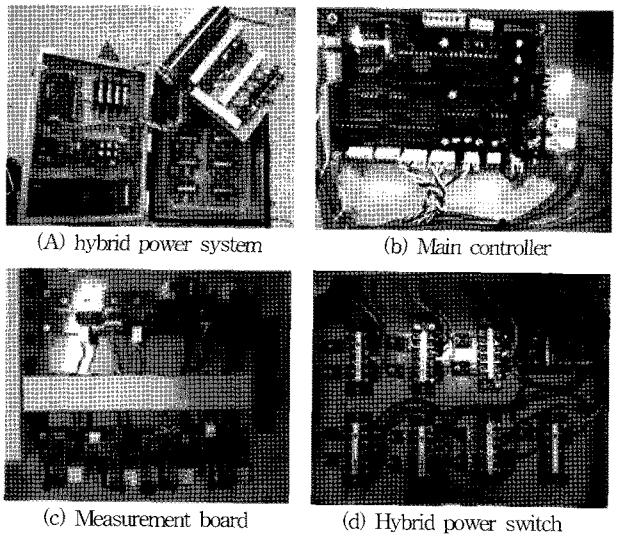


Fig. 5 Hybrid monitoring structure

제어 센터의 모니터링 PC는 부표에서의 데이터를 측정하여 발전 전원의 전압, 전류 값과 축전지의 충전 전압, 방전 전압, 전류, 현재 전력 스위치의 상태 등을 텍스트 파일 형태로 저장한다.

4. 실험결과

하이브리드 전력 시스템을 Fig. 6과 같이 제작하였다. (A)는 전력 제어 시스템의 전체 사진을 나타낸 것이고 (B)~(D)는 전력제어기의 각 부분을 나타낸 것이다. 전력 스위치는 함체를 냉각 핀의 형태로 사용하도록 구성하였다.



(A) hybrid power system (b) Main controller

(c) Measurement board (d) Hybrid power switch

Fig. 6 Hybrid power controller for buoy

Fig. 7은 하이브리드 전력 제어 시스템을 탑재한 하이브리드 부표와 파력 발전기의 사진이다. 실제 하이브리드 부표를 한국해양대학교 앞바다에 설치하여 발전 특성을 실험 하였다. 실험 장소는 부산 외항 쪽으로 하여 파력 발전과 태양광 발전이 복합한 하이브리드 발전의 특성을 실험하였다. 파력 발전기는 하이브리드 부표 중앙에 설치되어 있는 것을 볼 수 있다.

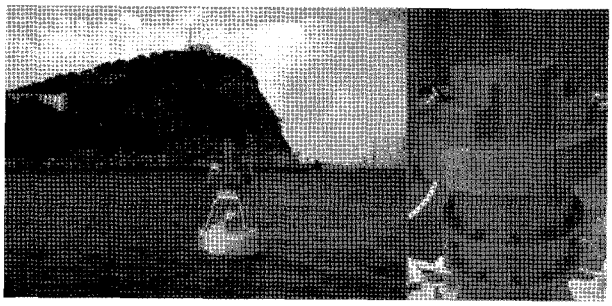


Fig. 7 Hybrid buoy(Left: Buoy, Right: Wave Generator)

Fig. 7에 하이브리드 부표 상부의 상자는 무선 모뎀이고, 무지향성 안테나를 통하여 육지와 통신을 수행한다. Fig. 8은 육지의 안테나 시스템과 제어 부의 모니터링 PC의 제어 화면을 나타낸 것이다. 모니터링 프로그램은 현재 부표에서 보내오는 측정값을 표시하고 이를 텍스트 형태로 저장한다.

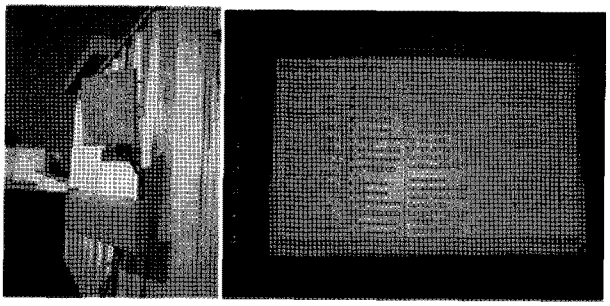
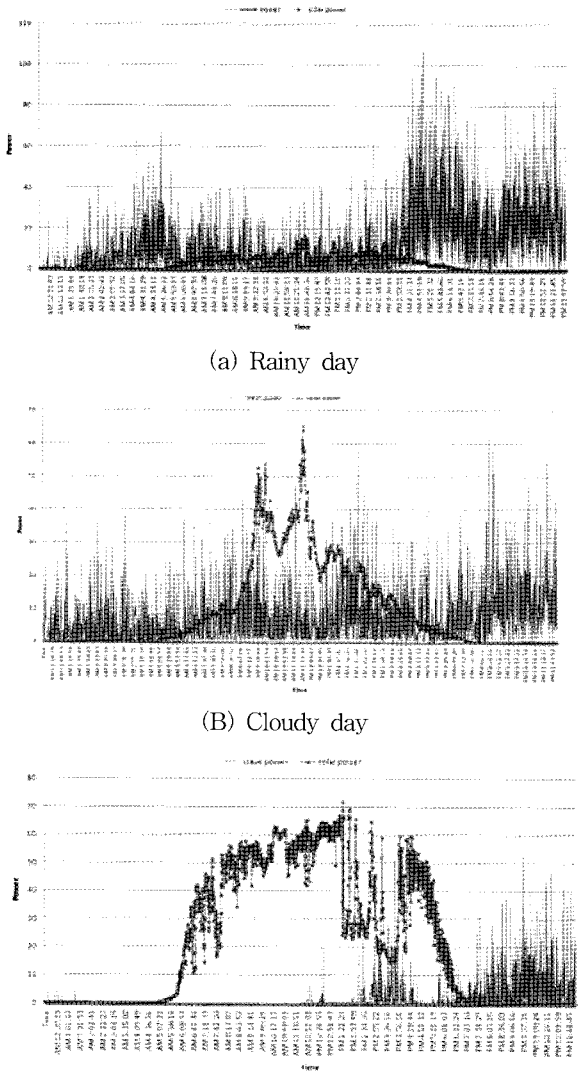


Fig. 8 Monitoring system (Left : antenna on shore Right : monitoring program)

Fig. 9는 모니터링 프로그램에서 수집한 텍스트 형태의 데이터를 그래프로 처리한 것으로, 4월 15일(맑은날)과 4월 16일(흐리고 비오는 날)날의 데이터를 나타낸 것이다. 태양광 발전에 의한 전력량은 Fig. 9 위의 그래프에서 나타내는 것과 같이 맑은 날 파력 발전에 비하여 태양광이 발전량이 크고 흐리고 비오는 날의 경우 태양광의 발전량은 적고 파력 발전에 의한 발전량은 큰 것을 알 수 있다. 즉 파력 발전과 태양광 발전이 서로 상반 되는 자연환경에서 발전을 하는 것을 알 수 있다. 태양광의 경우에는 태양이 있는 낮에만 발전이 가능한 반면 파력 발전의 경우 파도만 있으면 언제든지 발전이 가능한 것을 알 수 있다. 현재의 파력 발전기의 경우 생산 전력량의 변화가 매우 큰 것을 알 수 있다. 실험 결과 태양광 발전만 있는 경우에 비하여 하이브리드 발전을 하는 경우 전체 생산 전력량이 5-40%정도 높은 것을 알 수 있다.



(a) Rainy day

(B) Cloudy day

(C) Sunny day

Fig. 9 Hybrid power system of buoy data

5. 결 론

본 논문은 태양광 발전기반의 부표 발전 시스템이 흐리고 비오는 날에 발전량이 적어져서 해양 교통 시설물에 영향을 주는 것을 막기 위하여 태양광과 파력 발전 시스템을 결합한 하이브리드 형태의 발전 시스템을 제안한다. 파력 발전 시스템으로 웰스터빈 형태의 파력 발전 장치를 부표에 설치하였다.

실험을 통하여 파력 발전이 태양광 발전과 반대의 환경 상황에서 발전이 되는 것을 알 수 있었다. 즉 태양이 뜨지 않는 흐린 날의 경우 파력 발전으로 부표에 전력을 공급할 수 있음을 확인하였다. 현재 부표의 축전지용량은 부조일(태양이 뜨지 않는 흐린날)에도 등명기 등의 부하를 동작시키기 위하여 크게 산정되어 있다. 하이브리드 발전을 할 경우 부조일에도 전력 생산이 가능하기 때문에 축전지 용량을 작게 할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 통하여 축전지의 수리 및 교체가 용이해지고 부하 시스템에 안정적인 전력을 공급할 수 있을 것으로 예상된다. 앞으로 해상환경에서의 파력 발전 시스템의 효율 증대, 파력 발전량의 맥동을 저감하는 방법에 관한 연구를 하는 것이 과제로 남아 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 "해양시설물용 Hybrid 전력생산시스템 기술 개발" 의 지원으로 작성됨. 또한 영국 협의회의 PMI 2에 지원으로 작성됨.

참 고 문 헌

[1] 해양수산부(2006), 항로표지 기능 향상 개선 방안 및 업무 편람 개정 연구 용역에 관한 최종 보고서.

[2] Anand, S., Jayashankar, V., Nagata, S., Toyota, K., Takao, M., and Setoguchi, T. (2007), "Turbines for wave energy plants", Proceedings of the 8th international symposium on experimental and computational aerothermodynamics of internal flows lyon, pp. 1-7.

[3] Brito-Melo, A., Gatio, L.M.C, and Sarmento, A.J.N.A. (2001), " Analysis of Wells turbine design parameters by numerical simulation of the OWC performance", Jurnal of the ocean engineering, vol. 29, pp. 1463-1477.

[4] Cho, I. H. (2002), "Wave Energy Absorption by a Circular Cylinder Oscillating Water Column Device", Journal of the korean society of coastal and Ocean Engineers, Vol 14, No1, pp. 8-18.

[5] Fanney, A. H. (2006), "Comparison of Photovoltaic module performance measurement", Journal of the american society of mechanical engineers, vol. 128, pp. 152-159.

[6] Jang, S. H., Park, H. G., Lee, D. C., and Kim, H. G. (2009), "Sensorless control of PMSG for Small wind turbines", Journal of the transactions of the korean institute of power electronics, vol. 14, No. 1.

[7] Jo, K. J., Yoo, H. H., Gug, S. G., Oh, J. S. (2007), "Design and analysis of power system for buoy", Journal of the korean Navigation and port Research, Vol. 31, No. 3, pp. 229~233.

[8] Setoguchi, T., and Takao, M. (2003), "Present State of self-Rectifyling air turbines for wave energy conversion", Proceedings of the korean Fluid Machinery association 2003 conference, pp. 3-12.

원고접수일 : 2009년 6월 15일
심사완료일 : 2009년 8월 21일
원고채택일 : 2009년 8월 31일