

해양 시설물용 소형 파력발전 전력제어기 개발

조관준¹ · 오진석[†]

(원고접수일 : 2011년 4월 4일, 원고수정일 : 2011년 6월 29일, 심사완료일 : 2011년 8월 22일)

Development of Small Wave Power Controller for Ocean Facilities

Kwan-Jun Jo¹ · Jin-Seok Oh[†]

요 약 : 해상에서 운영되는 해양 시설물용 파력 발전시스템은 대용량 계통 연계형으로 개발되어 왔다. 그러나 등부표용 파력 발전시스템에는 소용량의 발전시스템이 운영 측면에서 효과적이다. 소형 파력 발전의 경우 단순히 전파 정류하여 축전지에 충전하는 방식(직결 방식)을 주로 사용한다. 본 논문에서는 소형 웰스 터빈의 발전 특성을 고려하여 부스터 컨버터 기반의 파력 발전전력제어기를 개발하였다. 직결 방식과 부스터 컨버터 방식의 제어기를 설계하고, 실험을 통하여 그 특성을 비교하였다. 실험 결과 제안하는 제어기가 발전기의 출력전압이 낮은 구간에서 출력특성이 개선되었다.

주제어 : 파력 발전, 축전지 전원 시스템, 해양 시설물, 부스터 컨버터, 웰스 터빈

Abstract: Wave power generation systems operated in the ocean, has been developed as large power and grid power connection systems in general. However, small wave power generation systems offer operational efficiency for the lighted (navigation aids) buoy. They simply adopts a full-wave rectification for charging battery (direct connection method). In this paper, a wave power controller based on a booster converter is developed by considering a characteristic of the wells turbine.

Both direct connection and booster converter power controller is designed and tested to compare the characteristics. Experiments demonstrate that the output of the proposed controller has improved the characteristic of output power, when generator output voltage is low.

Key words: Wave generation, Battery power system, Ocean facilities, Booster converter, Wells turbine

1. 서 론

최근 미래 에너지원의 다양한 개발 및 환경문제 등을 해결하고, 무공해 에너지원 확보를 위한 각종 자연 에너지 이용기술의 개발이 추진되고 있다. 우리나라는 파력을 이용한 발전 가능성이 매우 높은 환경을 가지고 있다[1].

해양 시설물에 활용되는 파력 발전시스템의 경우 대용량 파력 발전시스템과 달리 가격과 제어의 용이성이 중요하지만, 발전량이 상대적으로 적기 때문에 전력 변환 효율을 높이는 것이 중요하다.

또한 해상 환경의 특성을 고려할 때 적은 양이라도 지속적으로 발전되는 것이 필요하다[1].

본 논문에서는 위와 같은 특성을 고려하여 소형 해양 시설물에 적합한 파력 발전 전력시스템을 제안하고자 한다. 이를 위해 정류단과 부스터 컨버터를 적용한 전력제어기를 제안하고, 출력특성을 실험하였다. 파력발전 시뮬레이터를 이용하여 직결방식과 제안하는 방식의 효율을 비교하여 제안하는 방식의 효율성을 확인하고자 한다.

[†] 교신저자(한국해양대학교 기관공학부, E-mail: ojs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4283)

¹ 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과

2. 해양 시설물용 파력 발전시스템

2.1 해양 시설물용 파력 발전시스템

해양 시설물용 복합 발전시스템은 태양광과 파력 발전을 복합한 형태의 발전시스템으로 **Figure 1**과 같다. 이중 파력 발전시스템은 진동 수주형 구조를 갖는다. 진동 수주형 구조는 파도의 움직임에 따라 등부표가 움직이게 되고, 등부표와 등부표 내부의 수주가 상대적인 움직임을 통하여 내부의 공기를 압축하거나 팽창시킨다. 이러한 동작을 통하여 상부에 있는 웰스 터빈에 공기가 유입되거나 유출되도록 하여 터빈을 구동시킨다. 소형 진동 수주형 발전기의 경우에는 영구 자석형태의 발전기를 이용하여 터빈과 직결 연결하여 발전하는 구조이다[1-2].

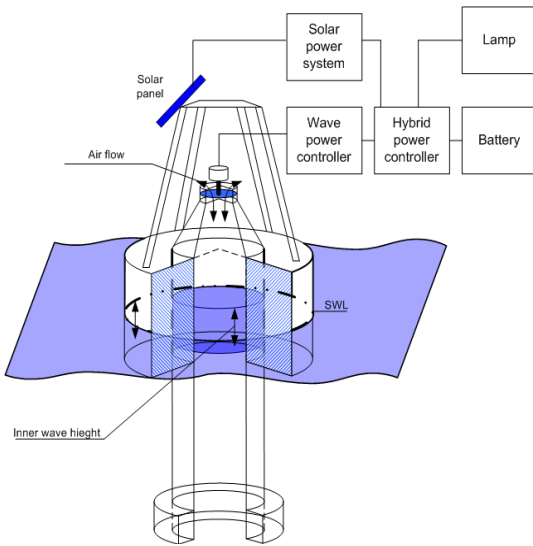


Figure 1: Outline of a hybrid power buoy

진동 수주형 파력 발전 터빈은 웰스 터빈을 이용한다. 일반적인 터빈은 유체흐름이 한쪽 방향으로 작용하지만 웰스 터빈의 경우 바람의 방향이 양쪽으로 변화하는 곳에 사용된다.

웰스 터빈은 터빈의 특성상 유입되는 바람의 방향이 변화하더라도 한쪽 방향으로 회전한다. 회전 방향은 날개의 기하학적 형상에 따라 결정된다. 웰스 터빈에서 출력되는 기계적 출력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 $P_{available}$ 는 기계적으로

이용할 수 있는 에너지, η 는 웰스 터빈 회전자의 출력 계수이고 ρ_a 는 공기 밀도, u 는 덕트 내의 유속, A_d 는 블레이드의 단면적이다.

$$P_{available} = 0.5\eta\rho_a u^3 A_d \quad (1)$$

터빈 블레이드의 회전 면적과 공기 밀도가 일정하면 회전자의 출력 계수는 주속비에 따라 최대 전력 값이 된다. 주속비는 터빈의 블레이드의 선단 속도와 풍속의 비율로 터빈 속도와 유입되는 유속의 비율을 나타낸 것이다.

식 (1)은 일반적인 풍력 발전기의 출력 수식과 유사하다[2-5]. 그러나 일반적인 풍력 발전과 달리 웰스 터빈은 초기 기동시 및 저속에서 출력이 좋지 못하다. 웰스 터빈의 경우 주속비가 낮은 경우에 웰스 터빈의 출력 계수가 낮기 때문에 출력이 좋지 못하다. 일반적인 풍력 발전은 저속에서도 어느 정도의 효율을 갖지만 웰스 터빈은 저속에서 효율이 낮은 단점이 있다. 그러므로 웰스 터빈의 출력 제어 시에 이러한 특성을 고려한 속도 제어 및 출력 제어가 필요하다.

2.2 해양 시설물 전력시스템

해양 시설물의 전력시스템은 태양광, 파력, 풍력 등의 여러 전원을 복합한 형태이다. 다양한 형태의 직류 전원을 복합하고, 축전지의 역전류 등을 방지하기 위해 해양 시설물 복합 발전 전력제어기는 다이오드와 다양한 전력 스위치로 구성된다.

Figure 2는 복합 발전시스템의 구성을 나타낸 것이다.

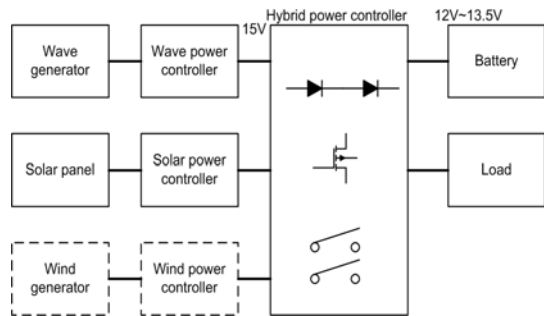


Figure 2: Block diagram of hybrid power system

축전지의 전압은 12V에서 13.5V의 전압을 유지한다. 복합 발전 전력제어기 내부에 여러 개의 다이오드와 전력 스위칭 소자의 전압 강하 등을 고려할 때(1.5V) 파력 발전 전력제어기의 출력 전압은 15V 이상이 되어야 충전이 가능하다. 파력 발전 시스템에서 복합 발전 전력제어기로 전력을 이동할 때 15V 이하로 공급하면 충전이 되지 못한다. 복합 발전을 하기 위해서는 파력 발전시스템의 출력 전압이 15V를 유지해야 한다.

2.3 파력 발전기용 전력시스템 구조

소형 파력 발전용 전력시스템은 영구자석형 발전기를 이용하기 때문에 유지되는 전압은 파력 발전기 속도에 비례한다. 식 (2)는 일반적인 발전기의 유지 전압에 관한 수식이다. 영구자석 발전기의 경우 회전자의 자속 세기(b) 및 권선 턴수(l)는 결정되어 있다. 그러므로 발전기에 유지되는 전압(E)은 발전기 회전 속도(v)에 비례한다.

$$E = blv \tag{2}$$

일반적인 파력 발전시스템은 수주에 입력되는 파고의 높이에 따라 특성이 변화한다. 웰스 터빈은 최대 6000rpm까지 구동할 수 있도록 되어 있으며, 3000rpm에서 15V의 전압이 유지 된다. 현재 기존의 파력 발전시스템은 발전 전력을 정류하여 바로 축전지에 연결하는 방식이다. 축전지 전압(13.5V)에 복합 발전 전력제어기의 전압 강하분(1.5V)을 포함할 때, 15V이상의 전압이 발전기에서 유지되지 않으면 충전하지 못한다.

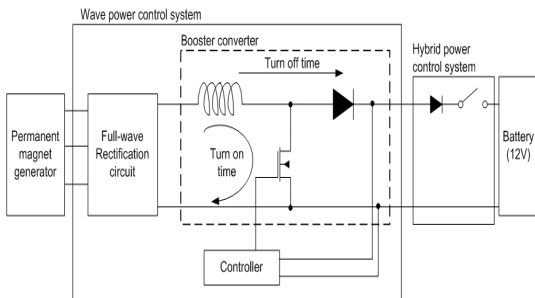


Figure 3: The wave power controller

파고가 낮을 경우 터빈으로 유입되는 공기의 유량이 줄어들어 터빈은 3000rpm 이하에서 구동하게 된다. 그러므로 3000rpm 이하 범위에서 축전지를 충전하기 위해서는 부스터 컨버터를 이용하여 발전 전압을 승압하여 충전하는 방식을 제안한다. Figure 3은 부스터 컨버터 구조의 파력 발전 전력제어기를 나타낸 것이다.

여기서 기계적 출력과 발전 출력의 관계를 수식으로 정리하면 식 (3)과 같다. P 는 터빈의 기계적 출력, τ 는 토크, ω 는 각속도, k 는 에너지 변환 계수, V_{out} 은 발전 전압, I_{out} 은 발전 전류, P_{out} 은 실제 전력제어기에 입력되는 전력이다.

$$P = \tau\omega = kV_{out}I_{out} = kP_{out} \tag{3}$$

식 (3)에서 영구자석 발전기가 일정 속도로 회전한다고 가정하면 $\tau \propto I_{out}$ 의 비례 관계가 성립한다. 또한 축전지에 충전 전압을 $V_{charging}$, 충전 전류를 $I_{charging}$, 부스터 컨버터의 에너지 손실을 P_{loss} 라고 하면 부스터 컨버터의 에너지 전달량을 정리하면 식 (4)와 같다.

$$P_{out} = V_{out}I_{out} = V_{charging}I_{charging} + P_{loss} \tag{4}$$

P_{loss} 를 0이라고 가정할 때 식 (4)는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\frac{V_{charging}}{V_{out}} = \frac{I_{out}}{I_{charging}} \tag{5}$$

부스터 컨버터의 승압 비율에 따라 더 많은 발전 전류(I_{out})가 필요하게 된다. I_{out} 의 증가는 식 (3)에 따라 발전기에 걸리는 토크가 증가하게 된다 [4-5].

3. 전력 제어 알고리즘

파력 발전시스템은 파고에 따라 터빈의 출력이 변화한다. 또한 터빈은 블레이드의 유속에 대한 터빈 속도에 따라 출력이 변화하게 된다. 앞서 보았듯이 터빈의 속도 및 토크는 발전기의 전압 전류

와 밀접한 연관성을 갖는다. 그러므로 발전기 출력 전압, 전류에 따라 파력 발전시스템의 전력량이 변화하게 됨으로 최대 출력을 얻을 수 있도록 발전기의 출력 전압 및 전류를 제어하는 알고리즘이 필수적이다.

기존의 영구자석 발전기에서 사용되는 방식은 터빈의 유속 또는 발전기의 속도를 검출하여 최대 전력을 추종한다. 유체의 전체 에너지에서 기계적 에너지로 변환 되는 에너지의 비율, 즉 터빈의 변환효율을 측정하여 그 값으로 최대 전력을 추적한다. 이러한 방식은 터빈의 변환효율의 오차가 발생할 경우와 장기간 운전 후 기계적 파라미터가 변경 되었을 때 최대 전력 지점을 추종하지 못한다.

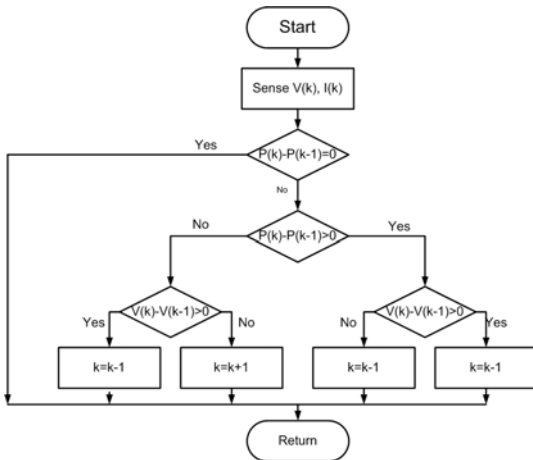


Figure 4: P&O algorithm

발전기의 최대 출력을 제어하기 위해 P&O (Perturbation & Observation) 방식의 최대 전력 추적 기법을 이용하였다. 회전자의 속도와 상전압이 비례하는 성질과 일정 유속에서의 최대 전력 지점이 한 지점만 있는 것을 고려할 때 속도 검출 없이 P&O 제어 알고리즘을 이용하여 최대 전력점을 추종할 수 있다. P&O 제어 알고리즘은 주기적으로 발전기의 출력 전류를 미소 변동시켜 변동 이전의 출력전력과 변동 이후의 출력 전력을 비교하여 최대 동작점을 추종하는 제어 알고리즘이다. Figure 4는 일반적인 P&O알고리즘을 나타낸 것이다[6].

웰스 터빈의 운전 특성상 낮은 속도에서는 효율이 떨어지기 때문에 일정 속도 이상에서 발전하는 것이 효과적이다. 또한 부스터 컨버터를 이용한 방법으로 출력을 제어하기 때문에 매우 낮은 전압에서 승압하게 되면 매우 많은 전류를 발전기 측에 끌어오게 되어 발전기에 많은 토크가 걸리게 된다. 발전기에 많은 토크가 걸리게 되면 발전기의 속도가 떨어지게 되어 발전이 이루어 지지 않는다. 즉 일정 전압 이하에서 부스터 컨버터를 이용하여 발전하게 되면 발전기에 많은 토크가 걸려 발전하지 못한다.

또한 파력 발전시스템의 전력 제어 시스템은 부스터 컨버터를 이용하여 승압하여 축전지에 충전한다. 그런데 파력 발전기의 발전 전압이 낮고 출력 전압이 낮을 경우 부스터 컨버터로 승압을 하더라도 출력단의 전압은 승압되지 못한다. 너무 높은 비율로 승압하게 되면 부스터 컨버터의 손실만 증가하게 된다.

본 논문에서는 최대 전력 추종 기법으로 P&O 알고리즘과 파력 발전시스템의 특성을 반영하여 Figure 5와 같은 알고리즘을 구성하였다. 입력 전압이 낮을 경우 부스터 컨버터를 이용하여 전압을 승압 하지 않도록 한다.

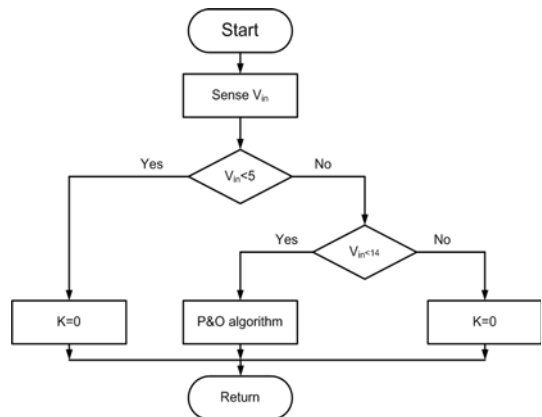


Figure 5: The proposed algorithm

4. 전력 제어 실험

4.1 실험 시스템 구성

진동 수주형 파력 발전시스템을 실험하기 위하

여 진동 수주형 시뮬레이터를 이용하였다. **Figure 6**은 시뮬레이터 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 피스톤 형태의 관의 중앙 관의 위치를 변경하여 진동 수주 내부의 파도를 시뮬레이션 하였다. 진동 수주 앞단에는 웰스터빈 및 발전기를 설치하여 실제 발전을 수행하였다.

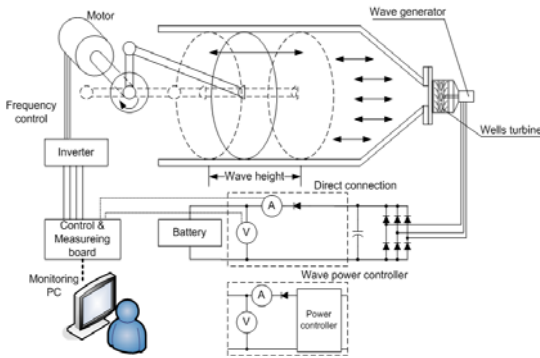


Figure 6: Configuration of simulator

시뮬레이터에 적용한 파도의 주기는 모터를 인버터로 제어 하고 제어 명령은 제어 및 측정 보드에서 수행하도록 하였다. 일정한 주기 및 파고 높이 상황에서 실험을 수행하였다. 파도의 높이는 모터에 연결된 관의 길이를 변경하여 실험을 수행하였다. 제어 및 측정 보드는 실제 발전되는 전압 전류를 계측하여 모니터링 PC에 전송하도록 구성하였다. 직결 방식과 부스터 컨버터를 이용한 방식을 비교하였다. **Figure 7**은 실제 시뮬레이터의 사진을 나타낸 것이다.

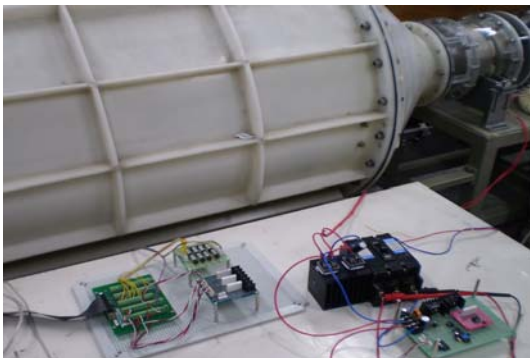
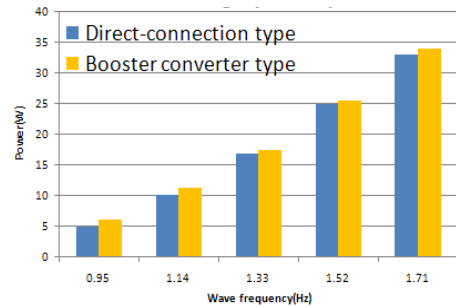


Figure 7: Photograph of simulator

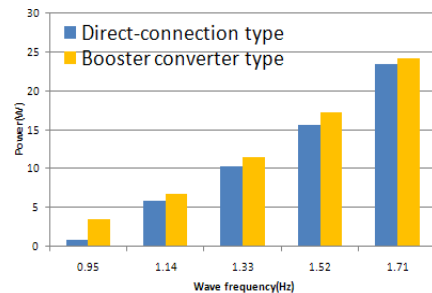
4.2 실험 결과

다음은 시뮬레이터에서의 진동 수주의 폭과 주기의 변화에 따른 직결 방식과 부스터 컨버터를 연결했을 때의 전력량 차이를 나타낸 것이다. 실험 결과는 출력 전력량이 안정화되었을 때의 출력량을 나타낸 것이다. 실험에서 축전지의 용량이 발전되는 용량보다 크기 때문에 충전에 따른 임피던스의 변화는 무시하였다. 정지한 상황에서 전력이 발생되기까지의 전력 생산량을 그래프로 나타내면 **Figure 8**과 같다. 실험 결과 **Figure 8**에서 직결 방식보다 부스터 컨버터를 이용한 경우 3~20%의 출력 전력 증가를 확인할 수 있었다.

파력 발전기의 출력이 높을 경우 출력 전압이 높기 때문에 부스터 컨버터로 승압하는 효과가 없어지게 된다. 그러므로 **Figure 9(a)**에서 보는 것과 같이 직결 방식과 부스터 컨버터 방식의 전력량 차이가 크게 나지 않는다.



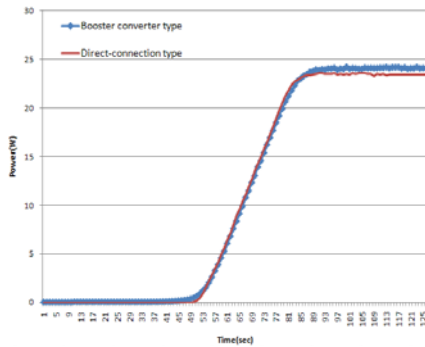
(a) Wave height 700mm



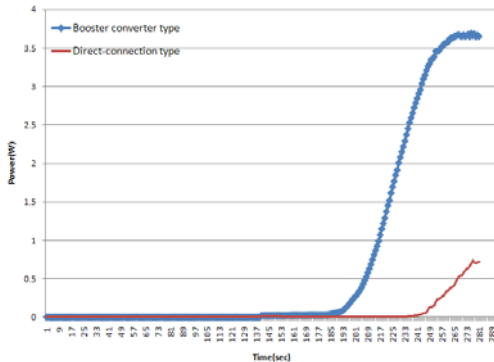
(b) Wave height 600mm

Figure 8: Output characteristics of the wave generation system in different charging method (state time).

그러나 웰스터빈의 출력이 낮을 경우 **Figure 9(b)**에서 보는 것과 같이 부스터 컨버터를 사용한 경우 더 빠른 시간으로 더 많은 전력을 충전할 수 있다. 즉 낮은 발전량을 유지할 경우 파력 발전 전력 제어기를 사용하는 것이 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.



(a) Wave height 700mm, Wave frequency 1.52Hz



(b) Wave height 600mm, Wave frequency 0.95Hz

Figure 9: Comparison of the generation time and output power

5. 결 론

본 연구는 기존의 파력 발전시스템의 직결 연결 방식과 부스터 컨버터를 이용한 파력 발전 전력 제어 방식을 비교하였다. 일반적인 최대 전력 추종 방식이 아닌 축전지 기반의 전원 체계와 웰스 터빈의 특성을 고려한 제어 방식을 구현하였다.

시뮬레이터에서 실험을 통하여 직결 방식과 부스터 컨버터 방식에 따라 축전지에 충전되는 전력

량 차이를 확인하였다. 실험 결과 터빈의 발전량이 적은 경우 직결 방식 보다 부스터 컨버터를 이용한 방식이 더 높은 출력을 내는 것을 알 수 있었다. 이러한 특성은 불규칙적인 파고의 변화로 낮은 파고가 계속되는 경우에서 파력 발전이 가능하도록 할 수 있을 것으로 생각된다.

앞으로 실제 해상에서의 테스트를 통하여 파력 발전 전력제어기의 효율성을 입증하기 위한 실 해역 테스트에 대한 연구가 계속되어야 한다.

후 기

본 연구는 국토해양부 “해양시설물용 Hybrid 전력 생산 시스템 기술 개발”과 국토해양부의 “해양에너지 전문인력양성사업”의 지원으로 작성됨.

참고문헌

- [1] 해양수산부, “해양교통안전시설물용 Hybrid 전력시스템에 관한 기획 연구”, 2007.
- [2] L. M. C. Gatp and A. F. deO Falcao, “Aerodynamics of the wells turbine”, Internation Journal Mechanical Science. vol. 30, no. 6, pp. 383-395, 1988.
- [3] Toshiaki setoguchi, Manabu Takao, “Present state of self-rectifying air turbine for wave energy conversion”, 유체 기계 연구 개발 발표회 논문집, pp. 3-12, 2003.
- [4] A. Miller, E. Muljadi, and D. S. Zinger, “A variable speed wind turbine power control”, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 12, no. 2, pp. 181-186, 1997.
- [5] 김정재, 송승호, “영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발”, 전력전자학회논문지 제10권 제6호, pp. 610-617, 2005.
- [6] KH Hussion, “Photovoltaic power tacking an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions”, Proceeding of the IEEE, vol. 142, no. 1, pp. 59-64, 1995.

저 자 소 개



조관준(趙琯濬)

1982년 5월생. 2005년 한국해양대학교 선박전자기계공학부 제어 시스템 전공(공학사), 2007년 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사), 2007년~2010년 수중운동체 특화 연구 센터 연구 보조원, 한국 해양 대학교 대학원 메카트로닉스

공학과 박사과정



오진석(吳珍錫)

1960년 3월생. 한국해양대 졸업. 공학박사, 일본 큐슈대학 대학원 졸업(공학박사), 1983년~1986년 영국 ZODIAC 선박회사엔지니어. 1989년~1992년 국방과학연구소 연구원. 1996년~현재 한국해양대학교수. 2001년~2002년 영국

CARDIFF대학 교환 교수, 2002년~2009년 중소기업산학협력단 단장, 2004년~2006년 한국마린엔지니어링학회 기획이사, 2011년~2011년 한국생태환경건축학회 위원장, 2001년~2006년 영국 K.O.Tech. 컨설턴트, 2009년~현재 산학연 ETRS센터 소장, 2009년~2011년 선박전자기계공학부장