

P&O알고리즘을 이용한 조류발전 시스템의 최대출력 제어

문석환¹, 김지원¹, 박병건¹, 김장목[†]

Maximum Power Control of Tidal Current Generation System using P&O Algorithm

Seok-Hwan Moon¹, Ji-Won Kim¹, Byung-Gun Park¹, and Jang-Mok Kim[†]

Abstract

Maximum Power Point Tracking (MPPT) control needs to generate the maximum power of a tidal current turbine. A tidal current speed sensor is required to achieve effective generated power in a tidal current generation system. The most common methods used to achieve such power is the tip speed ratio of turbine and tidal current information. However, these methods have disadvantages, such as expensive installation of the tidal current sensor, parameter errors in turbine design, and different information according to the installed position of the tidal current sensor. This paper proposes a maximum power control scheme using perturb-and-observe (P&O) for tidal current generation system. The proposed P&O MPPT scheme can achieve the maximum power without tidal current sensors and turbine design parameters. The reliability and suitability of the proposed control scheme are proven through simulation and experiment results at the tidal current generation laboratory.

Key words: Tidal current generation system, Maximum power point tracking, P&O

1. 서 론

친환경 에너지에 대한 개발과 수요가 늘어나는 현재의 환경적인 산업 변화에 전기에너지의 생산과 관련하여 다양한 형태의 발전시스템 등이 연구 개발되고 있다. 이러한 환경적인 변화에 근거하여 에너지원 중 하나인 해수의 흐름을 이용한 조류발전은 일정한 해수의 유속과 해수의 밀도가 공기에 비해 상대적으로 높기 때문에 전기에너지의 생산도 크게 얻을 수 있는 전기발전 기술로 알려져 있다. 특히, 우리나라의 경우 삼면이 바다로 이루어져 있으며, 서남해안은 지형적인 특성과 조수간만의 차에 의해 발생하는 조류가 높은 유속을 가지고 있어 조류발전에 유리한 조건을 가지고 있다^{[1][2]}.

조류발전시스템을 구성하기 위해서는 기본적으로 조

류를 기계적 힘으로 받아들이기 위한 터빈부와 전기적인 에너지를 만들어 내기 위한 발전기와 전력변환장치로 구성된다. 최대 출력 에너지를 얻기 위해서는 기본적으로 해수의 유속정보가 필요하며, 이러한 유속정보를 얻기 위해 터빈 주변에 유속센서를 구축하여 구성한다.

조류발전시스템은 태양광 발전시스템, 풍력발전 시스템과 같이 에너지원이 일정하지 않기 때문에 입력을 추종하여 출력을 얻을 수 있는 최대 출력제어 (Maximum power point tracking, MPPT) 알고리즘이 요구된다. 조류발전시스템에 적용할 수 있는 최대 출력제어 알고리즘은 유속정보를 이용하는 최적주속비(Tip Speed Ratio, TSR)를 이용한 MPPT 제어, Look-up 테이블을 이용한 MPPT제어, 그리고 유속정보 없이 출력을 제어하는 P&O MPPT제어 등 최대 출력 제어로 구성할 수 있다. 유속정보를 이용하는 최적주속비를 이용한 방법은 풍력발전시스템에 대해 최대 출력을 얻을 수 있는 일반적인 기술로 터빈의 출력을 최대로 발생시키기 위해 최적주속비를 일정하게 유지시켜 발전기의 속도를 제어하는 방법이다^[3]. Look-up테이블을 이용한 MPPT 방식은 유속별 속도 지령치에 따른 최대과위 곡선을 사전에 실험 혹은 시뮬레이션으로 정보를 얻어 테이블을 구성하여 발전기의 속도를 제어하는 방식이다^[4].

Paper number: TKPE-2017-22-3-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jmok@pusan.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

Tel: +82-51-510-2366 Fax: +82-51-510-0212

¹ Electric Motor Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute

Manuscript received Dec. 2, 2016; revised Dec. 17, 2016; accepted Jan. 10, 2017

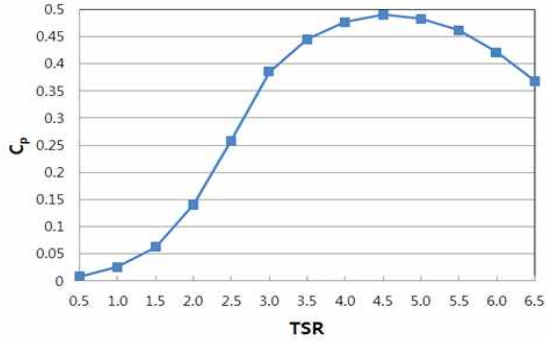


Fig. 1. C_p versus λ characteristic curve.

하지만 위의 유속 정보를 이용하는 방식은 터빈의 특성에 의존하고, 고가의 유속측정 장비가 필요하다. 특히, 유속측정 장비는 고가격의 장비이며, 해수에 존재하는 부유물에 의해 손실이 발생하는 경우가 많으며, 또한 유속측정 장비의 설치 위치 및 거리에 따라 터빈이 받는 유속이 일정치 않아 최적주속비를 이용하여 발전기를 제어할 시 설계 데이터와 많은 차이를 가질 수 있다. P&O MPPT 제어방법은 발전기의 속도가 증가 또는 감소하면 발전 출력이 변화하는 특성을 이용하여 발전량에 따라서 속도를 조정하여 최대 출력점을 제어하는 방법으로 태양광 및 풍력발전 등에서 많이 적용되는 알고리즘이다. 하지만 급변하는 일사량과 풍속에 의해 추종 성능이 저하되어 응답특성이 느리다는 문제점을 가지고 있으나, 조류발전은 일정한 주기로 유속이 흐르기 때문에 이러한 문제점이 나타나지 않기 때문에 유속정보를 이용하지 않는 최대출력 제어 알고리즘으로 적용하기에 적합한 알고리즘이다.

본 논문에서는 조류발전시스템에 적용하기 위한 유속 정보를 이용하지 않는 최대 출력 제어 알고리즘을 제안하고, 제안한 최대 출력 제어 알고리즘의 검증을 위해 시뮬레이션 및 조류발전시스템 실증시험을 통하여 제안한 알고리즘의 타당성 및 적용가능성을 분석하였다. 조류발전시스템의 실증시험은 전라남도 진도 울돌목에 설치된 조류발전 시험소에서 이루어 졌으며, 20kW 영구자석 동기 발전기를 대상으로 한 수평축 능동조류발전시스템을 이용하여 이루어졌다.

2. 조류발전 시스템

조류발전시스템을 구성하기 위해서는 기본적으로 조류를 기계적 힘으로 받아들이기 위한 터빈부와 전기적인 에너지를 만들어 내기 위한 발전기와 전력변환장치로 구성된다. 조류 특성을 이해하고 이에 적합한 최대 출력 제어 알고리즘을 통해서 조류발전 시스템의 발전량을 최대로 얻을 수 있다.

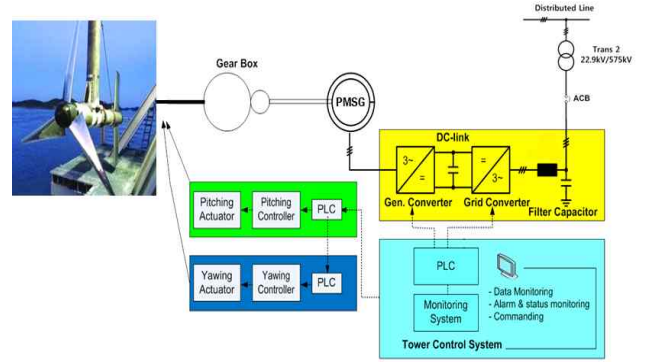


Fig. 2. The configuration of tidal current generation system.

2.1 조류터빈의 특성

유속 v_{tide} 에 따라 터빈이 유속으로부터 받아들이는 에너지는 다음과 같이 표현된다^{[4][5]}.

$$P_{blade} = 0.5\rho A v_{tide}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

여기서, $\rho[kg/m^3]$ 는 유체의 밀도, $A[m^2]$ 는 블레이드의 단면적, C_p 는 블레이드의 출력계수, β 는 피치각, λ 는 주속비(TSR: Tip Speed Ratio)이다. 주속비는 유속에 대한 블레이드 끝점 속도의 비로서 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{v_{tide}} \quad (2)$$

여기서, $R_{blade}[m]$ 는 블레이드의 반경, $\omega_{blade}[rad/s]$ 는 블레이드의 속도이다. 식(1)에서 C_p 는 주속비 λ 와 피치각 β 의 비선형 함수이며, 다음과 같이 나타낸다.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$C_1 \sim C_6$ 는 블레이드 설계 시 주어지며, 주속비에 따른 출력계수의 변화는 그림 1에 나타내었다. 그림1에서 알 수 있듯이 주속비 4.5로 동작 시 출력 계수는 최대가 되는 것을 보이며, 조류터빈의 최대출력을 발생시키기 위해서는 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{max} = 0.5\rho A v_{tide}^3 C_{p-max} \quad (4)$$

2.2 조류발전 시스템 구성

전기적인 에너지를 얻기 위한 조류발전 시스템의 전체적인 구성은 그림 2와 같다. 본 논문에서 적용한 조류

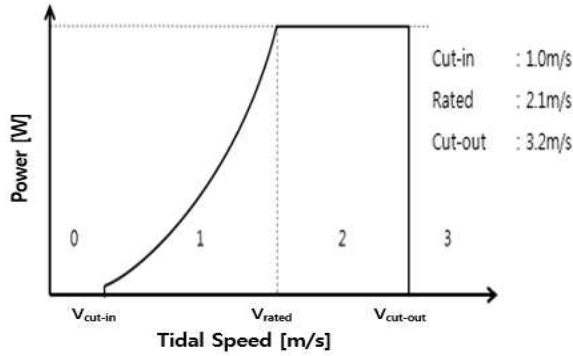


Fig. 3. Operation characteristics of tidal current generation system.

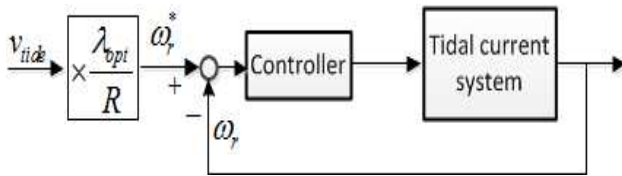


Fig. 4. Optimal TSR MPPT control.

발전 시스템은 조류의 흐름에 따라서 블레이드의 피치 각과 요(Yaw)를 제어하여 능동적으로 전력을 생산할 수 있는 시스템으로 피치각과 축을 제어하는 피치제어부와 요제어부를 포함하여 능동형 조류발전시스템이 구성되며, 터빈의 출력을 입력으로 받아 전기를 발생시키는 발전기와 발전기의 제어와 계통 측에 전기를 공급하는 전력변환장치로 이루어진다. 그림 3은 조류발전 시스템의 동작 특성을 나타낸다. 능동조류 발전제어의 영역은 크게 4개로 구분하여, 1영역은 유속이 1.0 m/s에서 2.1 m/s 구간으로 전력변환장치에 의해 조류발전 출력이 제어되는 구간이며, 2영역은 발전기의 속도는 일정하게 유지하고, 기계적인 출력을 피치제어를 통하여 제어하는 구간이다. 0과 3 구역은 조류의 유속이 낮거나 유속이 너무 높아 발전을 정지하는 구간을 나타낸다.

3. MPPT 제어 알고리즘

3.1 최적주속비를 이용한 MPPT제어

그림 4는 최적 주속비를 이용한 MPPT제어 블록도이다. 최적 주속비를 이용한 MPPT제어는 그림 1에서 알 수 있듯이, 최대 출력계수는 주속비에 의해 결정되어 지는 것을 알 수 있으며, 식 (5)와 같이 최대 출력계수가 되는 최적주속비를 이용하여 발전기의 속도를 제어하는 방식이다. 하지만 이 방식은 고가의 유속장비 및 유속측정 오차로 인한 성능저하 문제를 가지고 있으며, 유속장비의 설치 위치 및 거리에 따라 유속이 일정치 않아 최적주속비를 이용하여 발전기를 제어할 시 설계데이터와 많은 차이를 가진다^[3].

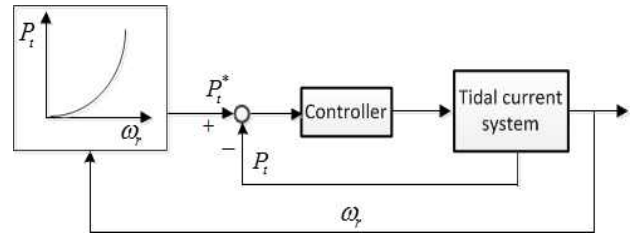


Fig. 5. Look-up table MPPT control.

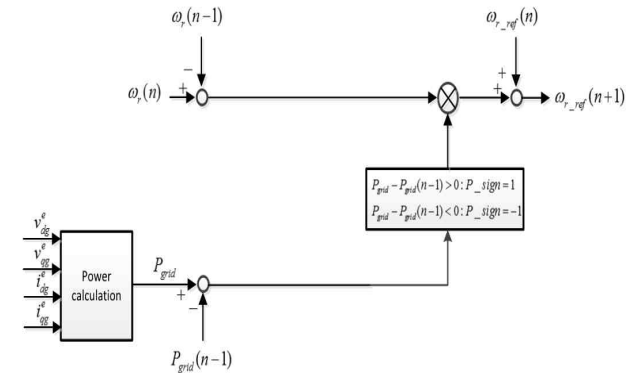


Fig. 6. P&O MPPT control.

$$\omega_{r_ref} = \frac{\lambda_{opt} v_{tide}}{R_{blade}} \quad (5)$$

3.2 Look-up 테이블을 이용한 MPPT제어

그림 5는 식 (6)과 같이 터빈의 속도와 출력특성을 Look-up 테이블을 이용하여 발전기를 제어하는 방식이다. 고가의 유속장비를 이용하지 않는다는 장점이 있다. 하지만 터빈의 설계데이터와 실제 데이터가 일치하지 않아 시뮬레이션 및 실험을 통해 터빈의 데이터를 얻어야 하는 단점이 있다^[3].

$$\begin{aligned} P_{max} &= 0.5\rho\pi R^2 C_{p_max} \left(\frac{\omega_r R}{\lambda_{opt}}\right)^3 \\ &= K_{opt} \omega_r^3 \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 P&O MPPT 제어

그림 6은 P&O MPPT 제어 블록도이다. P&O 제어 방식은 임의로 발전기의 속도를 증가 및 감소 시켜 터빈의 출력이 증가 및 감소하는 특성을 이용하여 터빈의 최대 출력점을 찾는 방법이다^[3]. 발전기의 출력정보를 입력으로 받아 발전량을 계산하고 발전량의 변화를 바탕으로 속도의 증감을 결정하게 된다. 하지만, 속도변화에 대한 증분값이 효과적으로 정의되어야 최대 출력을 안정적으로 확보할 수 있는 단점이 있다. 이는 시스템마다 속도변화에 따른 발전량이 다르기 때문에 실제 시뮬레이션 및 실험을 통해 적절한 증분값을 찾아야 된다.

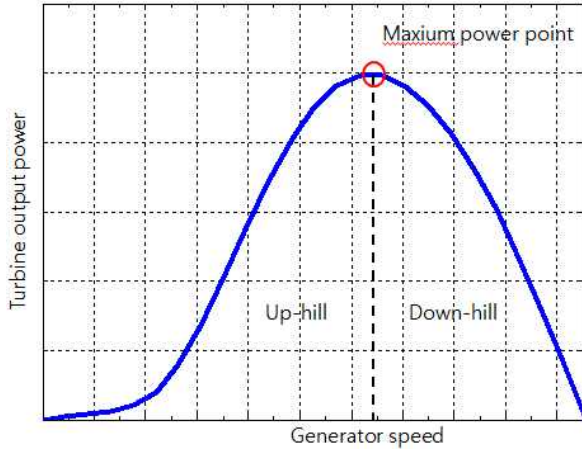


Fig. 7. P&O control principle.

4. 조류발전시스템에 적용된 P&O MPPT

조류발전시스템에 적용된 P&O MPPT 방식은 유속정보 및 터빈의 특성이 필요하지 않아 조류발전시스템에 적용하였을 경우 적합한 방법이다. P&O MPPT 제어방법은 그림 7과 같이 만약 UP-hill 구간에서 발전기의 속도를 증가시켜 터빈의 출력이 증가하면 발전기의 속도를 증가시키고 발전기의 속도를 감소시켜 터빈의 출력이 감소하면 발전기의 속도를 증가시키고 반면에 Down-hill 구간에서는 발전기의 속도를 증가시켜 터빈의 출력이 감소하면 발전기의 속도를 감소시키고 발전기의 속도를 감소시켜 터빈의 출력이 증가하면 발전기의 속도를 감소시킨다. 조류발전시스템에 적용하기 위한 P&O 최대출력제어 기법은 다음과 같은 과정으로 이루어진다^[6-9].

Step 1: 발전기가 조류에 의해 타행구동 후 정격속도의 1/10 지점부터 초기 지령속도에 의해 제어한다.

Step 2: 발전기의 출력정보를 얻는다.

Step 3: 발전기의 속도를 증가시키면서 출력상태를 확인하여 발전기의 출력의 증감여부를 확인한다.

Step 4: 발전기의 출력변화에 따라서 조류발전 특성을 고려하여 식(7)과 같이 ω_{step} 을 적용한 발전기의 속도지령치를 계산한다.

$$\omega_{step} = k_{mppt} \times \frac{dP_{out}}{d\omega_r} \quad (7)$$

Step 5: 계산된 발전기의 속도 지령치로 운전을 하면서 Step 2 단계부터 반복하여 수행한다.

그림 8은 전체적인 조류발전을 위해 적용된 P&O MPPT 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

5. 시뮬레이션

P&O MPPT 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 시스템 구성은 그림 9와 같이 실제 시스템과 동일하게 구성하였고 시뮬레이션에 적용된 파라미터는 실험에서 사용된 파라미터와 동일하며 표 1에 나타내었다. 유속정보는 울돌목 조류발전시험소에서 하루 동안 측정된 실제 유속을 알고리즘의 타당성 및 적용가능성을 확인하기 위하여 그림 10과 같이 축소시켜 적용하였다. 조류 유속의 변동은 1.2 m/s부터 2.1 m/s 까지 계속해서 변화하는 것을 볼 수 있다.

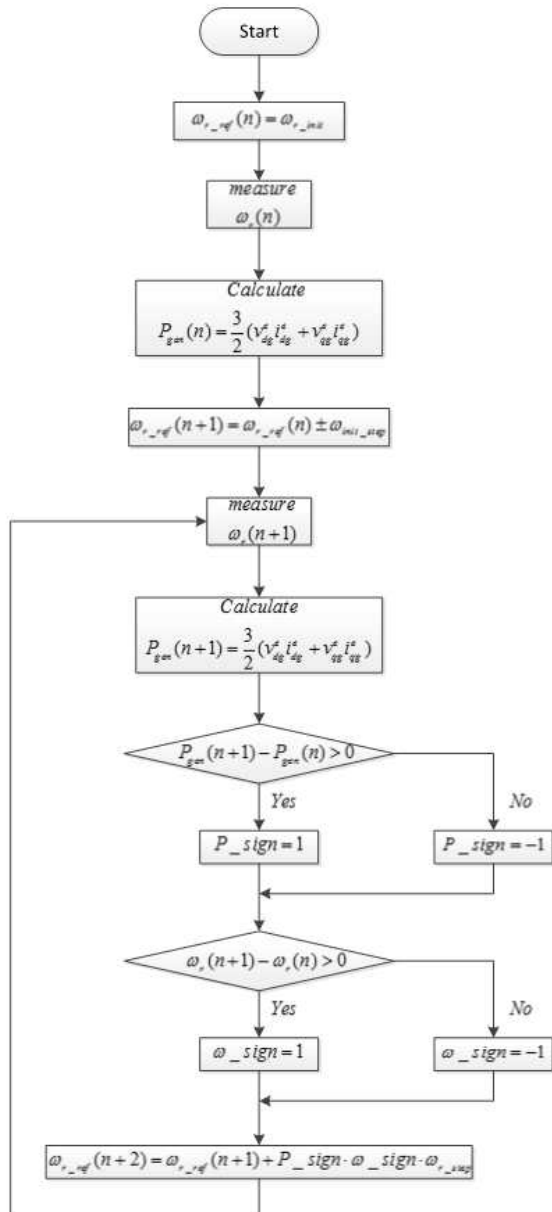


Fig. 8. The flow chart of P&O algorithm.

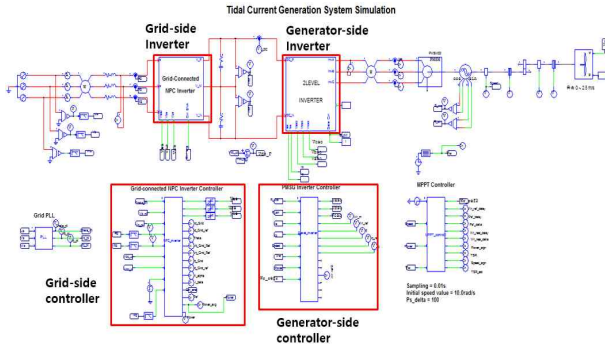


Fig. 9. Simulation model of tidal current generation system.

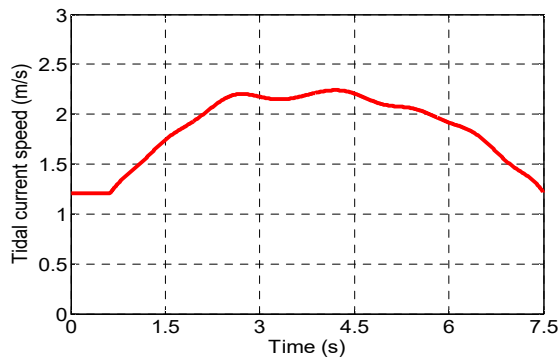


Fig. 10. Tidal current speed information.

그림 11은 최적주속비를 이용한 MPPT 제어와 실제 유속을 고려한 P&O MPPT 제어에 따른 조류발전기의 기준 운전속도와 실제 운전속도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 P&O MPPT 제어시 터빈의 최대출력을 발생시키기 위해서 발전기의 기준속도가 변화하고 실제 발전기의 속도가 기준 속도를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 또한 최적 주속비를 이용한 MPPT제어와 비교 하였을 때 최대출력을 발생시키는 기준속도를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 하지만 P&O MPPT 제어시 속도가 감소할 때보다 증가할 경우 리플이 더 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 발전기의 속도가 증가 및 감소할 때 기어와 터빈의 마찰력의 부호 차이에 의한 현상으로 판단된다. 그림 12는 발전기의 출력으로 최대 출력 11kW를 발전하는 것을 볼 수 있으며, 유속정보 없이도 유속에 따른 최대출력점을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 그림 13은 P&O MPPT 제어 방법에서 발전기의 최대 출력을 얻기 위해 적용하고 있는 출력계수를 나타낸다. 발전기의 발전출력의 변화에 따라서 적용되는 주속비는 일정한 상수가 아닌 실시간으로 값이 변동되며, 시뮬레이션에서 설정한 최대 출력계수인 0.48을 비교적 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 하지만 저속구간에서 잘 추종하지 못하는 것을 볼 수 있다. 저속에서는 발전량의 차이가 많이 나지 않기 때문에 발전기의 출력

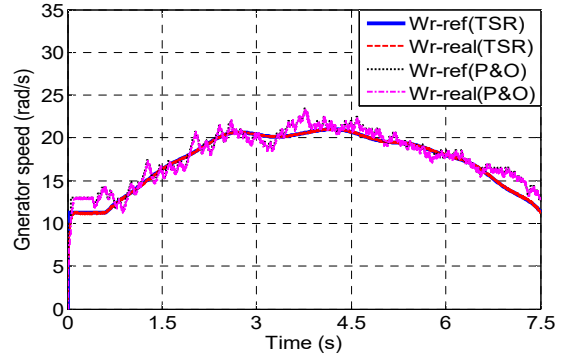


Fig. 11. Generator speed of applying P&O MPPT.

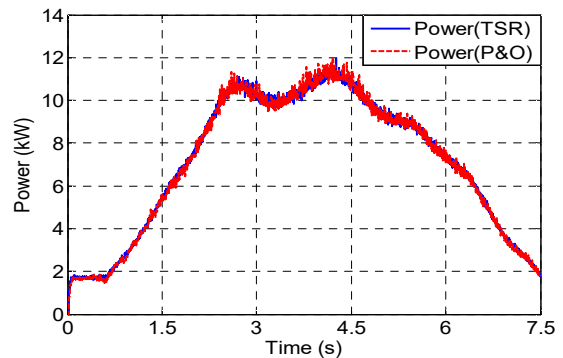


Fig. 12. The generated power of PMSG.

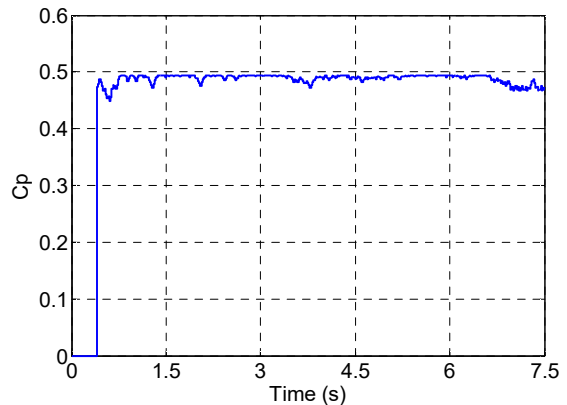


Fig. 13. Power coefficient tracked by the P&O MPPT.

이나 속도 리플로 인해 P&O MPPT 증감여부 판단오차에 의해 출력계수가 저하되는 것으로 판단된다.

6. 조류발전시스템 MPPT 제어 실증 시험

제안한 MPPT 제어 알고리즘을 실증 시험에 적용하여 성능을 검증하였다. 그림 14부터 그림 16까지는 진도 울돌목에 위치한 국내 유일의 조류발전시험소의 20kW 발전시스템을 보여준다. 울돌목 조류발전시스템의 실증시

TABLE I
THE PARAMETER OF 20kW PERMANENT
MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR

Parameter	Value
stator resistance	0.51 [Ω]
d-axis inductance	7.2 [mH]
q-axis inductance	7.2 [mH]
rated power	20 [kW]
rated voltage	380 [V]
rated speed	200[rpm]
pole	30

험에서는 정확한 발전량을 측정하기 위해 Yokogawa 의 WT1600 모델 전력분석기를 사용하여 측정하였으며, 발전량과 유속 정보 등은 조류발전시스템 실증시험을 위한 SCADA를 이용하여 취득하였다.

그림 14는 조류발전 터빈으로 조류발전 터빈은 조류에 대한 회전축의 방향에 따라서 적용되는 방식이 크게 수평축(HAT: Horizontal Axis Turbine)방식과 수직축(VAT: Vertical Axis Turbine)방식으로 구분되어 지며^[10], 현재 울돌목 조류발전 시험소에는 그림 14와 같이 3 블레이드 수평축 터빈이 설치되어 있으며, 블레이드 길이는 1.2m이며, 출력계수 0.48, 주속비 4.5로 설계되어 졌다.

그림 15는 조류발전터빈에 연결된 20kW 영구자석형 발전기의 모습을 보여준다. 발전기는 지상에 연결되어 있으며 발전기에 대한 상세 사양은 표 1과 같다.

그림 16은 계통 연계형 조류발전 시스템을 제어하기 위한 전력변환장치이다. 발전기 측은 2-레벨 인버터로 구성되며, 계통측은 3-레벨 NPC 컨버터로 구성되어 졌다. 발전기 측 2-레벨 인버터는 조류터빈에 연결된 발전기를 제어함으로써 터빈이 유속에 따라 최대출력을 발생시키는 역할을 하며, 계통 연계형 3-레벨 NPC 인버터는 계통의 위상을 검출하기 위해 PLL(Phase Lock Loop)제어와 DC_link를 통해 전달된 전력을 변화 및 조정하는 역할을 한다.

그림 17은 울돌목 조류발전시험소에서 측정한 실제 유속 정보를 나타낸다. 실험시의 유속은 최저 1m/s에서 최대 2m/s 까지 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 18은 전력분석기로 측정한 실증시험에서 평균 1.5 m/s 조류 유속이 흐를 때의 조류발전량을 보여준다. 발전되는 출력이 유속변화에 따라서 변화되는 것을 볼 수 있으며, 최대 9 kW가 나타나며, 평균 3 kW 정도 발전하는 것을 볼 수 있다.

그림 19는 실제 전력분석기로 터빈의 입력과 계통출력에 대한 출력계수를 측정한 값 0.37을 설계된 주속비

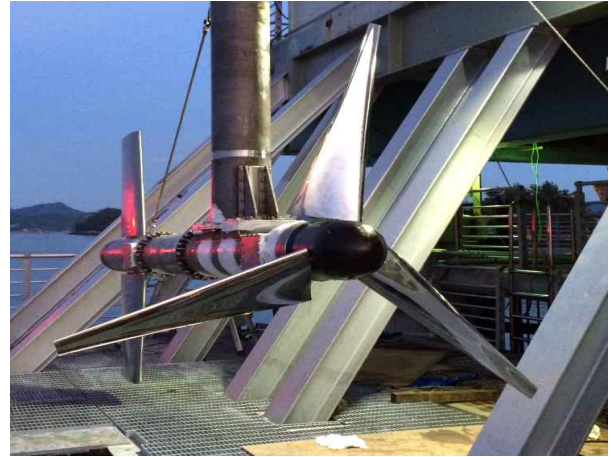


Fig. 14. Tidal current turbine.



Fig. 15. Tidal current generation system.

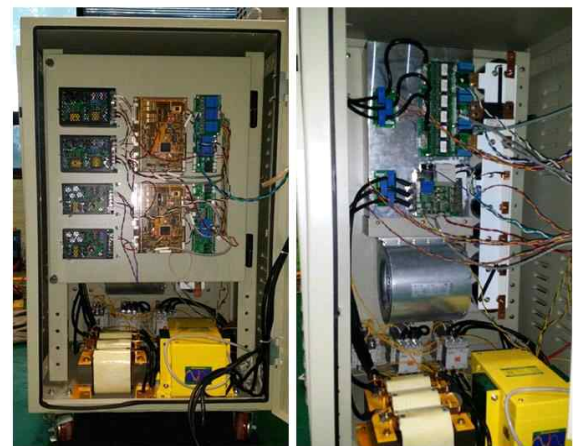


Fig. 16. 20kW power conversion system.

를 고려하여 계산한 발전량과 P&O MPPT 제어방식을 적용한 발전량을 비교한 파형이다. 그림에서와 같이 P&O MPPT 제어방식을 적용했을 때, 저속에서 약간의 오차가 있지만 유속에 따라 발전기가 최대 출력점을 잘 추정한다는 것을 확인 할 수 있다.

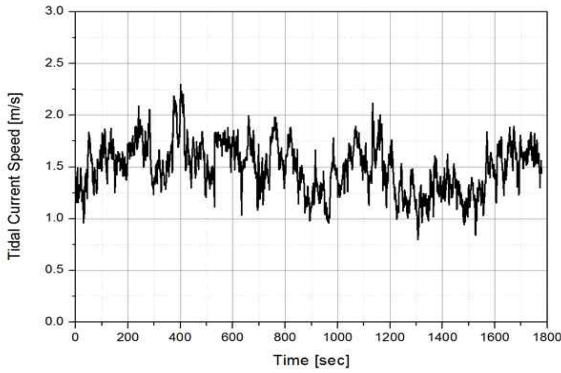


Fig. 17. Tidal current information.

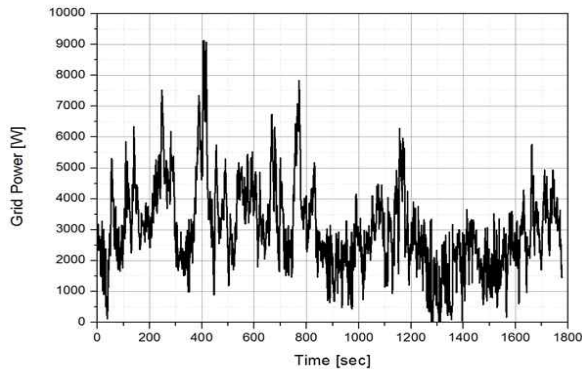


Fig. 18. The generated power of applying P&O MPPT at tidal current speed 1.5 m/s.

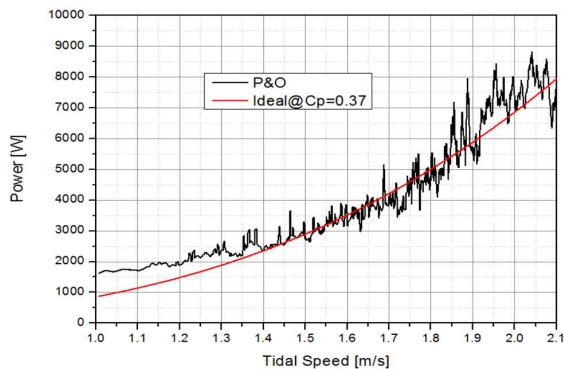


Fig. 19. Output power according to the tidal speed with P&O control.

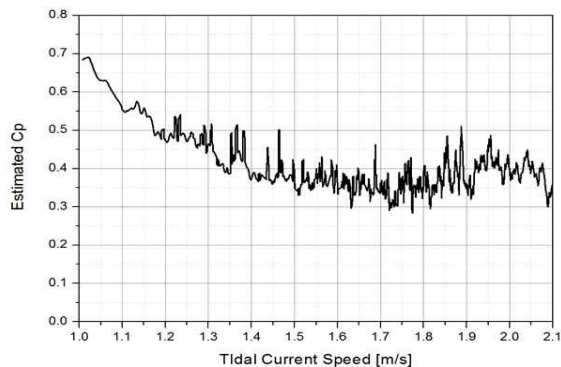


Fig. 20. Power coefficient tracked by the P&O MPPT.

그림 20는 유속에 따른 P&O MPPT 제어 시 출력계수의 변화를 나타낸다. 1.5 m/s에서부터 출력계수 값이 비교적 안정적으로 나타나며, 출력계수 값과 발전량을 비교했을 시, 발전량이 큰 경우에 더 정확하게 출력계수가 나타나는 것을 알 수 있다.

7. 결 론

최적주속비를 이용한 MPPT 제어방식 및 Look-up테이블을 이용한 MPPT 제어방식은 터빈의 설계데이터와 유속정보를 이용하기 때문에 고가의 유속장비가 필요하고 터빈의 설계데이터에 의존한다. 본 논문에서는 유속 정보 및 터빈의 설계데이터를 이용하지 않는 P&O MPPT제어 방식을 이용한 조류발전 제어방법을 제안하고, 조류발전 시험소에서 실증 실험을 하였다. 실험결과 유속정보 없이도 발전 출력이 잘 유지되는 것을 확인하였고, 실제 실험으로 얻은 출력계수 값을 이용하여 계산한 발전량과 설계된 데이터를 이용한 출력계수 값을 비교 했을 시 잘 추종되는 것을 확인하였다.

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업인 능동 제어형 조류발전 기술개발(20110171)의 연구비 지원에 의해 수행되었음

References

- [1] J. H. Yi, S. H. Oh, J. S. Park, K. S. Lee, and S. Y. Lee "Flow-turbine interaction CFD analysis for performance evaluation of vertical axis tidal current turbines(I)," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 3, pp. 67-72, June 2013.
- [2] A. Keyhani, M. N. Marwali, M. Dai, Interaction of Green and Renewable Energy in Electric Power System, John Wiley & Sons, New Jersey, 2010.
- [3] A. M. Eltamaly, A. I. Alolah, and H. M. Farh. Maximum Power Extraction from Utility-Interfaced Wind Turbines. *INTECH Open Access Publisher*, 2013.
- [4] A. S. Bahaj et al., "Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production," *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 2205-2211, 2003.
- [5] J. S. Couch and I. Bryden, "Tidal current energy extraction: Hydrodynamic resource characteristics," *Proc. IMechE M, J. Eng. Maritime Environ.*, Vol. 220, No. 4, pp. 185-194, 2006.
- [6] J. Gao, J. Lu, K. Huang, Y. Zhang, and S. Huang, "A novel variable step hill-climb search algorithm used for direct driven PMSG," in *Proc. ICEET*, Vol. 1, pp. 511-514, Oct. 2009.

- [7] J. S. Choi, J. S. Ko, and D. H. Chung, "Development of VPO MPPT of PV system considering shadow influence," *Journal of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 16, No. 5, pp. 521-531, Oct. 2011.
- [8] D. K. Choi and K. B. Lee, "Variable step-size MPPT control based on fuzzy logic for a small wind power system," *Journal of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 3, pp. 205-212, June 2012.
- [9] C. H. Kim, H. K. Ku, Y. D. Son, and J. M. Kim, "The analysis and study on operation strategy of grid-connected series small wind turbine system," *Journal of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 20, No. 1, pp. 59-64, Feb. 2015.
- [10] B. G. Kim, C. J. Yang, and M. S. Choi, "A study on the performance of an 100kW class tidal current turbine," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 18, No. 2, pp. 145-152, Apr. 2012.



문석환(文晳煥)

1984년 6월 18일생. 2011년 동아대 전기공학과 졸업. 2014년 부산대 대학원 로봇관련 협동과정 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2011년~현재 한국전기연구원 전동력연구센터 위촉연구원.



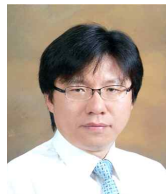
김지원(金志元)

1971년 9월 20일생. 1994년 서울시립대 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2014년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 한국전기연구원 전동력연구센터 책임연구원.



박병건(朴炳建)

1979년 4월 16일생. 2005년 명지대 전기정보 제어공학부 졸업. 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2011년~현재 한국전기연구원 전동력연구센터 선임연구원.



김장목(金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한국전력 연구원 선임연구원. 2007년 Florida State University 방문교수. 2001년 3월~2016년 12월 부산대 전기공학과 교수. LG전자 스마트 제어 센터장. (주)효원파워텍 대표이사. 당 학회 연구사업이사.