

진도 울돌목 조류발전 시스템 실증 평가

Empirical Evaluation of Tidal Current Generation System at Ul-Dol-Mok in Jin-do

문석환¹, 박병건¹, 김지원^{1,✉}
Seok-Hwan Moon¹, Byung-Gun Park¹, and Ji-Won Kim^{1,✉}

¹ 한국전기연구원 전동력연구센터 (Electric Motor Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute)
✉ Corresponding author: jwkim@keri.re.kr, Tel: +82-55-280-1335

Manuscript received: 2015.2.16. / Revised: 2015.10.29. / Accepted: 2015.11.30.

The empirical evaluation of grid-connected tidal current generation system is presented in this paper. The Ul-dol-mok in Jin-do has been estimated to have tidal power of 1GW. In order to experiment, HAT (Horizontal Axis Turbine) 3-blade and 20kW grid-connected tidal current generation system was established at Ul-dol-mok in Jin-do. To generate power of generator, the speed reference of the PMSG is generated from the C_p curve and TSR (Tip Speed Ratio) of the designed turbine. The control of the converter connected to the grid is controlled to regulate unity power factor. The result showed that the turbine efficiency and system efficiency is 37 % and 31 %. This was achieved that target rate is 30 %, 20 %, respectively.

KEYWORDS: Tidal current generation system (조류발전 시스템), Permanent magnet synchronous generator (영구자석 동기발전기), Grid-connected converter (계통연계형 컨버터), Maximum power point tracking (최대전력점 추정)

1. 서론

최근, 환경오염과 기후변화의 주요원인인 화석 연료의 사용 증가 및 고갈로 인해 친환경적인 신 재생에너지 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 신 재생에너지원의 하나인 해양에너지는 청정하고 무한한 에너지자원으로써 각광을 받고 있다. 전세계적으로 해양에서 개발되고 있는 에너지는 Fig. 1 과 같이 조력발전, 파력발전, 해양 온도 차 발전, 조류발전 등이 있다. 유일하게 상업화된 조력발전은 전세계적으로 3000GW 용량을 가지고 있다. 하지만 낙차를 이용한 발전시스템인 조력발전은 건설 및 개발 비용이 많이 들고 수몰지역이 발생할 가능성이 높으며, 해안 생태계 영향을 줄 수 있는

단점이 있다. 또한 해양 온도차를 이용한 발전 시스템도 에너지 밀도가 낮고 시설비용이 많이 드는 단점이 있다. 조수간만차에 의해 발생하는 높은 유속을 이용한 조류발전은 다른 신 재생에너지와 비교하였을 시 해수의 밀도는 공기의 밀도보다 약 840배로 에너지 이용률이 비교적 높고 태양광 발전 및 풍력발전처럼 날씨와 상관 없이 항상 발전 및 발전량 예측이 가능하다. 다른 해양에너지와 비교했을 시 건설비용 및 선박운항의 제약이나 생태계에 미치는 영향이 적고 상용가능성이 가장 높다.^{1,2}

조류발전은 전세계적으로 약 120GW 발전 가능하며, 영국을 중심으로 노르웨이, 캐나다, 미국, 일본 등에서 기술이 개발되고 있다.³ 영국의 Marine

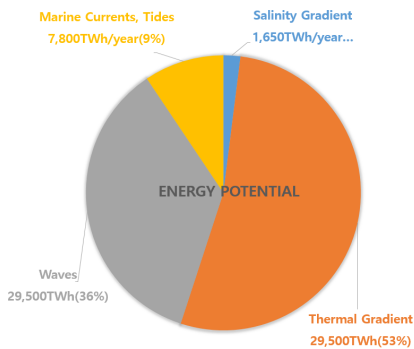


Fig. 1 The potential amount of marine energy resources



Fig. 2 Tidal current generator system in Ul-Dol-Mok

current Turbine(MCT)사에서는 영국남서부 Foreland Point 해양에 2-blade 수평축터빈을 이용한 300kW 급 발전시스템을 시험 가동하고 있으며, 미국의 Verdant Power사는 뉴욕의 동쪽 강변 해저에 6기의 35kW급 조류발전시스템을 설치하였다. 노르웨이의 Hammerfest Strom사는 2003년에 세계 최초로 100kW 급 프로펠러형 조류발전 터빈을 개발하여 현장시험을 실시하였고, 생산된 전력은 계통에 연결하는데 성공한 바 있다. 우리나라 서남해안은 강한 조석과 지형적인 특성으로 인해 세계적으로 조류발전의 적지로 알려져 있다. 현재 장죽 수도, 강화수도, 울돌목, 맹골수도등 여러 해역에서 상용 발전이 가능한 정도의 조류가 흐르고 있으며, 100만kW의 에너지원이 부존되어 있는 것으로 추정되고 있다.⁴ 그 중 국내에서도 가장 높은 조류발전 잠재력을 지닌 전라남도 진도 울돌목에는 조류에너지 실

용화 기술개발을 목적으로 한 조류발전 시험소가 설치되었다. 현재 울돌목 조류발전 시험소에는 수직축터빈(헬리컬형식)을 이용한 500kW급 이중여자 유도발전기와 동기발전기가 설치되어 있고 EU MARINET의 피라미드형 개발 전력을 적용하여 향후 200kW급 계통연계형 영구자석 동기 발전기를 대상으로 한 축소모델인 20kW급 영구자석 동기발전기(수평축터빈)가 추가적으로 2014년에 설치되었다. Fig. 2는 설치된 수평축 터빈과 영구자석 동기발전기를 보여준다.

본 논문에서는 PSIM을 이용하여 울돌목 하루 동안의 유속정보를 바탕으로 시뮬레이션 및 실제 울돌목 조류발전 시험소에 설치된 영구자석 동기발전기 자체의 성능 검증과 이를 제어하기 위한 전력변환장치의 개발과 성능 검증을 실증 실험을 통해 확인하고자 한다.

2. 계통연계형 조류발전 시스템

2.1 조류터빈 모델

수평축 조류터빈은 풍력터빈과 유사한 형태로서 기계적 출력은 다음과 같이 표현된다.⁵

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

여기서, C_p 는 블레이드의 출력계수, ρ [kg/m³]는 유체의 밀도, A [m²]는 블레이드의 단면적, β 는 피치각, λ 는 주속비(TSR:Tip speed ratio)이다. 식(1)에서 C_p 는 주속비 λ 와 피치각 β 의 함수이며, 블레이드의 설계 시 결정된다. 일반적인 C_p 함수는 식(2)와 같다.⁶

$$C_p(\beta, \lambda) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2)$$

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

주속비는 유속에 대한 블레이드 끝점 속도의 비로서 식(3)과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} \cdot R_{blade}}{v_{tide}} \quad (3)$$

여기서, R_{blade} [m]는 블레이드의 반경이며, ω_{blade} [rad/s]는 블레이드의 속도이다. 여기서는 피치각 제어

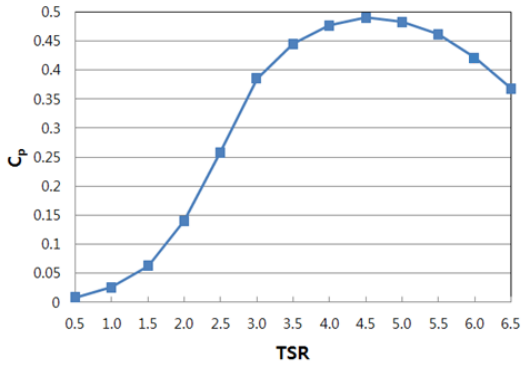


Fig. 3 C_p versus λ characteristic curve

는 고려하지 않으므로 $\beta=0$ 으로 설정하였고 Fig. 3은 주속비에 따른 출력계수의 변화를 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 조류터빈의 출력계수는 최적 값의 주속비에 의해 결정된다. 이 특성을 이용해 조류터빈의 최대출력을 발생시키기 위해 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_{\text{tide}}^3 \cdot C_{p\max} \quad (4)$$

2.2 최적 주속비를 이용한 MPPT 제어

앞에서 언급했듯이 조류터빈의 출력계수는 최적 값 주속비에 의해 결정된다. 유속에 따라 최대 파워를 발생시키기 위해서는 항상 최적 주속비로 동작하여야 한다. 터빈의 최대출력을 발생시키기 위한 발전기의 속도 지령치는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.^{7,8}

$$\omega_r^* = \frac{\lambda_{\text{opt}} \cdot v_{\text{tide}}}{R_{\text{blade}}} \quad (5)$$

Fig. 4는 유속별 속도 지령치에 따른 최대 파워 곡선을 보여준다.

2.3 발전기측 컨버터 제어

영구자석 동기 발전기의 동기 좌표계 전압 방정식은 식(6)과 같다.^{9,10}

$$\begin{aligned} V_{ds_PMSG}^r &= R_s i_{ds}^r + \frac{d\lambda_{ds}^r}{dt} - \omega_r \lambda_{qs}^r \\ V_{qs_PMSG}^r &= R_s i_{qs}^r + \frac{d\lambda_{qs}^r}{dt} + \omega_r \lambda_{ds}^r \end{aligned} \quad (6)$$

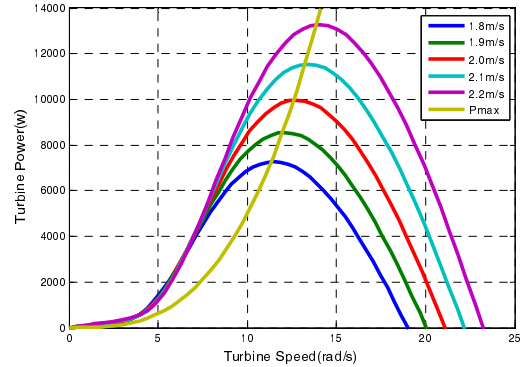


Fig. 4 The maximum power curve depending on generator speed

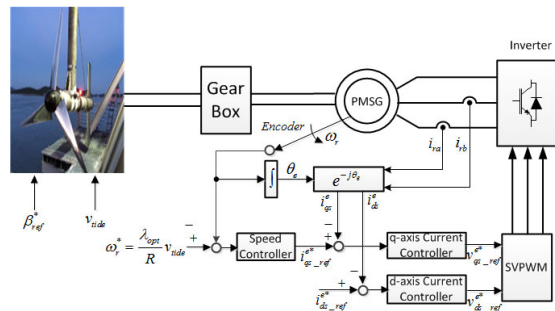


Fig. 5 The block diagram of generator-side

여기서, $V_{ds_PMSG}^r$, $V_{qs_PMSG}^r$ 는 D,Q축 고정자전압, R_s 는 고정자 저항, i_{ds}^r , i_{qs}^r 는 D,Q축 고정자 전류, λ_{ds}^r , λ_{qs}^r 는 D,Q축 고정자 쇠교자속이다. 고정자 쇠교자속은 식(7)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^r &= L_s i_{ds}^r + \phi_f \\ \lambda_{qs}^r &= L_s i_{qs}^r \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, L_s 는 고정자 인덕턴스이고, ϕ_f 는 영구자석의 자속이다. 영구자석 동기발전기의 전기적 토크는 식(8)과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{P}{2} \phi_f i_{qs}^r \quad (8)$$

최적 주속비를 이용한 MPPT제어는 최대출력을 내는 속도 지령치를 만들고, 발전기의 토크를 제어하기 위해 속도제어기는 Q축 전류의 지령치를 출력한다. 또한, 최대 토크를 유지하기 위해 D축 전류는 0으로 제한한다. Fig. 5는 영구자석 동기발전기의 제어 블록도이다.

2.4 계통측 컨버터 제어

계통측의 전압방정식은 3상전압과 컨버터의 제어전압을 이용하여 동기좌표계상에서 표현하면 식(9)와 같다.¹¹⁻¹³

$$e_{d_Grid}^e = L_f \frac{di_d^e}{dt} - \omega_c L_f i_q^e + e_{ds}^e \tag{9}$$

$$e_{q_Grid}^e = L_f \frac{di_q^e}{dt} + \omega_c L_f i_d^e + e_{qs}^e$$

여기서, L_f 는 계통전압과 컨버터에 연결된 인덕터이며, $e_{d_Grid}^e, e_{q_Grid}^e$ 는 D, Q축 계통전압, e_{ds}^e, e_{qs}^e 는 컨버터의 D,Q 제어 전압이다. PLL을 이용하여 계통전압의 위상각을 추정하면 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$0 = L_f \frac{di_d^e}{dt} - \omega_c L_f i_q^e + e_{ds}^e \tag{10}$$

$$E = L_f \frac{di_q^e}{dt} + \omega_c L_f i_d^e + e_{qs}^e$$

위 식으로부터 Q축은 유효전력과 관련되며, D축은 유효전력과 무관하며 무효전력에만 관련이 있는 것을 알 수 있다. 유효전력과 무효전력을 D, Q축으로 나타내면 식(11)과 같다.

$$P = \frac{3}{2} e_{q_Grid}^e i_q^e \tag{11}$$

$$Q = \frac{3}{2} e_{d_Grid}^e i_q^e$$

Fig. 6과 같이 발전기측 인버터에서 계통으로 전력이 전달될때 DC_link를 일정하게 제어하기 위해서는 유효전력성분인 Q축을 제어하고 역률1로 제어하기 위해서는 무효전력성분인 D축을 0으로 제어한다.

3. 시뮬레이션

Fig. 7은 back-to-back 컨버터 타입의 계통연계형 조류발전시스템의 PSIM 시뮬레이션 모델을 나타내고 있으며 Table 1은 시스템에 적용된 파라미터를 나타낸다.

Fig. 8은 진도 울돌목에서 하루 동안 유속을 측정 한 결과이다. Figs. 9-12는 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 9는 유속에 따른 발전량을 보여준다. Fig. 9의 결과에서 유속에 따라 최대 전력점을 추

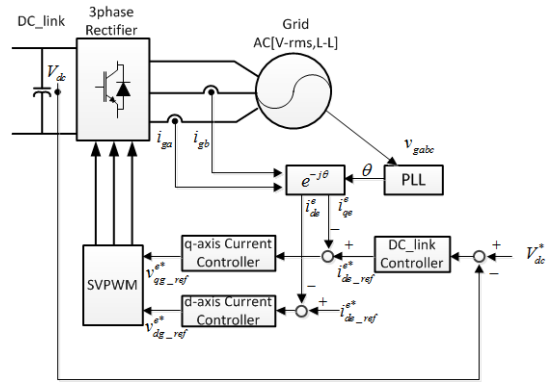


Fig. 6 The block diagram of grid-side

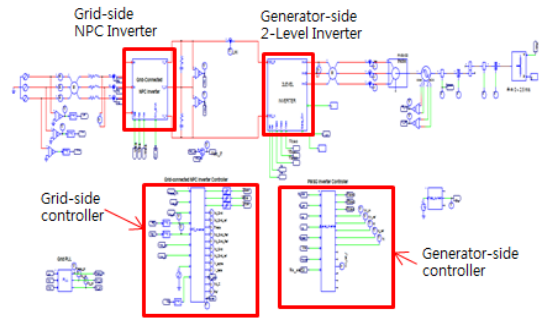


Fig. 7 Simulation model grid-connected tidal current generation system

Table 1 Tidal current turbine and generator system parameter

PMSG		
Parameter	Value	Units
Rated power	20	kW
Rated voltage	380	V
Rated speed	200	Rpm
Stator resistance	0.51	Ω
d-axis inductance	7.2	mH
q-axis inductance	7.2	mH
Pole pair	30	
Turbine		
Parameter	Value	Units
Blade radius	1.2	m
Fluid density	1025	kg/m ³
Maximum power coefficient	0.48	
Optimum tip speed ratio	4.5-5	

정하는 것을 확인할 수 있으며 하루동안 평균적으로 약 2.5kW를 발전하여 약 60kWh의 발전이 가능할 것으로 생각할 수 있다. Fig. 10은 발전기의 D,

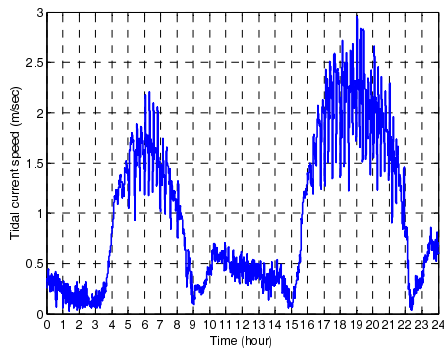


Fig. 8 A daily tide in UI-Dol-Mok

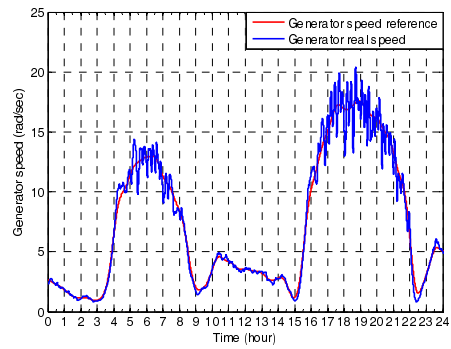


Fig. 11 Generator speed response of generator

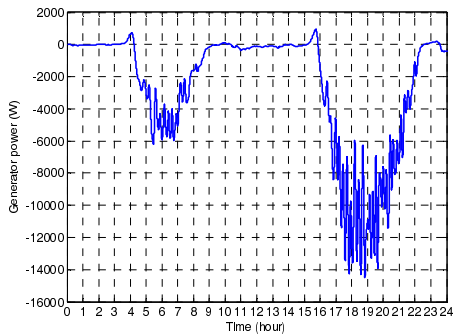


Fig. 9 The generated power in PMSG

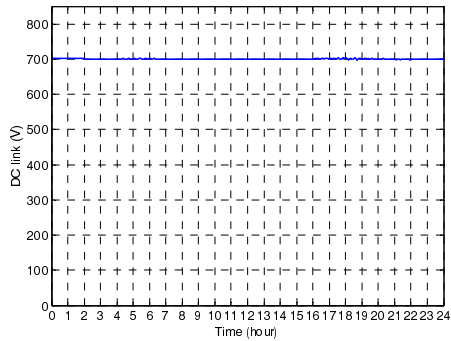


Fig. 12 DC link voltage

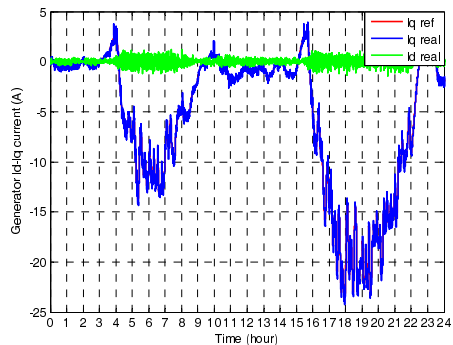


Fig. 10 I_d - I_q axis current response of generator

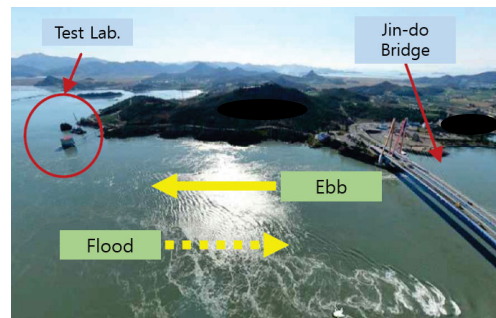


Fig. 13 Tidal current generation laboratory in UI-Dol-Mok

Q축 전류응답을 나타낸다. D축 전류는 최대 발전을 하기 위해 0으로 제어되고 있으며, Q축 전류는 순간적인 발전량에 따라 증감되는 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 발전기의 속도를 나타낸다. 발전기 속도는 MPPT제어에 의해 유속에 따라 속도 지령치를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. Fig. 12는 DC link 전압을 나타낸다. DC link 전압 지령치는 700V로 설정하였으며 순시적인 발전량에 상관없이 일정하게 제어되

는 것을 확인할 수 있다. 이는 발전기에서 생산된 전력이 계통측에 잘 전달된다는 것을 의미한다.

4. 실험

실제 울돌목 조류발전 시험소에서 계통연계형 조류발전 시스템에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 13은 현재 설치된 조류발전 시험소를 나타낸다.

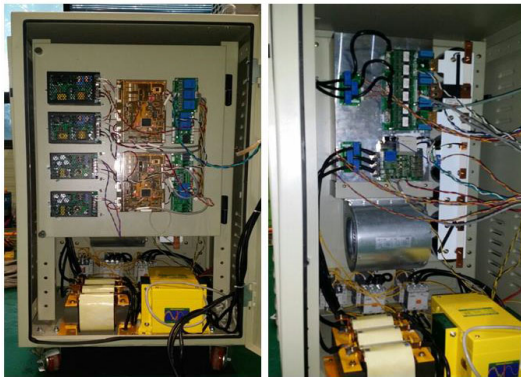


Fig. 14 Experimental equipment

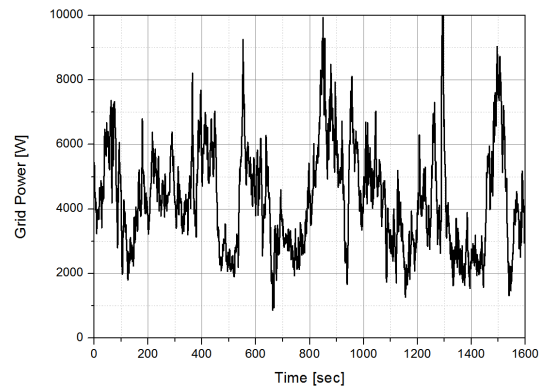


Fig. 16 Generated power

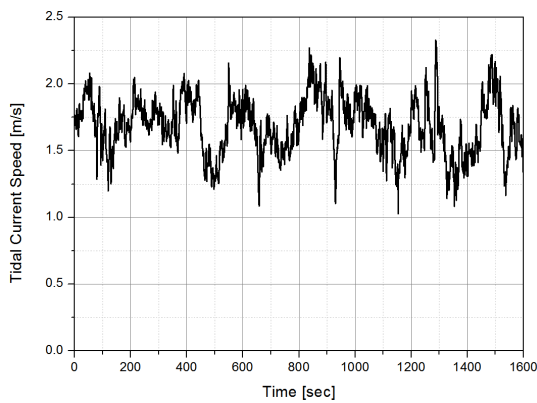


Fig. 15 Tidal current speed

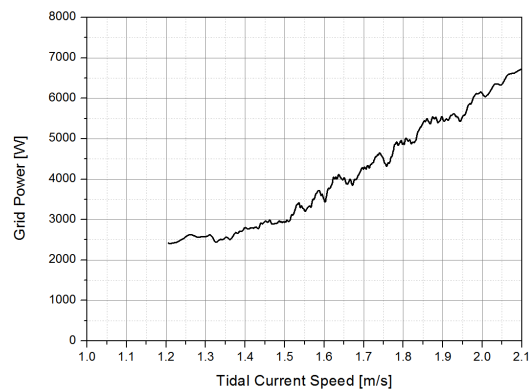


Fig. 17 MPPT(TSR=4.5) generated power

진도대교에서 시험소로 나가는 물을 낙조류(썰물)라 하며, 시험소에서 진도대교로 들어오는 물을 창조류(밀물)라 한다. 본 논문에서는 여건상 낙조류에서만 실험을 하였다. Fig. 14는 20kW급 조류발전 시스템을 제어하기 위한 전력변환장치이다. 발전기측은 2-레벨인버터로 구성되며, 계통측은 3-레벨 NPC컨버터로 구성되었다. TI사의 TMS320F28335를 사용하여 제어를 구성하였으며, 정확한 발전량을 측정하기 위해 Yokogawa사의 W1600 전력분석기를 사용하였다. Fig. 15는 유속계로 측정한 진도 울돌목의 실제 유속을 보여준다. 발전기는 유속 1.2m/s(Cut-in speed)에서 2.1m/s(Rated speed)사이에서 주로 운전되었다. Fig. 16은 계통측에서 측정한 발전량을 보여준다. 실제유속에 따라 발전하는 것을 볼 수 있으며, 약 30분동안 약 2kWh를 전력을 생산하는 것을 확인하였다. 따라서 연간 발전량은 35MWh이 될 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 17은 최적 주속비 4.5로 MPPT제어시 IEC기준을 참고하

여 10분 평균 발전량을 보여준다. Cut-in speed 1.2m/s에서 2.5kW 발전되며, Rated speed 2.1m/s에서 6.8kW발전되는 것을 볼 수 있다. Fig. 17에서 알 수 있듯이 최적 주속비를 이용하여 발전기 속도를 제어하였을 때 MPPT곡선을 따라 최대 전력점을 추종한다는 것을 볼 수 있다. 또한, 터빈효율은 37%로 나타났으며, 시스템 효율은 31%로 나타났으며 이는 초기목표치인 터빈효율 30%, 시스템효율 20%를 상회하는 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 전라남도 진도 울돌목의 유속정보를 바탕으로 시뮬레이션 및 실제 설치된 조류발전 시험소에서 실증 실험을 하였다. 최적 주속비를 이용하여 MPPT제어를 하였으며, 시뮬레이션 뿐만 아니라 실제 실험에서도 최대 전력점을 추종하는 것을 확인하였다. 또한 본 논문의 발전시스

템에서는 연간 발전량 35MWh를 생산하는 것으로 예측되었으며, 향후 목표인 200kW급 발전기로 발전하였을 경우 연간 350MWh를 생산할 수 있을 것으로 예측된다. 전국 기준 가정당 연평균 소비량을 3.3MWh로 볼 때, 이는 연간 106 가구의 전기를 담당할 수 있는 발전량이다. 향후 최적 주속비를 실시간으로 추정하여 MPPT 제어를 수행하는 등의 최적제어에 대한 연구와 함께 창조류시 발전에 대한 실험 및 결과 분석을 수행하여 최종목표인 200kW급 조류발전시스템 구축에 활용할 계획이다.

후 기

이 논문은 국토해양부 소관 연구개발사업인 능동제어형 조류발전 기술개발(20110171)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Kim, B.-G., Yang, C.-J., and Choi, M.-S., "A Study on the Performance of a 100 kW Class Tidal Current Turbine," *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 18, No. 2, pp. 145-152, 2012.
2. Keyhani, A., Marwali, M. N., and Dai, M., "Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems," John Wiley & Sons, 2009.
3. Ben, E., S., Benbouzid, M., and Charpentier, J. F., "Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status," *Proc. of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, pp. 1407-1412, 2007.
4. Yi, J.-H., Oh, S.-H., Park, J.-S., Lee, K.-S., and Lee, S.-Y., "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, 2013.
5. Abdullah, M., Yatim, A., and Tan, C.W., "A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy System," *Proc. of the IEEE International Conference on Clean Energy and Technology*, pp. 321-326, 2011.
6. Siegfried, H., "Grid, Integration of Wind Energy Conversion Systems," John Wiley & Sons, 2nd Ed., 2006.
7. Datta, R. and Ranganathan, V., "A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System," *Energy IEEE Transactions on Conversion*, Vol. 18, No. 1, pp. 163-168, 2003.
8. Egbert, G. and Ray, R., "Significant Dissipation of Tidal Energy in the Deep Ocean Inferred from Satellite Altimeter Data," *Nature*, Vol. 405, No. 6788, pp. 775-778, 2000.
9. Chinchilla, M., Arnaltes, S., and Burgos, J. C., "Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 130-135, 2006.
10. Schiemenz, I. and Stiebler, M., "Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator Used in a Variable Speed Wind Energy System," *Proc. of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives Conference*, pp. 872-877, 2001.
11. Miller, A., Muljadi, E., and Zinger, D. S., "A Variable Speed Wind Turbine Power Control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 12, No. 2, 1997.
12. Wang, L. and Liu, J.-H., "Dynamic Analysis of a Grid-Connected Marine-Current Power Generation System Connected to a Distribution System," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 4, pp. 1798-1805, 2010.
13. Bahaj, A., Batten, W., and McCann, G., "Experimental Verifications of Numerical Predictions for the Hydrodynamic Performance of Horizontal Axis Marine Current Turbines," *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 15, pp. 2479-2490, 2007.