

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 VIII

PHILS 기반 2 MW 급 조류발전시스템 특성 분석

PHILS-Based Characteristics Analysis of a 2 MW Class Tidal Current Power Generation System

고병수¹, 성해진¹, 박민원^{1,✉}, 유인근¹
Byeong Soo Go¹, Hae Jin Sung¹, Minwon Park^{1,✉}, and In Keun Yu¹

¹ 창원대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Changwon National Univ.)
✉ Corresponding author: paku@cwnu.ac.kr, Tel: +82-55-281-3150

Manuscript received: 2014.6.24 / Revised: 2014.7.17 / Accepted: 2014.7.18

In this paper, characteristics of a tidal current power generation system are analysis using power hardware-in-the-loop simulation (PHILS). A 10 kW motor generator set is connected to the real grid through a fabricated 10 kW back to back converter. A power control scheme is applied to the back to back converter. A 2 MW class tidal current turbine is modeled in real time digital simulator (RTDS). Generating voltage and current from the 10 kW PMSG is applied to a 2 MW class tidal current turbine in the RTDS using PHILS. The PHILS results depict the rotation speed, power coefficient, pitch angle, tip-speed ratio, and output power of tidal current turbine. The PHILS results in this paper can contribute to the increasing reliability and stability of the tidal current turbines connected to the grid using PHILS.

Key Words: Tidal Current Power Generation System (조류발전 시스템), Power Hardware-in-the-Loop System (PHILS), Control Scheme (제어장치), Real Time Digital Simulator (RTDS), Back to Back Converter (백투백 컨버터)

기호설명

P_{tide} = Power of tidal turbine (W)

T_m = Mechanical torque (N·m)

T_e = Electrical torque (N·m)

V_{tide} = Tidal current velocity (m/s)

ω = Angular velocity (rad/s)

R = Blade length (m)

A = Sectional area of tidal current turbine (m²)

C_p = Power coefficient

β = Pitch angle (degree)

ρ = Water density (kg/m³)

λ = Tip speed ratio

1. 서론

조류발전은 조류의 흐름이 빠른 곳을 선정하여 그 지점에 수차 발전기를 설치하고, 자연적인 조류의 흐름을 이용하여 설치된 수차 발전기를 가동시켜 발전하는 기술이다.¹

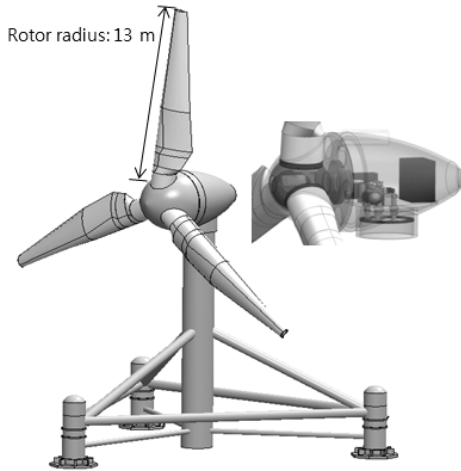


Fig. 1 Schematic diagram of tidal current turbine

조류발전은 조류가 빠른 지역에 발전장치를 설치해야 하기 때문에 적지 대상 해역이 제한적이며 조력발전과 같은 대규모의 적용이 어렵다. 조류발전의 큰 장점은 풍력이나 파력 등 타 대체에너지원에 비해 에너지 밀도가 높아 대규모 개발이 가능하고, 조석의 주기성으로 인하여 날씨 변화나 계절에 관계없이 발전량 예측이 가능한 신뢰성 있는 에너지원이다.²⁻⁵

본 논문에서는 real time digital simulator (RTDS) 내에서 시뮬레이션을 통한 조류발전시스템의 모델링과 정상상태 및 과도현상을 분석 후 최적의 알고리즘을 확보 및 maximum power point tracking (MPPT)를 포함한 제어 시스템을 적용 하였다. 그리고 10 kW급 조류발전용 전력변환장치와 motor-generator set (MG set), 인터페이스 시스템 등 하드웨어를 RTDS와 연계하여 운전특성평가를 통해 power hardware-in-the-loop simulation (PHILS)를 이용한 조류발전시스템 실험 방법을 개발하였다.

2. Design of a tidal current turbine

Fig. 1 은 일반적인 조류발전시스템의 개략도를 보여주고 있다. 조류발전시스템의 기본적인 원리는 조류의 흐름이 빠른 곳에 수차 발전기를 설치하고, 유체의 운동에너지를 이용하여 블레이드를 회전시켜 전기를 생산하는 시스템이다.

조류발전시스템에서 발전에 영향을 주는 조류의 운동에너지는 터빈의 블레이드 면적과 조류속도의 3제곱에 비례하게 된다. 조류의 운동에너지

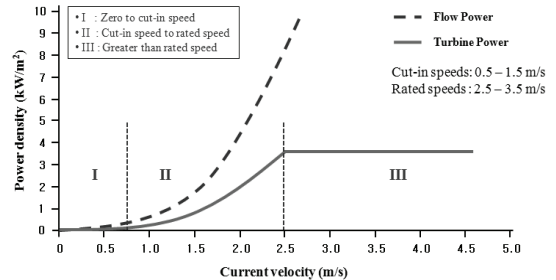


Fig. 2 Characteristics of output power according to current velocity

에서 터빈에 의해 전기적 에너지로 변환될 때 출력은 조류 속도의 세제곱에 비례하고 블레이드 길이의 5제곱에 비례한다. 이 때 출력에는 터빈의 에너지 변환 효율인 C_p 가 고려된다. 식(1)은 조류발전 시스템의 출력 특성에 관한 식을 나타낸다.^{6,7}

$$P_t = P \times C_p(\lambda, \beta) = C_p \left(\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{ides}^3 \right) \tag{1}$$

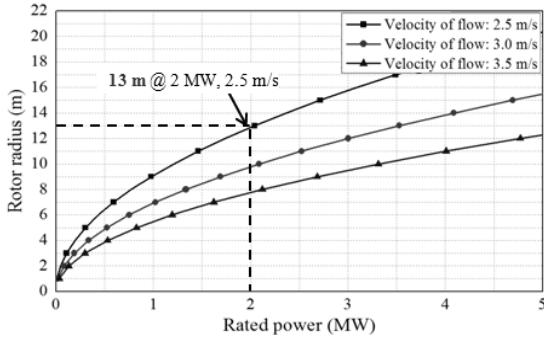
2.1 Basic design of a 2 MW tidal current turbine

Fig. 2는 조류속도에 따른 출력 특성을 나타낸다. 조류터빈은 조류 속도가 0.5 ~ 1.5 m/s (cut-in speed)일 때 블레이드가 회전하며 발전을 시작하게 되고, 2.5 ~ 3.5 m/s에서 정격 속도를 가지게 된다. 정격 속도 이상이 되면 블레이드의 피치 제어를 통하여 출력을 정격 이상이 되지 않도록 출력을 유지 시켜주어야 한다. 이 때 조류터빈의 블레이드의 길이와 회전속도는 식(2)와 (3)을 통해 구해진다.

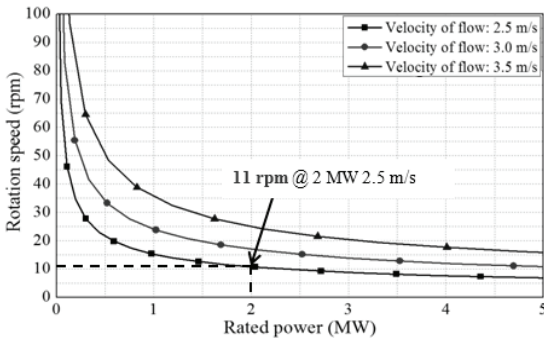
$$R = \sqrt{\frac{2 \times P}{\pi \times C_p \times \rho \times V_{ide}^3}} \tag{2}$$

$$RPM = \frac{30 \times \omega_{blade}}{\pi} = \frac{60 \times \lambda \times V_{ide}}{2 \times \pi \times R} \tag{3}$$

적용되는 정격 조류속도가 2.5 m/s, 출력계수가 0.48일 때 2 MW급 조류발전 시스템의 블레이드 길이 및 로터 회전속도는 13 m, 11 rpm이 된다. 발전기의 출력에 따른 블레이드 길이 및 회전 속도는 Fig. 3에 나타내고 있다. 발전기 블레이드 길이의 경우 물의 밀도가 1,025 kg/m³으로써 공기의 밀도가 1.225 kg/m³인 것에 비해 840배 높기 때문에 정격 조류 속도가 2.5 m/s로 풍속에 비해 낮지만



(a) Rotor radius depending on the rated power



(b) Rotation speed depending on the rated power

Fig. 3 Characteristics of tidal current turbine

블레이드의 길이가 작아도 높은 출력을 낼 수 있다. 1 MW 급의 동일한 용량의 조류 터빈과 풍력 터빈의 블레이드 길이를 비교해 보았을 때 길이가 3배 이상 줄어든다.^{8,9}

기본적인 조류발전 시스템의 데이터를 기반으로 2 MW급 조류 발전 시스템을 설계하였을 때, 블레이드 길이 13 m, Tip speed ratio 5.93, 최대 출력 계수(Cp) 0.48, 정격 회전속도 1.15 rad/s (11 rpm), 정격 토크 1.73 M·Nm로 설계된다.

2.2 Modeling of a 2 MW tidal current turbine using RTDS

RSCAD/RTDS 내에서 모델링 되는 조류발전 시스템의 요소는 식(4)-(7)을 기반으로 Tip speed ratio(λ), Power coefficient(Cp), Output power(P), Mechanical torque(T_m), Rotor speed(ω_r), Pitch control, MPPT control 이고 시간에 따라 실시간으로 변동하는 조류의 속도를 모델링 함. 실시간으로 변하는 속도는 조류 발전시스템의 정격 속도인 2.5 m/s를 기준으로 1~4 m/s 사이에서 속도가 변하도록 모델링 된다.

Table 1 Designed specifications of 2 MW tidal current turbine

Items	Values
Rated power	2 MW
Frequency	2.57 Hz
Number of poles	28
Gear ratio	1
Cp_maximum	0.48
Lamda_optimal	5.93
Length of blade	13 m
Tidal density	1,025 kg/m ³
Rated rotation speed	11 rpm

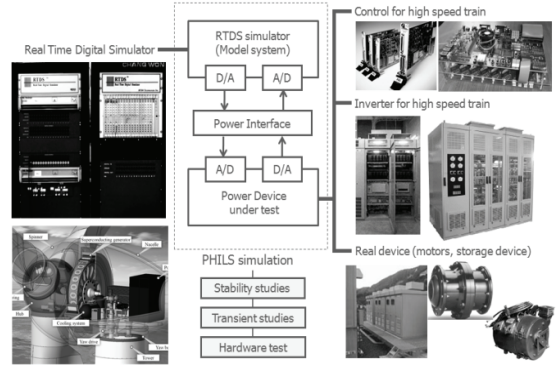


Fig. 4 Configuration of PHILS system

$$P_{tide} = 0.5 \times \rho \times \pi \times R^2 \times v_{tide}^3 \times C_p(\lambda, \beta) \quad (4)$$

$$\lambda(\text{Tip speed ratio}) = \frac{\omega_r R}{v_{tide}} \quad (5)$$

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (6)$$

$$T_m = \frac{P_{tide}}{\omega_r} \quad (7)$$

3. PHILS system

Power hardware-in-the-loop simulation (PHILS) 기법은 실제시스템과 시뮬레이션시스템 사이의 정보를 서로 주고받는 방법으로 시뮬레이션으로 구현하기 힘들거나 현재 보유하고 있는 실제 시스템으로 해석이 불가능한 대용량의 시스템을 해석하기 위해 사용되는 실험기법이다. 또한 실험결과 같은 소규모 공간에 설치하여 실험할 수 있으므로 실제

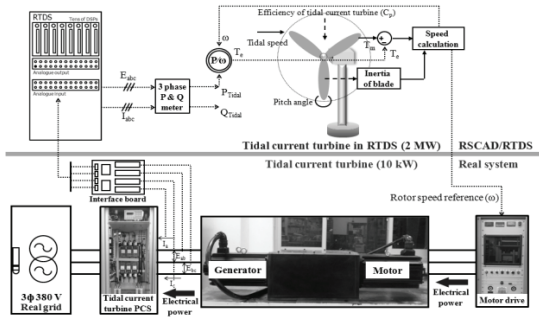


Fig. 5 Design diagram of PHILS system

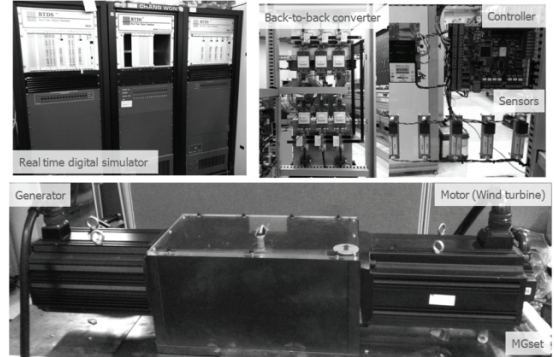


Fig. 6 Equipment build up for PHILS

Table 2 Relation with simulation and real system

Items	Simulation system	Real system
Rated power	2 MW	10 kW
Base voltage	690 V	220 V
Base current	1,043 V	16.36 A
Base impedance	0.6614 Ω	13.4474 Ω
Base angular velocity	1.152 rad/s (11 rpm)	157.08 rad/s (1,500 rpm)
Base torque	17.345 MNm	254.65 Nm

Table 3 Specifications of the back-to-back converter

Items	Values
Rated power	10 kW
Rated voltage	380 V
Rated current	15.15 A
Switching frequency	10 kHz
DC-link capacity	10,000 uF
DC-link voltage	650 V

시스템에 비해 협소한 공간에서도 실험이 가능하며 실제 시스템의 전기적인 신호에 의한 실시간으로 시뮬레이션이 가능하다는 장점을 가지고 있다.¹⁰

3.1 Configuration of a PHILS system

인터페이스 시스템은 컴퓨터, GTAI card, GTAO card, DSP board, Voltage and current sensor board, SMPS로 구성된다. 인터페이스 시스템의 기능은 모니터링, DSP 컨트롤, RTDS 컨트롤 및 신호 전달 등이며, 4개의 전압 신호와 8개의 전류 신호를 전달할 수 있다.

실제 시스템과 시뮬레이션 사이의 관계는 P.U. 법으로 정의 될 수 있다. 시뮬레이션에서 2 MW급 조류발전기의 로터 회전속도가 1.152 rad/s일 때 실제 10 kW급 조류발전 시스템의 로터 회전속도는 157 rad/s가 되고, 실제 시스템에서 토크가 254.65 N·m. 출력될 때, 시뮬레이션에서 1.73 MN·m이 출력된다.

3.2 Setting of fabricated back-to-back converter with MG set

PHILS 시스템에서 MG set, motor driver, back-to-back converter, RTDS, controller, sensor 등이 있으며, RSCAD/RTDS 내에서 시뮬레이션을 통해 모델링

Table 4 Specifications of the MG set

Items	Values
Motor rated power	10 kW
Motor rated speed	1,500 rpm
Generator rated power	10 kW
Generator rated speed	1,500 rpm
Generator type	PMSG

된 조류발전 시스템과 연계되었다.

MG set은 380 V/220 V 변압기, 380 V/380 V 변압기, 10 kW PMSG 2대, 모터 드라이버로 구성된다. 10 kW PMSG는 10 kW급 back-to-back converter를 통해 실제 계통과 연계되고, 이 때 MG set의 모터는 조류발전시스템의 블레이드와 같은 역할을 하게 된다. 실제 조류속도는 RTDS 내에서 모델링 되어 모터드라이버에 입력한다. 사용된 MG set은 PMSG 타입이고 사양은 정격용량이 10 kW, 정격 속도가 1,500 rpm이다.

4. PHILS results

Fig. 7은 변화하는 조류속도에서 조류발전시스템의 출력 및 특성을 나타내는 그림으로, 변화하는 조류 속도에서 실제 시스템(Hardware)에서 10

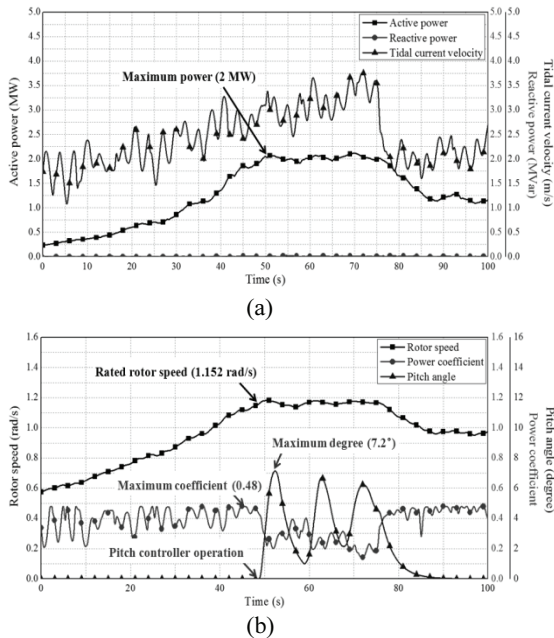


Fig. 7 Characteristic of tidal current turbine output power according to changing the tidal current velocity

kW의 출력이 될 때, RTDS 내에서 스케일 업 되어 2 MW급 조류발전시스템이 적용되는 시스템이다. 유효전력은 조류 속도가 정격 속도인 2.5 m/s 이상으로 올라갈 때 정격 2 MW 출력을 내게 되고 무효전력은 back-to-back converter의 제어를 통해 0으로 유지된다.

조류발전시스템의 최대 출력계수는 0.48, 로터 회전속도는 1.152 rad/s이고, 조류발전시스템이 정격 이상의 출력을 낼 때 피치가 동작함으로써 출력을 정격 이상 올라가지 않게 유지시켜 주는 특성을 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 PHILS 시스템을 구축하기 위하여 RSCAD/RTDS 내에서 시뮬레이션을 통한 조류발전시스템의 모델링과 제어 시스템을 적용 하였다. 그리고 10 kW급 조류발전용 back-to-back converter와 MG set, 인터페이스 시스템 등 하드웨어를 RTDS와 연계하여 운전특성평가를 통해 power hardware-in-the-loop simulation (PHILS)를 구성 하였다. 그 결과로 실시간으로 변화하는 조류 속

도가 인터페이스 시스템을 통해 MG set으로 전달 되어 변화하는 조류 속도에 따라 실제 시스템이 동작하도록 모의하였고, 출력되는 전력은 다시 인터페이스 시스템을 통해 RTDS에 모델링 되어있는 2 MW 조류 터빈에 적용되어 2 MW 조류발전기의 특성을 얻을 수 있었다. PHILS를 통해 얻은 2 MW 조류발전기의 특성결과는 실제 2 MW의 조류 발전기가 설치되고 계통에 연계될 때 안정성과 신뢰성을 높여주는데 기여할 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2013-2014 년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

REFERENCES

1. Bir, G. S., Lawson, M. J., and Li, Y., "Structural Design of a Horizontal-Axis Tidal Current Turbine Composite Blade," Proc. of the ASME International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering, pp. 1-12, 2011.
2. Fraenkel, P., "Power from Marine Currents," Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 216, No. 1, pp. 1-14, 2002.
3. Polinder, H., Van der Pijl, F. F., De Vilder, G.-J., and Tavner, P. J., "Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines," Proc. of the IEEE transactions on Energy conversion, Vol. 21, No. 3, pp. 725-733, 2006.
4. McDonald, A.S., "Structural Analysis of Low Speed, High Torque Electrical Generators for Direct Drive Renewable Energy Converters," Ph.D. Thesis, School of Engineering & Electronics, University of Edinburgh, 2008.
5. Jung, H., Lee, C.-G., Hahn, S.-C., and Jung, S.-Y., "Optimal Design of a Direct-Driven PM Wind Generator Aimed at Maximum AEP using Coupled FEA and Parallel Computing GA," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 552-558, 2008.
6. You, Y.-M., Lin, H., and Kwon, B.-I., "Optimal Design of a Distributed Winding Type Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator," Journal

- of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 69-74, 2012.
7. Maki, N., Takao, T., Fuchino, S., Hiwasa, H., Hirakawa, M., et al., "Study of Practical Applications of HTS Synchronous Machines," Proc. of the IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 2166-2169, 2005.
 8. Sung, H.-J., Kim, G.-H., Kim, K., Jung, S.-J., Park, M., et al., "Practical Design of a 10 MW Superconducting Wind Power Generator Considering Weight Issue," Proc. of the IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, No. 3, pp. 5201805-5201805, 2013.
 9. Kim, G.-H., Kim, N., Kim, K.-M., Park, M., Yu, I.-K., et al., "Emtdc based Simulation of 10 MW Class Grid-Connected Superconducting Wind Turbine Generator," Proc. of the IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, pp. 5202105-5202105, 2012.
 10. Kim, G.-H., Kim, J.-Y., Jeon, J.-H., Kim, S.-K., Kim, E.-S., et al., "Hardware-in-the-Loop Simulation Method for a Wind Farm Controller using Real Time Digital Simulator," Vol. 9, pp. 742-747, 2014.