Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 9 pp. 878~883, 2017
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
https://doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.9.878

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

자이로 파력발전용 저속 고 토크 6kW급 영구자석 동기발전기 설계

홍경표[1] · 강규홍[2] · 이선권†

(Received August 24, 2017 ; Revised September 20, 2017 ; Accepted September 22, 2017)

Design of a 6kW permanent magnet synchronous generator with low speed and high torque for gyro wave power generation

Kyung-Pyo Hong[1] · Gyu-Hong Kang[2] · Sun-Kwon Lee†

요약: 선박은 운항이나 정박 시 해상파고의 영향으로 다양한 운동이 발생한다. 이 중 횡동요를 롤링이라 하며 선박의 복원성능에 큰 영향이 있다. 선박의 복원력을 향상하여 횡동요를 억제하는 방식 중 자이로 방식이 있다. 본 논문에서는 자이로 안정기의 짐벌의 세차 운동에 의한 각속도 및 이에 따라 발생한 토크에 의하여 발전기를 구동시켜 자이로 안정기의 플라이휠을 구동하는 전동기에 필요한 전력을 발전시키는 자이로 파력발전용 저속 고 토크 6kW급 영구자석 동기발전기 설계에 대하여 연구하였다. 해상 환경 및 자이로 파력 발전 시스템의 사양을 통한 발전기 설계 기본 요구 사양을 도출하여 설계 사양을 설정하였으며, 불규칙한 에너지원인 파력발전 특성을 고려한 발전기 특성 분석을 수행하였다. 최종 설계된 발전기의 설계 타당성 및 유한 요소 분석의 검증을 위해 시제품을 제작하고 성능 시험을 수행하였다.
주제어: 자이로 안정기, 파력, 영구자석 동기발전기, 횡동요, 세차 운동

Abstract: Ships are subject to movement due to the influence of maritime waves during operation or berth. Among them, rolling has a significant influence on the restoration performance of the ships. In this paper, the design of a 6kW class permanent synchronous generator with low speed and high torque to develop the electric power required for the motor that drives the flywheel of the gyro-stabilizer by driving the generator by the angular velocity caused by the gimbal's precessional motion of the gyrostabilizer and generated torque is studied. The design specifications are set out by deriving the basic design requirements of the generator through the specification of the marine environment and the gyro wave power generation system and than carried out the analysis of generator's characteristics considering irregular wave power energy. For validation of design and finite element method analysis of the generator, the generator is manufactured and performance test is carried out.
Keywords: Gyrostabilizer, Wave power, Permanent magnet synchronous generator, Rolling, Precessional motion

1. 서 론

오늘날 화석에너지의 고갈 및 환경 문제로 화석연료를 이용한 발전 방식을 대체하기 위한 새로운 발전 방식에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 다양한 에너지자원 중에서 지구의 3/4를 점유하고 있는 해양은 높은 관심에 비하여 아직까지 개발이 더디게 진행되고 있으며, 해양에너지원 중 파력에너지는 에너지 밀도가 큰 에너지 자원으로 3면이 바다인 대한민국의 특성을 고려하였을 때 해상에서 폭넓게 파력에너지 활용이 가능하다**[1][2]**.

선박의 횡동요 저감을 위한 안정화 시스템은 여러 가지 종류가 있다. 대형 선박은 좌우에 Ballast Tank를 설치하여 균형을 유지하고 능·수동 Anti roll tank나 Fin stabilizer를 이용하고 있다**[3]**. 중소형 레저선박의 경우 횡동요 억제를 통한 안정화를 위해 세차운동의 원리를 이용한 자이로 안정기 방식을 적용하고 있다**[4]**.

현재 소형 선박 및 해상 부유물에 설치되는 자세 안정화를 위한 자이로 안정기의 경우 파도에 의한 롤링이 발생하면, 자이로의 세차운동이 발생하고 자이로의 세차운동에 의하여 파도에 의한 롤링 모션을 억제하는 안정화 토크가 발생하여 자세 안정화를 실현시키게 된다.

본 논문은 기존 자이로 안정기에 발전기를 추가 구성하여 자이로 안정기의 플라이휠 구동에 소모되는 전력을 자가 발전을 하여 선박 및 부유식 해양 구조물의 소비 전력을 보상할 수 있는 자이로 파력발전용 저속 고 토크 6kW급 영구

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9675-8550): Korea Marine Equipment Research Institute, 24-20, 335-ro, Noksansandan, Gangseo-gu, Busan 46754, Korea, E-mail: sunkwonlee@komeri.re.kr, Tel: 051-400-5121
1 Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: kphong@komeri.re.kr, Tel: 051-400-5130
2 Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: kang@komeri.re.kr, Tel: 051-400-5110

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

자석 동기발전기 설계에 대하여 다루고자 한다. 선박 및 부유식 해양 구조물에 설치되는 협소한 설치 환경을 고려하여 출력 밀도가 높은 영구자석 동기발전기를 설계·개발 대상으로 선정하였으며, 출력 전압 특성이 매입형 영구자석 동기발전기에 비하여 정현적으로 발전을 시킬 수 있는 표면부착형 영구자석 동기발전기를 선정하였고, 파도에 의한 세차운동으로 발생하는 낮은 각속도 및 자이로 안정기의 소비전력을 고려하여 6kW급 다극 표면부착형 영구자석 동기발전기의 설계에 관한 연구를 본 논문에서 수행하였다.

본 논문에서는 자이로 파력 발전 시스템 구성에 대하여 고찰하고, 발전기의 설계 기본 요구 사양을 해상 환경에 따른 불규칙한 파력 에너지, 자이로 시스템 사양과 증속기어의 사양을 바탕으로 도출하였다. 결정된 발전기 기본 요구 사양을 만족하기 위한 설계 수순에 따라 설계 진행 및 자이로 파력발전용 발전기의 발전 운전 구간 및 해상 환경의 변화에 따른 발전기 입력 조건 변동을 고려하여 2kW, 4kW, 6kW급 발전 부하 조건에서의 100rpm~250rpm 운전 범위에 대한 해석을 수행 하였으며, 최종 설계된 발전기 모델에 대하여 성능 시험을 통하여 설계 및 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 발전기가 설치된 자이로 파력발전 시스템

Figure 1은 파력 에너지를 통하여 전력을 발전시키는 자이로 파력 발전 시스템에 대한 구성도이다. 자이로 파력 발전 시스템은 파도의 에너지에 의한 선박 및 부유식 해양 구조물의 횡동요 운동을 자이로 안정기에 설치된 플라이휠의 회전관성과 결합하여 짐벌의 세차운동이 발생하게 되고, 이 짐벌축에 설치된 증속 기어를 통해 회전 속도가 증속이 되고, 발전기를 구동할 수 있는 토크와 회전 속도가 발생됨에 따라 발전기로부터 발전 전력을 얻는 메커니즘으로 구성된다.

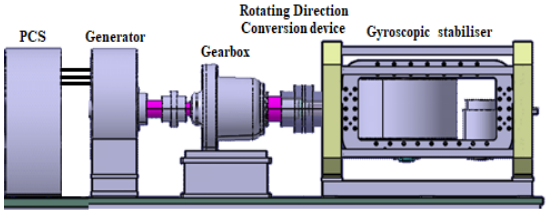


Figure 1: Wave power generation system with generator

3. 발전기 설계 사양 결정

3.1 자이로 파력 발전기 정격 용량

자이로 안정기 짐벌의 세차 축 회전 각속도 및 세차 축 회전 속도는 각각 **식 (1)** 및 **식 (2)**로 주어진다.

$$\omega_{prec} = \frac{\alpha \times \frac{\pi}{180^\circ} rad}{Average\ wave\ period} \tag{1}$$

$$N_{prec} = \omega_{prec} \times \frac{60}{2\pi} rpm \tag{2}$$

여기서 α는 1주기 당 세차 축 회전 각도를 나타낸다. 평균 파도의 주기를 4초, 자이로 세차 축 회전 반경을 120°로 고려한 자이로 안정기의 회전 각속도는 1.05rad/s로 결정 되며, 세차 축 회전 각속도를 회전 속도로 변환하면 10rpm이 된다. 증속기어의 증속비를 20 : 1(발전기 축 : 자이로 세차축)로 고려한 발전기 정격에서의 분당 회전수는 200rpm으로 결정된다. 세차 축 회전 속도 10rpm에서 세차 축 토크가 6032N·m 이상의 수준의 토크가 발생되도록 자이로 안정기를 구성하였으며 이는 증속 기어(20:1, 증속 기어 효율 95%)를 고려하면 발전기 구동 토크가 286.5N·m 이상으로 발전기 용량을 6kW급 수준으로 설계하여야 함을 나타낸다.

3.2 발전기 출력 전압

본 논문의 파력발전 시스템에 적용된 PCS의 정류기 출력 전압은 230Vdc ~ 650Vdc로 **식 (3)**에 따라 발전기 출력 상전압 실효값은 100V ~ 278V로 결정된다**[5]**.

$$V_{rms} = \frac{V_{dc}}{1.35\sqrt{3}} \tag{3}$$

여기서 V_{rms} 및 V_{dc}는 각각 발전기 출력 상전압 실효값 및 정류기 출력 전압이다. PCS장치의 입출력 과전압 범위는 최대 입출력 전압의 +10%의 전압까지 허용할 수 있도록 PCS장치는 설계 되어 있다**[6]**. 자이로 파력 발전용 발전기는 해상 환경의 영향으로 회전 속도가 일정하지 않다는 점을 고려하여 발전 가능 과속도(최고속도) 범위를 정격 속도 200rpm의 125% 수준의 250rpm까지 설정을 하였다**[7]**.

발전기의 발전 전압은 회전속도에 비례하기 때문에 과속도(최고속도) 250rpm에서의 발전기 출력 상전압 실효값이 278V라면, 발전기 정격 속도 200rpm에서 발전기 출력 상전압 실효값이 222V 수준으로 발전되도록 설계가 되어야 한다.

3.3 발전기 설계 기본 요구 사양

발전기는 자이로 안정기 짐벌의 세차 운동을 이용하여 운전되고 이에 따라 발전 전력을 얻는 메커니즘을 갖기 때문에 발전기가 자이로 짐벌의 세차 운동에 의하여 구동이 되는 특성 및 자이로 파력 발전 시스템을 감안하여 본 논문에서 설계·개발하는 발전기는 정격 회전 속도 200rpm에서 **Table 1**의 설계 기본 요구 사항을 만족하도록 설계되어야 한다.

Table 1: Basic required specification of generator at rated speed for gyro wave power generation

Basic requirement of 6kW class permanent magnet synchronous generator	
Rated output	Above 6kW
Rated speed	200rpm
Generator's shaft torque	Above 286.5N·m
Generated voltage [rms]	Above 222V
Generated current [rms]	Above 9.01A
Efficiency at rated condition	Above 91%

4. 발전기 설계

4.1 발전기 설계 수순

Figure 2는 본 논문에서 연구한 자이로 파력 발전기 설계 수순이다. 먼저 발전기의 기본 요구 사양을 해상 환경을 고려한 자이로 안정기 짐벌의 세차 운동에 의한 세차축 회전 속도 및 자이로 파력 발전 시스템을 감안하여 도출 후 **식 (4)**의 TRV(Torque per unit rotor volume)식을 적용하여 영구자석을 포함한 회전자 외경 및 적층 길이를 결정하였다**[8]**.

$$TRV = \frac{4T}{\pi D_r^2 L_{stk}} \tag{4}$$

여기서 T는 발전기 구동에 필요한 토크, D_r 및 L_{stk}은 각각 회전자의 외경 및 회전자 적층 길이이다.

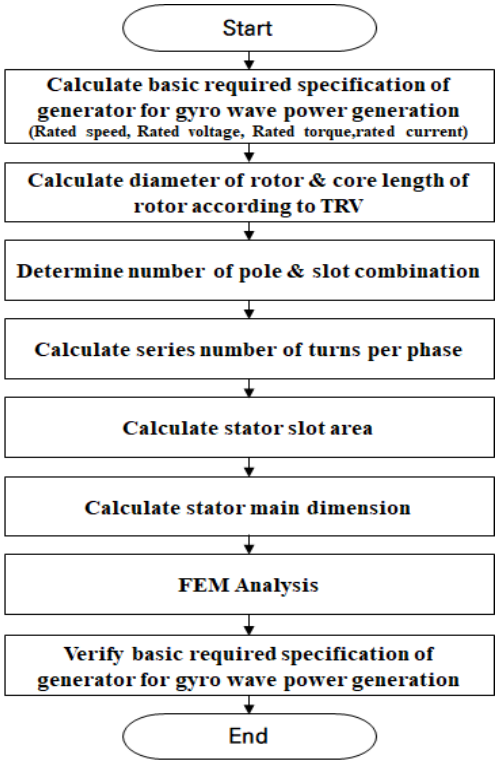


Figure 2: Design flow of gyro wave power generator

설계 수순에 따라 발전기의 회전자 외경 및 적층 길이를 선정하였고, 발전기가 저속에서 운전되는 특징을 고려하여 다극 발전기를 구성하였다. 회전자의 경우 외경은 영구자석의 두께를 포함하여 306mm와 적층길이는 170mm로 선정하였다. 극수 선정에 가장 중요한 요소로 발전기 발전 운전 구간 100rpm~250rpm을 고려하여 극수는 40극으로 선정하였으며, 이에 따른 슬롯 수는 극당 상당 슬롯수가 2/5구조를 가지는 48슬롯을 선정하였다. 이를 바탕으로 고정자, 회전자 치수와 형상 및 권선사양을 결정하였으며, 발전기 형상과 설계사양은 각각 **Figure 3**와 **Table 2**와 같다.

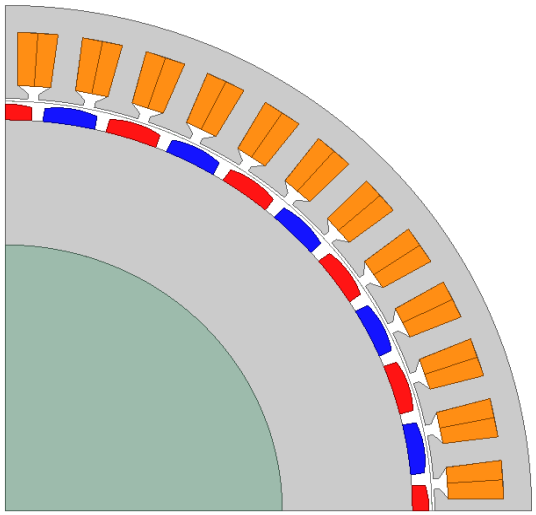


Figure 3: Design model

Table 2: Specification of basic design model

Contents	Value	Unit
Outer diameter of stator	380	mm
Outer diameter of rotoe	294	mm
Number of pole	40	Poles
Number of slot	48	Slots
Serial turns per phase	352	Turns

4.2 발전기 특성 해석

발전기의 성능 특성이 기본 요구 사양을 만족하는지 확인하기 위하여 상용 프로그램인 Maxwell을 이용하여 이차원 유한요소 해석을 통한 특성 해석을 진행하였다. 해석을 위한 모델링은 **Figure 3**와 동일하다.

Figure 4는 무부하 유도기전력 파형을 나타내며, **Table 3**은 발전기 A상 권선의 무부하 유도기전력 파형에 대한 FFT분석을 한 결과이다. 해석 파형과 FFT분석 결과를 보면 정현파에 가까운 무부하 유도기전력 파형이 확보됨을 알 수 있다. **Figure 4**의 E0는 무부하 유도기전력을 나타낸다.

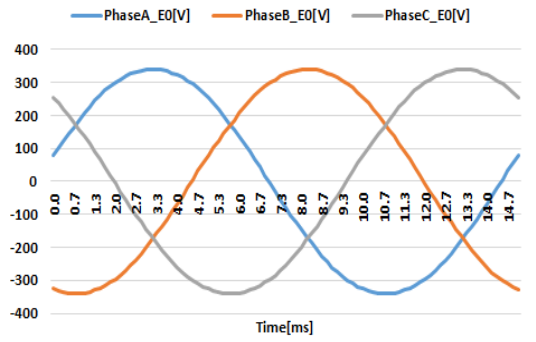


Figure 4: Induced electromotive force wave form at no load condition

Table 3: FFT of induced electromotive force at no load condition

$N^{th} Harmonics$	$E_0[V_{peak}]$
1	345.25
3	2.16
5	0.69
7	0.18
9	1.28
THD[%]	0.6

영구자석 동기발전기의 경우 부하 조건에 따라 전류가 인가되며, 이 때 고정자 권선의 저항 및 동기리액턴스 성분의 전압강하가 발생한다. 이로 인해 출력 전압은 강하하게 되고 발전기의 파라미터는 이를 고려하여 부하 시 특성이 만족되도록 설계하여야 한다. 이를 해석하기 위한 등가회로를 **Figure 5**에 나타내었고, **Figure 6**와 같이 외부회로로 모델링 하여 부하 해석을 수행하였다. 발전기의 정격 회전속도인 200rpm에서의 정격 용량 6 kW 조건에 대해 발전기 기본 요구 사양을 모두 만족함을 **Table 4**와 같이 해석적으로 검증하였다. **식 (5)**는 **Figure 5**의 발전기 한 상에 대한 등가회로의 지배방정식인 전압방정식을 나타낸다**[9]**.

$$V = E_0 - jX_s I_a - R_a I_a \tag{5}$$

여기서 V, E_0, X_s, I_a, R_a는 각각 발전 출력 전압, 유도기전력, 동기리액턴스, 상전류, 권선 저항을 나타낸다.

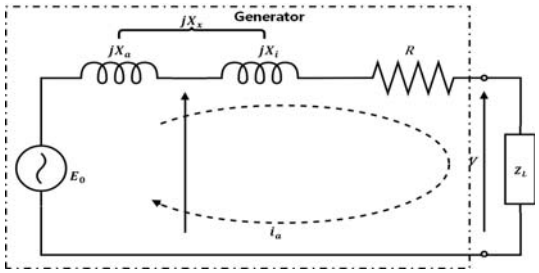


Figure 5: Equivalent circuit of generator

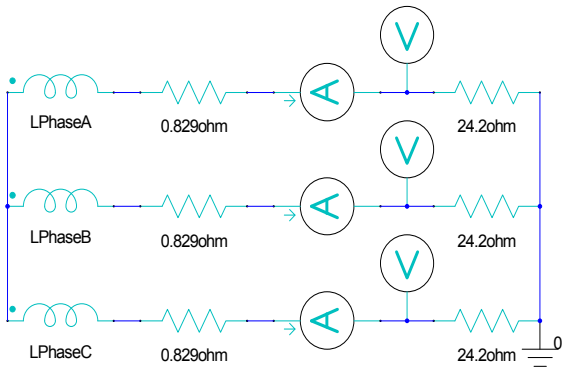


Figure 6: External circuit modeling

Table 4: Result of final model analysis value at load condition

Contents	Value	Unit
Generated voltage [rms]	226.2	V
Generator's shaft torque	318.2	N·m
Generated current [rms]	9.4	A
Output	6378.8	W
Copper loss	219.8	W
Iron loss	106.6	W
eddy current loss in permanent magnet	17.9	W
stray load loss	114.8	W
Input	6837.9	W
Output	93.29	%

파력발전의 경우 불규칙한 에너지원으로 다양한 속도의 운전 패턴을 가지게 된다. 이를 위해 회전속도에 따른 발전기 특성을 해석하였다. 발전기 회전수에 따른 부하별 출력 및 효율 특성은 **Figure 7**와 같다.

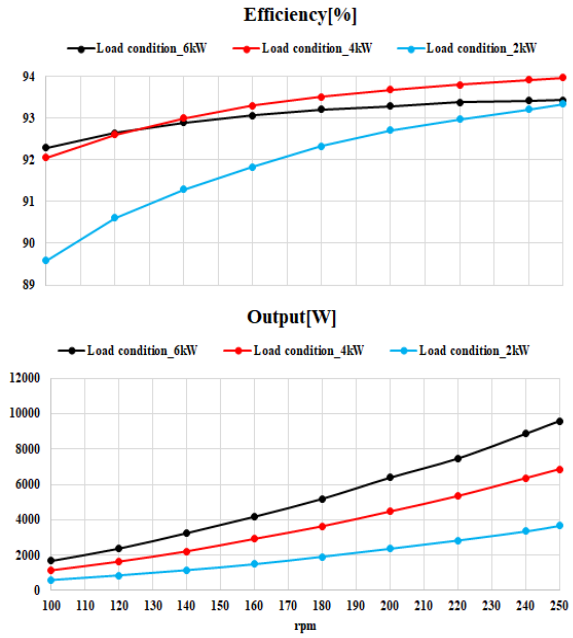
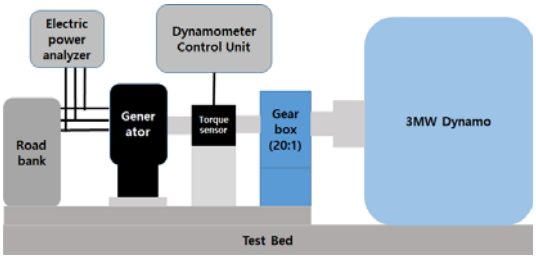


Figure 7: Graph of efficiency characteristics at variable speed and load condition

5. 시험 및 검증

설계된 발전기의 설계 타당성 및 유한 요소 해석 검증을 위해 시제품을 제작하고 성능 시험을 수행하였다. **Figure 8 (a)**는 제작된 발전기 및 시험 평가를 위하여 발전기와 다이나모미터 체결 사진이며 **Figure 8 (b)**는 성능 시험 구성도를 나타낸다.

(a)



(b)

Figure 8: (a) Manufactured SPMSG and test dynamometer (b) Test Configuration diagram

5.1 무부하 유도기전력 측정

Figure 9는 발전기 무부하 유도기전력을 오실로스코프로 측정한 파형이다. **Table 5**는 발전기 정격 회전수인 200rpm에서의 발전기의 무부하 유도기전력의 해석 값과 시험 값을 비교한 결과이다.

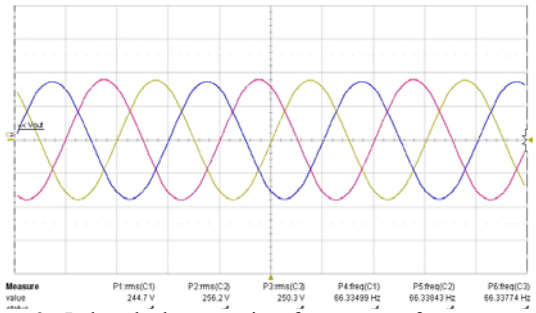


Figure 9: Induced electromotive force wave form at no load condition

Table 5: Induced electromotive force value at no load condition

Contents	Analysis Value	Test Value	Unit
Induced electromotive force	244.2	247.5	V

5.2 부하 성능 시험

발전기의 출력 및 효율 측정 시험은 국제 규격인 IEC60034-2-1의 직접 측정 방식에 따라 시험을 수행하였다. 발전기는 구동기와 직결되고 토크센서를 통해 토크와 회전수가 측정되어 입력량이 측정된다. 저항 부하에 따라 출력되는 전력량을 계측하여 효율을 측정하였다.

Table 6: Comparison table of analysis and test result at load condition

Contents	Analysis Value	Test Value	Unit
Generated voltage [rms]	226.2	230.5	V
Generated current [rms]	9.4	9.6	A
Output	6378.8	6646.1	W
Input	6837.9	7115.8	W
Efficiency	93.29	93.39	%

Table 6은 정격 조건인 6kW 부하 조건 및 회전속도 200rpm에서의 발전기 해석 값과 시험 값을 비교한 것이며, 설계 기본 요구 사양을 초과 만족하는 결과를 얻었고, 발전 전압은 해석과 시험 값의 비교 결과 1.9%, 발전 전류는 2.1%, 출력은 4.2%, 효율은 0.1%의 오차로 높은 정확도를 보이며 최종 설계된 발전기의 설계 타당성 및 유한 요소 해석의 신뢰도가 높음을 검증하였다.

Figure 10은 불규칙한 해상 환경에 의한 파력 발전 특성을 파악하기 위하여 100~250rpm 및 부하 조건별 출력과 효율 특성에 대한 시험 결과이다.

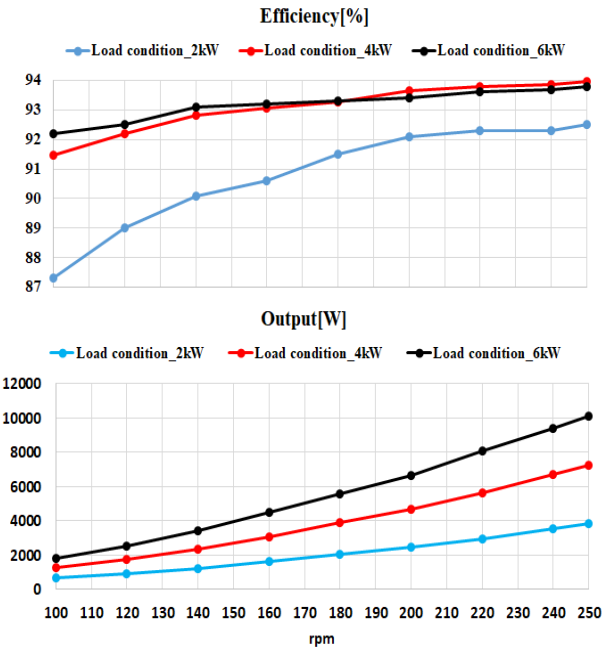


Figure 10: Test result of performance characteristics according to variable speed and load condition

Figure 10에 표기된 Load condition의 값 (2kW, 4kW, 6kW)은 로드뱅크를 통한 부하 조건을 나타낸다. 정격 회전수와 출력 부근에서 높은 효율을 나타내고 있고, 경 부하조건인 2kW 부하 조건의 저속 구간에서는 하락이 불가피 하지만 회전속도 140rpm 이상 조건에서 90% 이상의 효율을 달성한 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 기존 자이로 안정기에 발전기를 추가 구성하여 자이로 안정기의 플라이휠 구동에 소모되는 전력을 자가발전을 하여 선박 및 부유식 해양 구조물의 소비 전력을 보상하고 추가로 전력을 저장할 수 있는 자이로 파력 발전 시스템에 적용되는 자이로 파력발전용 저속 고 토크 6kW급 영구자석 동기발전기 설계에 대하여 다루었다. 해상 환경 및 자이로 시스템의 사양을 통하여 발전기 정격 용량, 발전 전압, 발전 전류, 정격 속도의 설계 기본 요구 사양을 도출하였고, 과속도 기준을 제시함으로써 발전기 발전 운전 구간을 선정하였다. 파력 발전기 기본 요구 사양을 만족하기 위한 설계 수순을 통한 발전기 설계를 진행한 후 불규칙한 해상 환경에 의한 파력발전 특성을 파악하기 위하여 발전 운전 구간인 100~250rpm 및 2kW, 4kW, 6kW급 발전 부하 조건에서의 발전기 특성을 유한요소 해석을 통하여 수행하였고, 해석 조건과 동일한 부하 및 운전 속도 조건에서 시험 평가를 수행하여 발전기 출력 및 효율 특성을 검증하였다. 발전기 정격 조건인 6kW 부하조건 및 회전속도 200rpm에서의 해석 값과 시험 값의 비교 분석한 결과 설계 기본 요구 사양을 초과 만족하는 결과를 얻었고 발전 전압은 해석과 시험 값의 비교 결과 1.9%, 발전 전류는 2.1%, 출력은 4.2%, 효율은 0.1%의 오차로 높은 정확도를 보이며 최종 설계된 발전기의 설계 타당성 및 유한 요소 해석의 신뢰도가 높음을 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20153030071770)

References

[1] J. S. Park, B. J. Hyon, J. B. Yun, J. Lee, J. Y. Choi, J. S. Choi, and K. Y. Hong, “Vector control for wave power generation system using permanent magnet linear synchronous generator," Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, vol. 19, no. 2, pp. 120-128, 2016 (in Korean).

[2] H. C. Lee, K. S. Yea, S. I. Hwang, and K. B. Han, “Study on the buoy and vibration system in broadband ocean wave power generator”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 6, pp 780-787, 2012 (in Korean).

[3] T. Perez and M. Blanke, “Ship roll damping control,” Annual Reviews in Control, vol, 22, no. 1, pp 129-147, 2012.

[4] H. A. Richard, “Gyrostabilizer for small boat,” United states Patent, 2007. US20050076726, October 4, 2004.

[5] .E. C. Rho, Power Electronics : Mununddang, 1997.

[6] Korea Samart Grid Association, “Performance requirements of power converters for electrical energy storage systems,” korea Samart Grid Association standard, SPS-SGSF-025-4-1972, pp. 16-17, 2016.

[7] KR Rulse for the classification of steel ships, Part 6 Electrical Equipment and Control Systems, Ch1 Electrical Equipment p. 23

[8] J. R. Hendershot, Jr. and T. J. E. Miller, Design of Brushless permanent-Magnet Motors : Oxford University Press, 1994.

[9] J. Lee, “Electric Machinery” HONGRUNG PUBLISHING COMPANY, pp. 435-436, 2012.