

자이로 파력발전기 운전 특성 개선 설계

홍경표¹ · 이선권² · 김성안³ · 백상현⁴ · 강규홍[†]

(Received September 17, 2018 ; Revised November 13, 2018 ; Accepted November 13, 2018)

Design improvement for operation characteristics of gyro wave power generator

Kyung-Pyo Hong¹ · Sun-Kwon Lee² · Sung-An Kim³ · Sang-Hyeon Back⁴ · Gyu-Hong Kang[†]

요약: 선박은 운항이나 정박 시 해상파고로 다양한 운동이 발생된다. 선박에 작용하는 횡동요는 선박의 복원성능에 큰 영향이 있으며 횡동요를 억제하여 선박의 복원력을 향상시키는 방식 중 자이로 방식이 있다. 본 논문에서는 자이로 안정기 짐벌의 세차 운동으로 발생하는 각속도 및 안정화 토크로 구동 되는 특성을 가진 파력발전기 설계 및 불규칙한 운동에너지인 파력 특성을 고려한 파력발전기 운전 특성 개선 설계에 대하여 연구하였다. 영구자석형 발전기는 슬롯과 치의 구조 및 영구자석의 형상에 의하여 코깅토크가 필연적으로 발생하며, 코깅토크는 자이로 안정기 짐벌의 세차 운동 부하로 작용하며 발전기 운전 중 진동과 소음을 발생시켜 발전기 운전 특성을 저하시키는 원인이 되므로 코깅토크 저감이 필요하다. 본 논문에서는 코깅토크 저감을 통한 6kW급 저속 고투크 파력 발전용 영구자석 동기발전기 운전 특성 개선 설계에 대한 연구를 수행하였다. 최종 설계된 발전기의 유한 요소 해석 및 설계 타당성 검증을 위해 시제품을 제작하고 성능 시험을 수행하였다.

주제어: 자이로 안정기, 파력, 발전기, 코깅토크

Abstract: Ships are subject to various movements due to maritime waves during operation or berth. A gyro system is installed in the ships, which influences the restoration performance of the ship where the rolling is minimized to improve the restoration force. Herein, the wave generator design was studied along with angular velocity and torque generated by motions of gyro gimbal. Furthermore, the generation characteristics design was improved by considering irregular kinetic energy wave characteristics. In the permanent magnet generator, cogging torque is inevitably generated due to slot, tooth structure, and shape. It is necessary to reduce the cogging torque because it acts as a load to the gyro gimbals and creates vibration and noise while the generator operates. In this paper, we worked on reducing the cogging torque by improving the permanent magnet design for 6 kW class low-speed and high-torque wave power generation. For analysis and design validation of the final generator design, a prototype was manufactured and performance tests were performed.

Keywords: Gyrostabilizer, Wave power, Generator, Cogging torque

1. 서론

최근 화석에너지의 고갈 및 환경 문제를 해결하기 위한 새로운 발전 방식에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 선박 및 해상 부유물이 운항이나 정박 시 해상파고로 다양한 운동이 발생되며 선박에 작용하는 횡동요는 선박의 복원성능에 큰 영향이 있고 횡동요를 억제하여 선박의 복원력을 향상시키는 방식 중 자이로 방식이 있다.

자세 안정화를 위한 자이로 안정기는 파도에 의해 횡동요가 발생하면 자이로 안정기의 짐벌의 세차 운동이 발생

하여 선박 및 해상 부유물의 자세 안정화를 실현시키게 된다[1]-[3]. 자이로 안정기에서 짐벌의 세차 운동이 발생되는 매커니즘을 응용하여 발생하는 회전속도 및 안정화 토크를 이용하여 자이로 안정기에 설치된 플라이휠 전기 구동시스템의 소비전력을 자가 발전하여 사용할 수 있는 자이로 파력발전 시스템을 구성하였다[2].

본 논문에서는 해상 환경에 따른 불규칙한 파력 에너지와 자이로 시스템 사양을 통해 자이로 파력발전 시스템의 파력발전용 저속 고투크 6kW급 영구자석 동기발전기 설

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9036-3715>): Devison President, Ulsan Headquarters, Korea Marine Equipment Research Institute, 5, Techno saneop-ro 55 beon-gil, Nam-gu, Ulsan, 44776, Korea, E-mail: kang@komeri.re.kr, Tel: 052-280-9901

1 Team Manager, Electric Power Machinery Team, Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: kphong@komeri.re.kr, Tel: 052-280-9922

2 Center Director, International Explosion Proof Center, Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: sunkwonlee@komeri.re.kr, Tel: 052-280-9911

3 Senior Researcher, Electric Power Machinery Team, Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: sakim@komeri.re.kr, Tel: 052-280-9923

4 Researcher, Electric Power Machinery Team, Korea Marine Equipment Research Institute, E-mail: hyeon@komeri.re.kr, Tel: 052-280-9924

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.

계 사양을 도출하였고 결정된 설계 사양을 만족하기 위한 기본 설계를 수행하고 자이로 안정기 짐벌의 세차 운동의 부하 증대 및 발전기 운전 중 진동과 소음을 발생시켜 발전기 운전 특성을 저하시키는 코깅토크 저감을 통한 운전 특성 개선 상세 설계를 수행하였다. 발전운전 구간 및 해상 환경의 변화에 따른 발전기 입력 조건 변동을 고려하여 가변 발전 부하 및 운전 속도 조건에 대한 해석을 수행하였으며, 최종 설계된 발전기 모델에 대하여 성능 시험을 통하여 설계 및 유한 요소 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 자이로 파력발전 시스템

Figure 1은 자이로 파력발전 시스템 구성도이다. 해상과 고로 선박이나 해상 부유물에 횡동요가 발생되면 자이로 안정기 플라이휠의 회전관성과 결합하여 짐벌의 세차운동이 발생되고 세차운동을 단방향 회전 운동으로 전환시켜주는 정역변환장치와 요구 발전 전력을 발생 시킬 수 있도록 회전속도를 증속해주는 증속기 및 전력을 발전하는 발전기, 불규칙한 파력에 의한 불규칙한 발전 전력을 안정적인 전력으로 변환하기 위한 전력변환기로 구성된다[2].

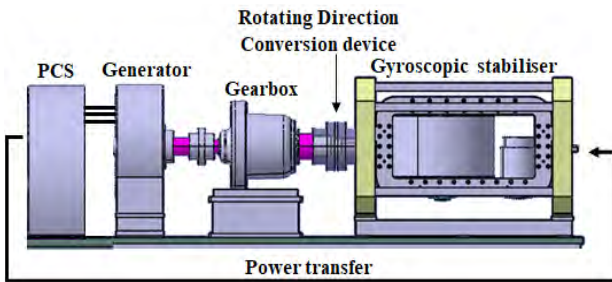


Figure 1: wave power generation system

3. 발전기 설계 사양 결정

3.1 자이로 파력발전기 정격 사양 결정

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

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

$$N_{prec} = \omega_{prec} \times \frac{60}{2\pi} rpm \quad (2)$$

여기서 평균 파도의 주기를 4초, 자이로 세차 축 회전 반경을 120°로 고려한 자이로 안정기의 회전 각속도는 1.05rad/s로 결정되며, α는 1주기 당 세차 축 회전 각도를 나타낸다. 세차 축 회전 각속도를 회전 속도로 변환하면 10rpm이 되며 증속기의 증속비를 20 : 1(발전기 축 : 자이로 세차 축)로 고려한 발전기 정격에서의 분당 회전수는 200rpm으로 결정된다. 자이로 파력발전 시스템에 적용된 전력변환

장치의 정류기 출력 전압은 230Vdc ~ 650Vdc로 식 (3)에 따라 발전기 출력 상전압 실효값은 100V ~ 278V로 결정된다[2][4].

$$V_{rms} = \frac{V_{dc}}{1.35\sqrt{3}} \quad (3)$$

여기서 V_{rms} 및 V_{dc} 는 각각 발전기 출력 상전압 실효값 및 정류기 출력 전압이다. 전력변환기의 입/출력 과전압 범위는 최대 입/출력 전압의 +10%의 전압까지 허용할 수 있도록 설계 되어 있다[5]. 자이로 파력발전용 발전기는 불규칙한 해상 환경의 영향으로 회전 속도가 일정하지 않다는 점을 고려하여 발전 가능 과속도(최고속도) 범위를 정격 속도 200rpm의 125% 수준의 250rpm까지 설정을 하였다[6].

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 발전 전압 설계 사양이 결정된다. 세차 축 회전 속도 10rpm에서 세차 축 토크가 6032N·m 이상의 토크가 발생되도록 자이로 안정기가 설계되어 있으며, 이는 증속기(증속 기 효율 95% 고려)를 고려하면 발전기 구동 토크가 286.5N·m 이상으로 발전기 용량을 6kW급 수준으로 설계가 되어야 된다[2].

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. 파력발전기 기본 설계

4.1 파력발전기 설계 수준

Figure 2는 파력발전기 설계 수준이다. 파력발전기의 설계 사양을 해상 환경 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 정하였다[2][7].

$$TRV = \frac{4T}{\pi D_r^2 L_{stk}} \quad (4)$$

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

설계 수준에 따라 발전기의 회전자 외경 및 적층 길이를

각각 306mm와 적층길이는 170mm로 선정하였다. 발전 운전 구간 100rpm ~ 250rpm을 고려하여 극수는 40극으로 선정하였으며, 슬롯 수는 극당 상당 슬롯수가 2/5구조를 가지는 48슬롯을 선정하였다. 극수/슬롯수 조합으로 고정자, 회전자 치수와 형상 및 권선사양을 결정하였으며, 발전기 설계 사양은 Table 2와 같다.

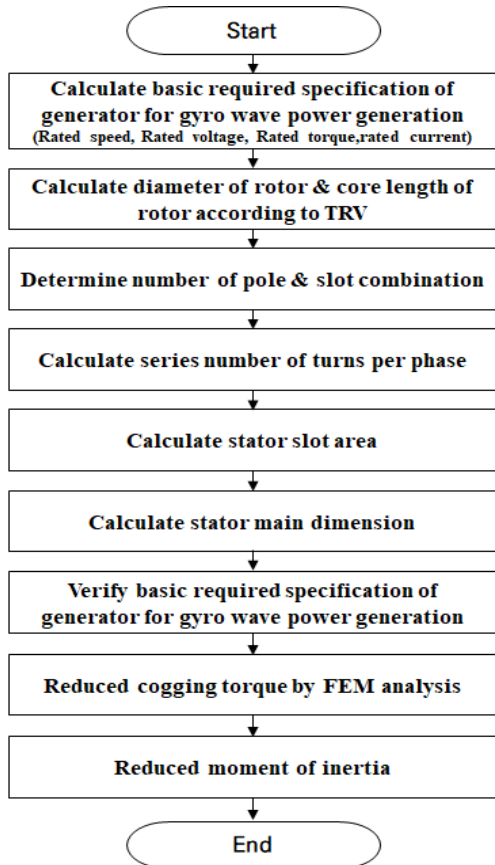


Figure 2: Design flow of gyro wave power generator

Table 2: Specification of basic design model

Contents	Value	Unit
Outer diameter of stator	380	mm
Outer diameter of rotor	294	mm
Number of pole	40	Poles
Number of slot	48	Slots
Serial turns per phase	352	Turns
Number of parallel connection	4	-

4.2 기본 설계 모델 특성 해석

과력발전기 기본 모델의 무부하 코깅토크는 해석 결과 15.08N·m 발생하였으며 운전 특성 개선을 위해 상세설계에서 저감 설계 진행이 필요함을 확인하였다. Table 3은 무부하 유도기전력 파형에 대한 FFT 분석을 한 결과이다. FFT 분석 결과 3차 고조파 성분이 다른 차수 고조파 성분에 비

하여 다소 많이 발생됨을 확인 하였으며 이는 발전기의 권선이 공간적으로 3상 평형하게 시행되어 있고 발전 전압이 3상 평형하게 발생이 된다면 큰 문제가 되지 않지만 그렇지 않다면 발전기 특성에 영향을 주기 때문에 상세 설계에서 개선의 필요성을 확인하였다. 무부하 유도기전력의 THD는 1.0%로 검토 되었다[2].

Figure 3와 같이 발전기 권선 회로에 외부 부하 회로를 구성하여 부하 해석을 수행한 결과 Table 4와 같이 발전기 요구 사양을 만족하는 해석 결과가 도출되었다.

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

N^{th} Harmonics	$E_0 [V_{peak}]$
1	360.06
3	9.96
5	1.06
7	0.36
9	1.55

THD[%]	1.0%
--------	------

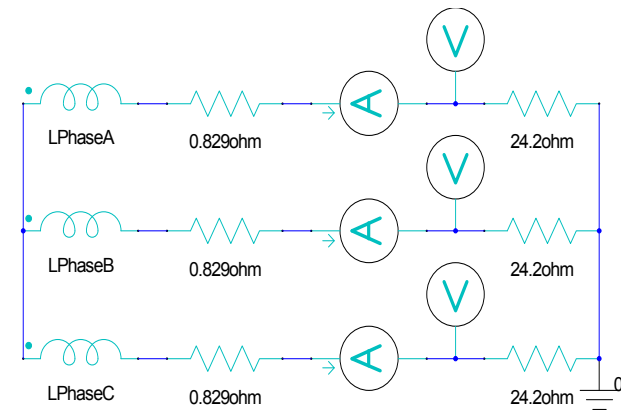


Figure 3: External circuit of basic design model

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

Contents	Value	Unit
Generated voltage[rms]	236.3	V
Generator's shaft torque	350.8	N·m
Generated current[rms]	9.8	A
Output	6950.2	W
Copper loss	297.2	W
Iron loss	119.2	W
Eddy current loss in permanent magnet	23.0	W
stray load loss	125.1	W
Input	7514.6	W
Output	92.5	%

5. 파력발전기 운전 특성 개선 상세 설계

5.1 코깅토크 저감 설계

코깅토크는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{cogging} = -\frac{\partial W_{fm}(\Phi, \theta)}{\partial \theta} = -\frac{1}{2} \Phi^2 \frac{\partial R_g}{\partial \theta} \quad (5)$$

여기서 W_{fm} , Φ , R_g 는 각각 공극에서의 자기에너지, 공극 자속, 공극의 자기저항을 나타낸다[8].

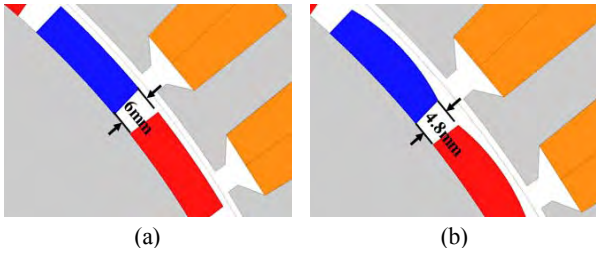


Figure 4: (a) Magnet shape of basic model (b) Magnet shape of final model

Figure 4는 기본 모델의 영구자석 형상과 최종 모델의 영구자석 형상을 나타내며, 영구자석의 자극면을 가공하여 회전자가 회전함에 따라 공극에서의 자기저항의 변화에 따른 자기에너지의 변화를 최대한 억제하는 방식을 채택하여 코깅토크 저감 상세 설계를 수행하였다. Figure 6은 영구자석의 자극면 가공의 정도에 따른 코깅토크 저감, 무부하 유도기전력에 대한 THD 저감, 출력의 저감 및 효율의 증대의 추세를 나타낸다. 영구자석 가공의 정도가 1.5mm를 초과하게 되면 출력이 6kW 이상을 만족할 수 없는 것으로 해석적 검토가 되어 최종 자극면 가공을 1.2mm일 때를 영구자석 최적 형상으로 결정하였다.

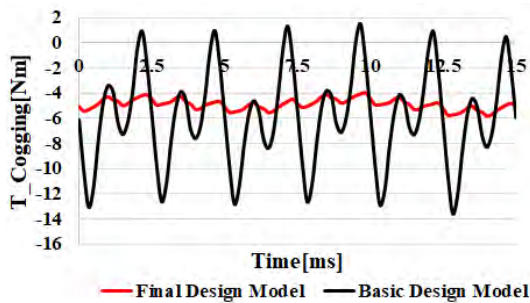


Figure 5: Comparison graph of cogging torque of basic design model and final design model

Figure 5는 최종모델의 무부하 코깅토크 파형과 기본 모델의 무부하 코깅토크 파형을 비교한 것으로 최종 모델의 코깅토크는 1.83N·m으로 기본 설계 모델 15.08N·m 대비 87.9% 저감됨을 확인하였으며 이는 자이로 안정기의 세차

운동에 부하로 작용하는 코깅토크가 상세 설계를 통하여 충분히 저감되었음을 나타낸다.

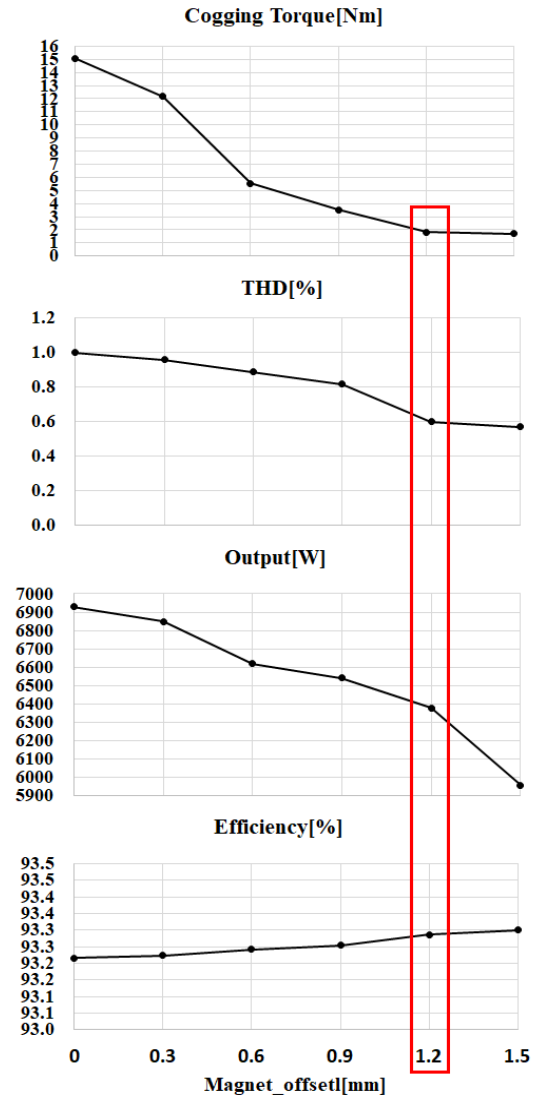


Figure 6: Optimal design results for the variation of cogging torque according to magnet offset

5.3 파력발전기 최종 모델 특성 해석

Figure 7의 파력발전기 최종 모델의 특성 해석을 진행하였다. Table 5는 발전기 A상 권선의 무부하 유도기전력 파형에 대한 FFT분석 한 결과로 THD가 0.6%로 정현파에 가까운 무부하 유도기전력 파형이 확보됨을 알 수 있다. Figure 3와 동일한 외부회로를 구성하여 부하 해석을 수행하였고 발전기의 정격 회전속도인 200rpm에서의 정격 용량 6 kW 조건에 대해 발전기 기본 요구 사양을 모두 만족함을 Table 6와 같이 해석적으로 검증하였다. 불규칙한 운전 특성을 고려하여 가변 속도 및 부하 조건에서의 출력 및 효율 특성에 대한 해석 결과는 Figure 8와 같다.

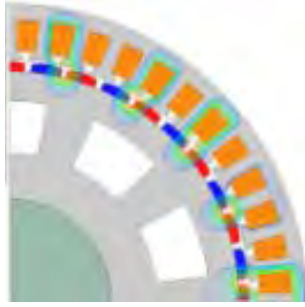


Figure 7: Final design model

Table 5: 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

Table 6: 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	%

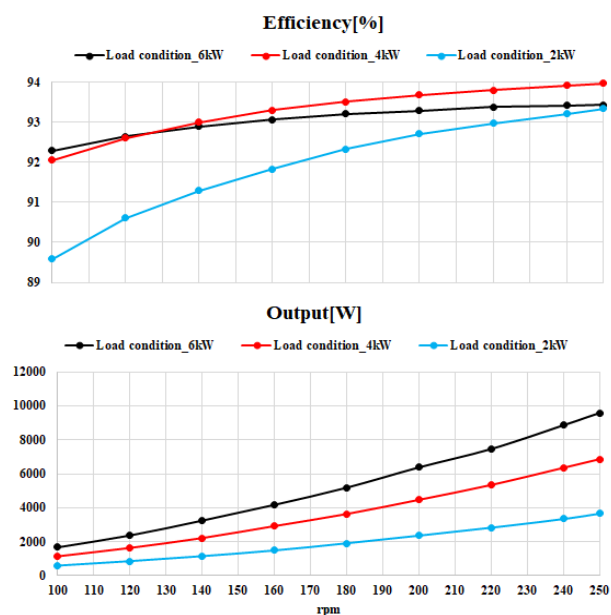


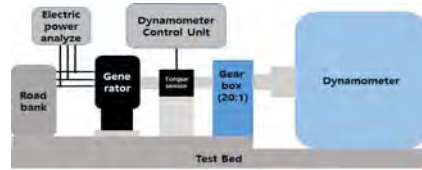
Figure 8: Graph of efficiency characteristics at variable speed and load condition

6. 시험 및 검증

과력발전기의 설계 타당성 및 유한 요소 해석 검증에 의해 시제품을 제작하고 Figure 9와 같이 성능 시험을 수행하였다.



(a)



(b)

Figure 9: (a) Manufactured SPMSG and test dynamometer (b) Test Configuration diagram

6.1 무부하 유도기전력 측정

Figure 10은 과력발전기 무부하 유도기전력을 측정한 파형이다. Table 7은 발전기 정격 회전수인 200rpm에서의 과력발전기의 무부하 유도기전력의 해석 값과 시험 값을 비교한 결과이다.

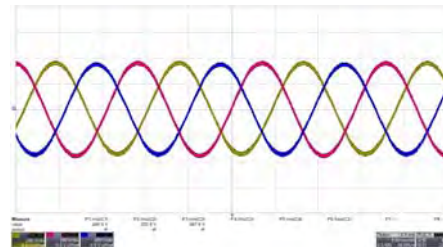


Figure 10: Induced electromotive force wave form at no load condition

Table 7: Induced electromotive force value at no load condition

Contents	Analysis	Test	Unit
Induced electromotive force	244.2	250.4	V

6.2 부하 성능 시험

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

Table 8은 정격 조건인 6kW 부하 조건 및 회전속도 200rpm에서의 발전기 해석 값과 시험 값을 비교한 것이며, 설계 요구 사양을 초과 만족하는 결과를 얻었고, 발전 전압

의 해석과 시험 값의 비교 결과 2.4%, 발전 전류는 1.1%, 출력은 1.3%, 효율은 0.4%의 오차로 최종 설계 제작된 파력발전기의 설계 타당성 및 유한 요소 해석의 신뢰도가 높음을 검증하였다.

Table 8: Comparison table of analysis and test result at load condition

Contents	Analysis	Test	Error factor [%]
Generated voltage [Vrms]	226.2	231.7	2.4
Generated current [Vrms]	9.4	9.3	1.1
Output [W]	6378.8	6295.1	1.3
Input [W]	6837.9	6718.5	1.8
Efficiency [%]	93.29	93.7	0.4

Figure 11은 불규칙한 해상 환경에 의한 파력 발전 특성을 파악하기 위하여 100~250rpm 및 부하 조건별(2kW, 4kW, 6kW) 출력과 효율 특성에 대한 시험 결과이다.

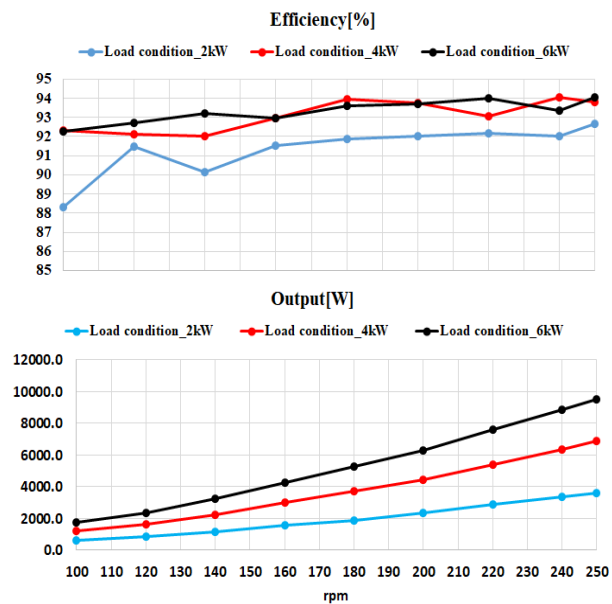


Figure 11: Test result of performance characteristics according to variable speed and load condition

7. 결론

본 논문에서는 불규칙한 운동에너지인 파력 특성을 고려한 저속 고 토크 6kW급 파력발전기의 코깅토크 저감을 통한 운전 특성 개선 설계에 대하여 연구하였다. 해상 환경 및 자이로 시스템의 사양을 통하여 발전기 설계 사양을 도출하였고, 과속도 기준을 제시함으로써 발전기 발전 운전 구간을 선정하였다. 파력 발전기 설계 사양을 만족하기 위한 설계 수순을 통한 발전기 설계를 진행한 후 파력발전기 운전 특성 개선을 위한 코깅토크 저감 세부 설계를 진행하였다. 코깅토크는 1.83N·m으로 기본 설계 모델 15.08N·m 대비 87.9% 저감 설계를 진행으로 자이로 안정기의 세차 운동에 부하로 작

용하는 코깅토크가 상세 설계를 통하여 충분히 저감되었음을 해석적으로 검증하였다. 불규칙한 해상 환경에 의한 파력 발전 운전 특성을 파악하기 위하여 발전 운전 구간인 100 ~ 250rpm 및 2kW, 4kW, 6kW급 발전 부하 조건에서의 발전기 특성을 유한요소 해석 수행하였고, 해석 조건과 동일한 부하 및 운전 속도 조건에서 시험 평가를 수행하여 발전기 출력 및 효율 특성을 검증하였다. 발전기 정격 조건인 6kW 부하 조건 및 회전속도 200rpm에서의 해석 값과 시험 값의 비교 분석한 결과 설계 요구 사양을 초과 만족하는 결과를 얻었고 발전 전압은 해석과 시험 값의 비교 결과 발전 전압은 2.4%, 발전 전류는 1.1%, 출력은 1.3%, 효율은 0.4%의 오차로 높은 정확도를 보이며 설계 제작된 파력발전기의 설계 타당성 및 유한 요소 해석의 신뢰도가 높음을 검증하였다.

후기

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] K. P. Hong, "Design of a 6kW permanent magnet synchronous generator with low speed and high torque for gyro wave power generation," Journal of the Korean Society for Marine Engineering, vol. 41, no. 9, pp. 878-883, 2017 (in Korean).
- [3] H. A. Richard, "Gyrostabilizer for small boat," United states Patent, US20050076726, 2004.
- [4] D. W. Hart, Power Electronics, McGraw-Hill Education, 2011.
- [5] Korea Smart Grid Association, "Performance requirements of power converters for electrical energy storage systems," Korea Smart Grid Association Standard, SPS-SGSF-025-4-1972, pp. 16-17, 2016.
- [6] KR Rulse for the Classification of Steel Ships, Part 6 Electrical Equipment and Control Systems, Ch1 Electrical Equipment p. 21, 2018.
- [7] J. R. Hendershot and T. J. E Miller, Design of Brushless permanent-Magnet Motors, Oxford University Press, 1994.
- [8] J. Lee, Electric Machinery, Seoul, Korea : HONGRUNG PUBLISHING COMPANY, 2012.