

하이브리드 전기추진시스템용 SEIG 및 PMSG의 출력 비교 분석 Comparison of Output Characteristics on SEIG and PMSG for a Hybrid Electric Propulsion System

최교호*† · 정태영** · 정석권***

Gyo-Ho Choi*† , Tae-Young Jeong** and Seok-Kwon Jeong***

(Received 17 September 2019, Revision received 23 January 2020, Accepted 28 January 2020)

Abstract: This paper deals with comparison analysis on output characteristics of two types of generators for a hybrid electric propulsion system (H-EPS) consisted of an engine-driven system and an electric driven system. Main components of H-EPS consists of two parts. One is a power generation system with efficient electric power generation performance even in a variable speed condition of a diesel main engine, and the other is a charging system with efficient storage performance of the electric energy. The generator of power generation system for the H-EPS is required to have the highest reliability and stability, despite isolation at sea and poor engine room environment. In addition, it should be compact structure with high output and lightweight in relation to volume. For the purpose of this study, we selected a self excited induction generator (SEIG) and a permanent magnet synchronous generator (PMSG) for H-EPS, and analyzed their output characteristics through several experiments. By comparing the experimental results, it was clear that PMSG exhibited better performance than SEIG as the generator for H-EPS.

Key Words : Hybrid Electric Propulsion System(H-EPS), Self Excited Induction Generator(SEIG), Permanent Magnet Synchronous Generator(PMSG)

1. 서 론

고유가 시대를 대비한 연료비 절감과 지구온난화 방지를 위한 대기오염원 저감을 목적으로 자동차 산업의 전기차 상용화에 발맞춰 선박의 전

기추진시스템(Electric Propulsion System; EPS)에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁶⁾ 특히, 해군 군함과 해경 함정 등의 특수 목적 선박은 일반 선박과는 현저히 다른 운항 패턴을 갖는 관계로 EPS가 조기에 도입되었다. 즉 이 선박들은 대부분의 시간을 저속으로 경계 업무에 임하며, 비상 상

*† 최교호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5937-1442) : 교수, 강원도립대학교 해양경찰과

E-mail : ghchoi@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8204

**정태영(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1151-263X) : 교수, 부경대학교 실습선

***정석권(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1889-9208) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학과

*† Gyo-Ho Choi(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5937-1442) : Professor, Department of Maritime Police & Technology, Gangwon State University.

E-mail : ghchoi@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8204

**Tae-Young Jeong(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1151-263X) : Professor, Training Ship, Pukyong National University.

***Seok-Kwon Jeong(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1889-9208) : Professor, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

항 시에만 최대 추진력을 이용하여 고속으로 운항한다. 이러한 운항 특성을 고려하여 이들 특수 목적 선박들은 에너지의 효율적인 이용을 위해 하이브리드 전기추진방식(combined diesel-electric and diesel)을 채택하고 있다. 국내 H사에서 건조하여 최초로 배치된 3,000톤급 하이브리드 전기추진 방식 경비구난함의 경우, 추진기 구동용 디젤기관 2기와 추진 전동기 2기로 구성된 2중의 추진축계 시스템을 갖추고 있다. 이 선박은 저속운항 시(12 노트 이하)에는 전동기 2기를, 순항 시(15 노트)에는 디젤기관 2기를, 고속 운항 시(28 노트)에는 이들 4기를 동시에 구동하여 추진한다. 이를 통해, 대용량, 고마력 엔진 장착에 따른 공간 및 에너지 측면의 비효율성을 극복할 수 있어 연료비 절감과 엔진 수명 연장, 함 내 소음과 진동 감소로 쾌적한 거주환경을 도모하여 승조원들의 생활환경을 크게 개선하였다.

그러나 연구회에서 활동하는 20톤급 미만의 소형 특수 목적 선박(연안 경비정, 환경감시선, 탐사선 등)들은 대부분 고속 디젤기관 구동의 워터제트 추진 방식을 채택하고 있다. 이들 선박은 기관실이 매우 협소하여 EPS를 위한 별도의 보조 발전기 설치가 어려울 뿐만 아니라, 설치 시에는 부가 비용 지출과 선체 하중 증가로 인한 선속 및 연비 저하를 초래한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 주기관의 PTO(Power Take Off) 출력을 이용한 발전 및 충전시스템과 전동기 구동 추진시스템을 갖는 소형 특수 목적 선박용 하이브리드 EPS(Hybrid EPS; H-EPS)를 제안한 바 있다.^{7,8)}

이 H-EPS의 성능은 핵심 구성 요소인 발전기의 성능에 크게 의존한다. 발전기는 해상에서의 선박 고립성과 열악한 기관실 환경 등을 고려해, 신뢰성과 안정성이 최우선적으로 요구되며 체적 대비 고출력 저중량이 바람직하다. 자여자유도발전기(Self Excited Induction Generator; SEIG)와 영구자석형동기발전기(Permanent Magnet Synchronous Generator; PMSG)는 이러한 특성을 비교적 잘 갖춘 발전기로 최근 신재생에너지 시스템 분야에 널리 사용되고 있다. 그럼에도 이 두 발전기의 출력 특성을 비교 분석한 자료는 보고되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 발전 특성이 일부 밝혀

진 독립형 SEIG와 PMSG를 대상으로 유기전압의 출력 특성을 비교 분석하여 H-EPS 구축 시의 설계 자료로 제공하고자 한다.

2. 소형 특수 목적 선박용 H-EPS 방식

Fig. 1은 소형 특수 목적 선박용으로 제안된 H-EPS의 개념도이다. 이 시스템은 발전시스템과 충전시스템, 그리고 전동기 구동 추진시스템으로 구성된다. 발전시스템의 발전기(GEN)는 선박 주기관의 PTO에 직결하거나 필요 시 유압펌프와 유압모터를 경유해 연결될 수 있다. 이 시스템은 선박이 고속으로 운항할 경우에는 주기관의 PTO에 연결된 발전기를 통해 생산된 전기에너지를 축전지(BAT)에 저장한다(high speed mode). 한편, 저속 운항 시에는 주기관을 정지시키고 축전지에 저장된 에너지(DC)를 두 대의 컨버터(CVCF, VVVF)를 통해 AC로 변환한 뒤 프로펠러와 직결된 추진전동기(I.M)를 구동하여 선박을 추진한다(low speed mode).⁹⁾

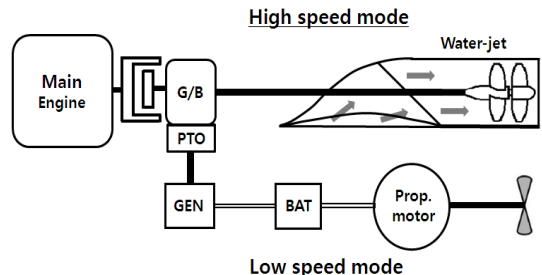


Fig. 1 Conceptual diagram of H-EPS for a small special purpose ship

3. 실험장치 구성 및 실험 방법

3.1 SEIG

Fig. 2는 SEIG의 출력 특성을 분석하기 위한 실험장치의 개략도이며, 무효전력 공급을 위해 발전기의 3상 출력단자에 커패시터 뱅크(Capacitor Bank; CB)를 델타로 결선한다. 본 연구에서는 실제

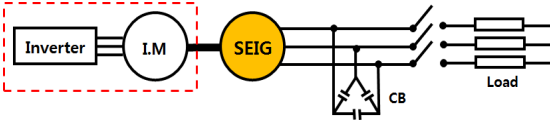


Fig. 2 Schematic diagram of SEIG for analyzing generator's output

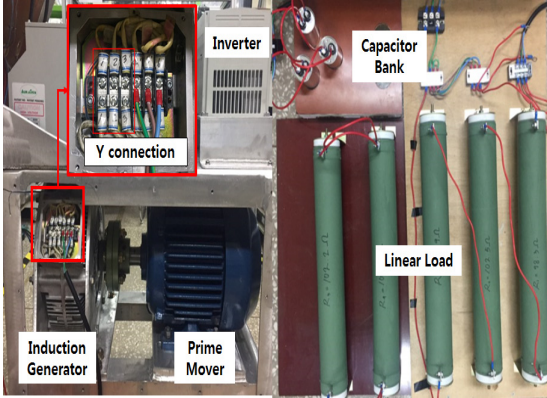


Fig. 3 Experimental apparatus of SEIG

Table 1 Specifications of the tested system (SEIG)

Components	Values
SEIG	Rated power : 5 [kW], Pole number : 4 Output : 240/21 [V/A], 120/42 [V/A] Maximum rotor speed : 12,000 [rpm] Weight : 28.2 [kg]
Motor	Rated power : 7.5 [kW], Pole number : 2 Rated speed : 3,600 [rpm] Input : 380/26.5 [V/A], 220/15.3 [V/A]
Inverter	Rated power : 12.2 [kVA] Input : 200~230/48/3 [V/A/φ] Output : 0~input/32/3 [V/A/φ]

시스템의 주기관을 대신해 유도전동기(IM)를 사용하였고, 주기관의 회전속도 변동은 $V/f = \text{const.}$ 제어의 인버터로 구현하였다. SEIG는 2중 고정자 구조의 G-5000(AuraGen, U.S.A)을 사용하였다.¹⁰⁾

실험용 커패시터 용량은 실제 대상 선박 주기관의 상용 회전속도 범위가 2,300~2,900 rpm임을 고려하여 이론적 설계값인 62 μF 근방인 70, 90, 100 μF 의 세 가지로 선정하였다. 부하로는 정격전력 2 kW, 100 Ω 의 권선저항을 이용하였다.

Fig. 3은 SEIG의 유기전압 특성 분석을 위한 실

제 실험 장치의 구성 사진이며, Table 1은 실험장치 주요 구성부의 상세 사양이다.

3.2 PMSG

Fig. 4는 PMSG의 실험장치의 개략도이다. SEIG 실험에서와 마찬가지로 인버터와 유도전동기 시스템으로 주기관의 속도가 가변되는 상황을 모사하였다. 이 출력에 의해 발전기가 구동되어 유기전압이 출력되고 이를 DC/AC 부하에 각각 연결하여 그 특성을 확인하였다. 부하로는 권선저항 (1.5 kW, 8.4 Ω)을 사용하였으며, DC 부하 실험시에는 다이오드 모듈을 거쳐 저항에 연결하였다. AC 부하 실험 시에는 다이오드 모듈을 제거하고 3상 교류를 권선저항 부하에 직접 연결하였다.¹¹⁾

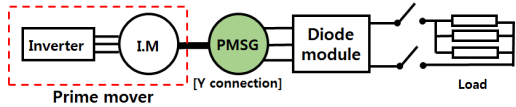


Fig. 4 Schematic diagram of PMSG for analyzing generator's output

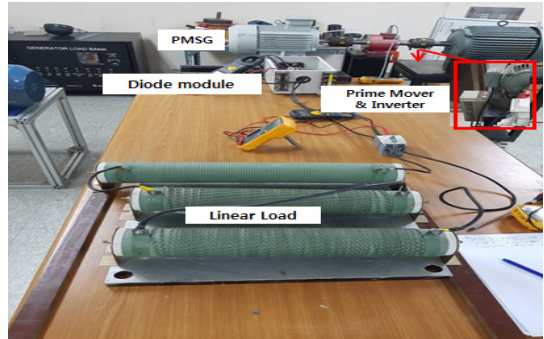


Fig. 5 Experimental apparatus of PMSG

Fig. 5는 PMSG의 유기전압 특성 분석을 위한 실제 실험 장치의 구성 사진이며, Table 2는 실험장치 주요 구성부의 상세 사양이다. 인버터를 이용하여 실제 대상 선박 주기관의 회전수 범위를 가변하면서 PMSG의 전압과 전류를 각각 측정하였다. 특성 실험에서는 부하 인가 상태에서의 SEIG와 PMSG의 출력 특성을 집중적으로 비교 분석하였다.

Table 2 Specifications of the tested system (PMSG)

Components	Values
PMSG	Rated power : 5 [kW], Pole number : 10 Output : 240/21 [V/A], 120/42 [V/A] Maximum rotor speed : 2,200 [rpm] Weight : 20.0 [kg]
Motor	Rated power : 7.5 [kW], Pole number : 2 Rated speed : 3,600 [rpm] Input : 380/26.5 [V/A], 220/15.3 [V/A]
Inverter	Rated power : 12.2 [kVA] Input : 200-230/48/3 [V/A/φ] Output : 0-input/32/3 [V/A/φ]

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 SEIG

Fig. 6은 SEIG에서 발전된 AC를 부하 측에 인가한 상태에서, CB 용량별 발전기 회전속도 변화에 따른 SEIG의 유기전압과 주파수 변화, 부하전류 및 자화전류를 각각 나타낸다. Fig. 6(a)에서와 같이 AC 부하 인가 시의 SEIG 유기전압 특성은 무부하 시험 경우와 마찬가지로 CB 용량이 클수록 발전기의 낮은 회전속도, 작을수록 높은 회전속도 영역에서 동일한 전압이 유기된다.

동일한 CB 용량인 경우 발전기의 회전속도가 증가할수록 유기전압은 비선형적으로 증가한다. 부하전류는 Fig. 6(b)에서와 같이 동일한 CB 용량의 경우, 발전기의 회전속도가 증가할수록 부하전류도 유기전압과 동일하게 비선형적으로 증가한다. 한편, 주파수 특성은 Fig. 6(c)에서와 같이 발전기의 회전속도가 동일한 경우, CB 용량이 클수록 주파수는 감소한다. 또한 CB가 동일한 경우에는 발전기 회전속도가 증가할수록 유기전압의 주파수도 선형적으로 증가한다. 이는 CB 용량이 커 자화전류가 많이 흐를수록 발전기의 회전자 속도는 느려져 유기전압의 주파수도 감소하는 것으로 추정된다. 이 결과로부터 일정한 크기의 자화전류를 흘리기 위해서는 낮은 회전속도 영역일수록 CB 용량이 커야함을 알 수 있다. Fig. 6(d)에서 자화전류의 출력 특성은 유기전압의 출력 특성과 매우 유사하다. 또한 CB 용량이 100 μF 일 때 주기판의 상용 운전 영역에 가장 근접하는 회전속도 범위에서 유기전압이 출력되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 SEIG 유기전압을 DC로 변환하여 부하에 인가한 경우, CB 용량별 발전기 회전속도 변화에 따른 SEIG의 유기전압과 주파수, 부하전류,

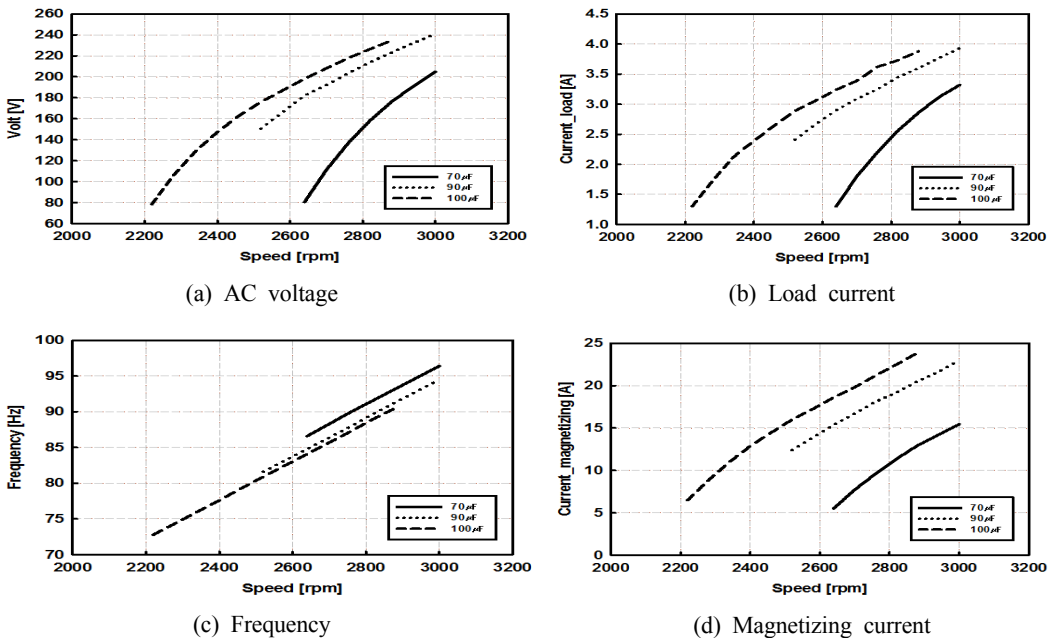


Fig. 6 Output characteristics according to change of rotating speed of SEIG under AC voltage addition

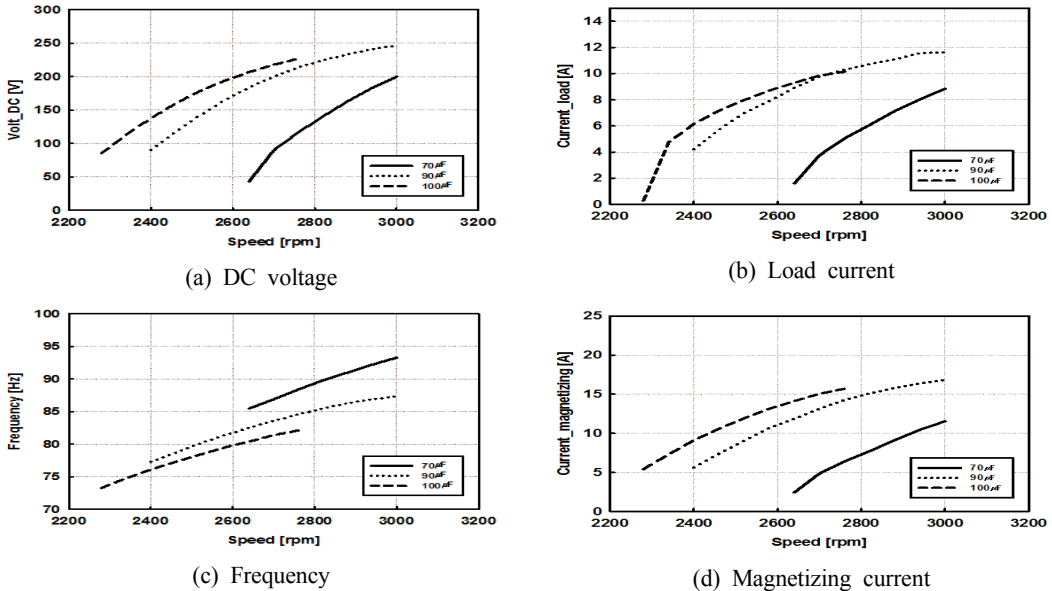


Fig. 7 Output characteristics according to change of rotating speed of SEIG under DC voltage addition

자화전류를 각각 나타낸다. Fig. 7(a)에서 SEIG 유기전압은 AC 부하 시와 마찬가지로 CB 용량이 클수록 발전기의 낮은 회전속도, CB 용량이 작을수록 높은 회전속도 영역에서 동일한 전압이 유기된다. CB가 동일한 경우, 발전기의 회전속도가 증가할수록 유기전압은 비선형적으로 증가한다. Fig. 7(b)에서와 같이 동일 크기의 부하전류를 흘리기 위해서는 CB 용량이 작을수록 높은 회전속도를 필요로 한다. 주파수 특성은 Fig. 7(c)에서와 같이 AC 부하 시와 유사한 경향을 보여준다. 즉 발전기의 회전속도가 동일한 경우, CB 용량이 클수록 주파수는 감소한다. CB가 동일할 경우에는 발전기의 회전속도가 증가할수록 유기전압의 주파수는 비선형적으로 증가한다. 특히, CB 용량이 90 μF 에서 가장 넓은 회전속도 범위를 가지고 있음을 알 수 있다. 자화전류는 Fig. 7(d)에서처럼 동일한 CB 용량의 경우에 발전기 회전속도가 높을수록 자화전류도 비선형적으로 증가한다. 결국, CB 용량이 크고 회전속도가 높을수록 큰 자화전류와 유기전압이 생성되며 부하전류도 많이 흘릴 수 있음을 알 수 있다.

SEIG의 출력 특성 실험을 통해 확인한 결과를 종합하면, 첫째, 무부하 시험과 부하 시험 결과,

축전지 저장에 필요한 적정 유기전압을 얻기 위한 CB 용량은 70~100 μF 범위이며, 100 μF 에서 가장 좋은 특성을 보였다. 둘째, SEIG의 유기전압 및 자화전류, 부하전류는 CB의 용량과 발전기의 회전속도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 특성을 보였다. 부하 증가 시 SEIG 출력 유기전압의 크기와 주파수 및 자화전류는 소폭 감소하는 경향을 보였다. 대상 선박의 주기관 회전속도, CB 용량 및 적정 자화전류 범위(6~21 A)를 고려하면, SEIG의 적정 유기전압은 부하 운전의 경우 DC 80~250 V임을 확인할 수 있다.

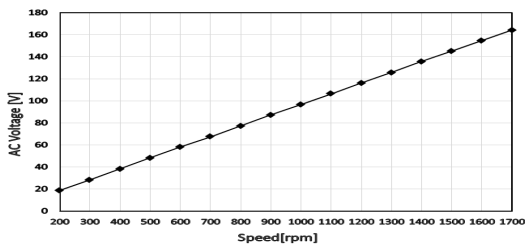
4.2 PMSG

Fig. 8은 PMSG의 무부하 실험 결과를, Fig. 9와 Fig. 10은 PMSG의 AC 및 DC 부하 실험 결과를 각각 나타내고 있다.

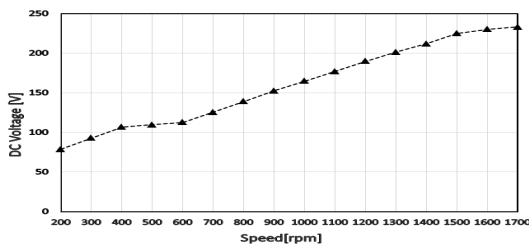
Fig. 8~Fig. 10에서와 같이 PMSG의 전압과 전류는 회전속도 전체 범위에서 부하, 무부하 조건에 관계없이 회전속도에 비례하는 양호한 선형 특성을 보였다. 특히, SEIG가 특정 CB 값에서 상대적으로 좁은 회전속도 범위에서만 출력 전압이 유기되는 반면, PMSG는 넓은 회전속도 범위에 걸쳐 선형적으로 유기전압이 출력됨을 볼 수 있다.

PMSG의 부하 인가 실험 시에는 부하 용량이 작았던 관계로 비교적 낮은 rpm 영역에서만 출력 데이터를 얻었다. 그러나 출력의 선형성으로 유추해 보면, PMSG가 SEIG보다 동일 rpm에서 AC, DC 부하 조건 모두 더 큰 유기전압이 발생됨을 알 수 있다. 이상에서와 같이 SEIG와 PMSG의 유기전압 출력 특성을 비교해 본 결과, 전압 출력이 가능한 속도 범위, 전압의 크기, 전압의 선형성 측면에서 PMSG가 SEIG보다 양호한 특성을 보였다. 특히 독립형 SEIG는 공극자속 생성을 위해 발전기의 고정자 측에 CB를 병렬로 연결하여 무효전력을 공급해야 하는 번거로움이 있다. SEIG의 구조 자체는 견고하지만 부속품인 CB의 수명이 한정되어 있어 주기적으로 교체해야 하는 단점이 있다.

따라서 장치의 내구성 측면에서도 PMSG가 SEIG보다 유리함을 알 수 있다. 뿐만 아니라 Table 1과 Table 2에서 보듯이 중량도 PMSG가 SEIG보다 더 가벼워 비교 우위에 있음을 알 수 있다.

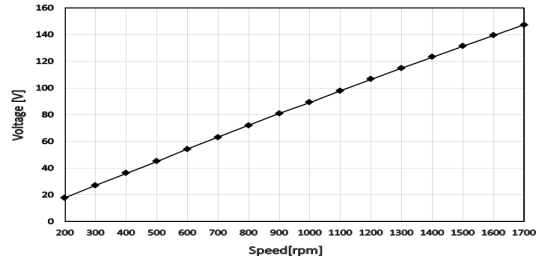


(a) AC voltage

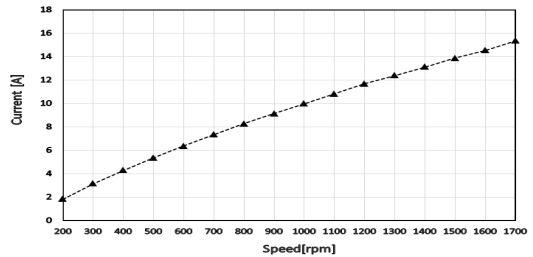


(b) DC voltage

Fig. 8 Output characteristics according to change of rotating speed of PMSG under no-load condition

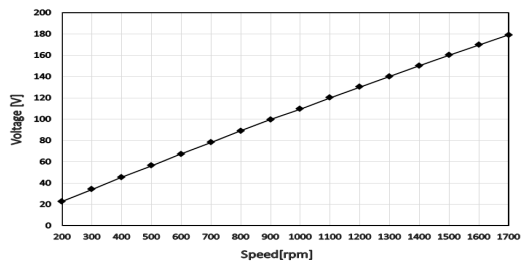


(a) Voltage

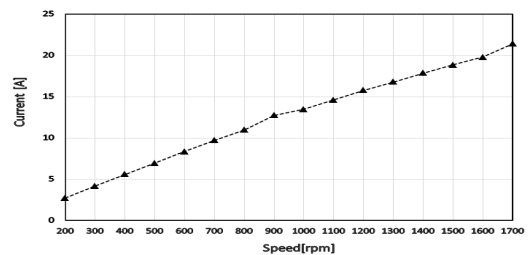


(b) Current

Fig. 9 Output characteristics according to change of rotating speed of PMSG under AC load condition



(a) Voltage



(b) Current

Fig. 10 Output characteristics according to change of rotating speed of PMSG under DC load condition

5. 결 론

본 논문에서는 소형 특수 목적 선박용 H-EPS에 적합한 발전기로서 원동기의 가변속 하에서도 발전 성능이 우수한 SEIG와 PMSG의 발전 특성을 비교 검토하였다.

발전 특성 실험 결과, PMSG가 원동기의 넓은 회전속도 범위에서 유기전압이 출력될 뿐만 아니라 출력 전압과 전류가 회전속도에 선형적으로 비례하는 양호한 특성을 보임을 확인하였다.¹²⁾ 특히, PMSG는 동일 출력 대비 중량과 체적이 SEIG보다 적어 협소한 기관실 공간의 소형 선박에 더 적합하고, SEIG에 필수적인 CB가 불필요하므로 보수, 유지 측면에서도 유리함을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과는 특수 목적 선박의 H-EPS용 발전기 설계의 기초 자료가 될 것으로 기대된다. 더 나아가, 본 연구는 소형 연안어선 등의 전기추진 시스템 개발에 있어 핵심 자료로 널리 활용 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 최교호 박사학위논문인 “특수 목적 선박의 하이브리드 전기추진시스템 구축에 관한 연구”의 일부임을 밝힙니다.

Author contributions

G. H. Choi; Conceptualization, Investigation of research paper, Writing original draft, T. Y. Jeong; Experimental data analysis, Validation, S. K. Jeong; Performing experiments

References

1. M. J. Kim and G. H. Chea, 2011, "Study on Catamaran Type Solar Boat Using the Pod Propulsion System", The Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 17, No. 2, pp. 161-166.
2. S. G. Lee, Y. S. Jeong, S. Y. Jung and C. G. Lee, 1992, "Characteristic Analysis of Integrated Power System and Propulsion Motor Comparison for Electric Vessels according to the Driving Condition", The Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 15, No. 1, pp. 96-103.
3. G. K. Singh, 2004, "Self-excited Induction Generator Research—a Survey", Electric Power Systems Research, Vol. 69, No. 2, pp. 107-114.
4. S. S. Murthy, et al, 1998, "Studies on the Use of Conventional Induction Motors as Self-excited Induction Generators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, pp. 842-848.
5. S. Devabhaktuni and S. V. Jayaram-kumar, 1995, "Design of Excitation Capacitance for Self-Excited Induction Generator", Int. Journal of Computer Science and Communication Networks, Vol. 1, No. 3, pp. 264-269.
6. S. Moulahoum and N. Kabache, 2011, "Behaviour Analysis of Self Excited Induction Generator Feeding Linear and No Linear Loads", Journal of Electric Engineering Technology, Vol. 8, No. 6, pp. 1371-1379.
7. J. M. Lee, J. B. Kim, G. H. Choi, J. H. Yang and S. K. Jeong, 2017, "Behavior Analysis of a Self Excited Induction Generator with Various Loads for a Hybrid Electric Propulsion System", Proceed. of KSPSE (Spring), pp. 455-461.
8. J. M. Lee, J. B. Kim, J. H. Yang, T. Y. Jeong and S. K. Jeong, 2016, "Hybrid Propulsion System Using PTO for a Small Special Ship", Proceed. of KSPSE (Fall), pp. 150-151.
9. G. H. Choi, J. H. Yang, T. Y. Jeong and S. K. Jeong, 2018, "Charging and Discharging Characteristics Analysis of a Battery for a Hybrid Electric Propulsion System", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 39-46.

- (<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.039>)
10. J. H. Yang, G. H. Choi, J. M. Lee, and S. K. Jeong, 2018, "Behavior Analysis of a Self Excited Induction Generator with Various Loads for a Hybrid Electric Propulsion System", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 41-47.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.1.041>)
 11. G. H. Choi, J. H. Yang, and S. K. Jeong, 2018, "Output Characteristics Analysis of a PMSG for Hybrid Electric Propulsion System in Small Ships", Proceed. of KSPSE (Fall), pp. 144-145.
 12. G. H. Choi, 2019, "A Study on Construction of Hybrid Electric Propulsion System for Special Purpose Ships", Ph.D Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.