



하이브리드 전기추진시스템 구축을 위한 SEIG의 출력 특성 분석 Behavior Analysis of a Self Excited Induction Generator with Various Loads for a Hybrid Electric Propulsion System

양주호* · 최교호**† · 이재민*** · 정석권****
 Joo-Ho Yang*, Gyo-Ho Choi**†, Jae-Min Lee*** and
 Seok-Kwon Jeong****

(Received 17 October 2017, Revision received 14 February 2018, Accepted 19 February 2018)

Abstract: This paper analyzes the output characteristics of a self excited induction generator with isolated mode according to change of its speeds and loads for building a hybrid electric propulsion system in special purpose ships by using power take off. The induction generators are being considered as an alternative choice to the well-developed generators because of their lower unit cost, inherent ruggedness, operational and maintenance simplicity. However, the generator working by stand alone has a few problems that the reactive power is required to establish the air gap magnetic flux, and the induced voltage and magnetizing current fluctuate when the load is varied. In spite of its advantages, basic design data of the capacitor bank and behaviors of the output characteristics of the generator are not sufficient for the system. Based on the operating condition(speed range of main engine) of the target boat, a reduced experimental equipment system was constructed to analyze the output characteristics of the SEIG. And a suitable capacitor bank of a stand-alone generator and its output characteristics under various loads was investigated in detail through these experiments. According to the experimental result, it was confirmed that the capacitor bank should be $70 \mu\text{F} \sim 100 \mu\text{F}$, and the proper SEIG induced voltage should be DC $80 \text{ V} \sim 250 \text{ V}$ in order to storage electrical energy into a battery.

Key Words : Hybrid Electric Propulsion System, Self Excited Induction Generator(SEIG), Power Take Off, Capacitor Bank(CB)

1. 서 론

연안 경비정, 환경 감시선 등의 고속 기동용 특

수 목적 선박은 주로 워트젯(water-jet) 추진 방식을 채용하고 있다. 이 방식은 운항 시에 큰 소음을 유발하므로 은밀한 이동이 어렵고, 저속 운항

**† 최교호(교신저자) : 강원도립대학교 해양경찰과
 E-mail : ghchoi@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8204

*양주호 : 부경대학교 기계시스템공학과

***이재민 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스 협동과정

****정석권 : 부경대학교 냉동공조공학과

**† Gyo-Ho Choi (corresponding author) : Department of Maritime Police & Technology, Gangwon State University.
 E-mail : ghchoi@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8204

*Joo-Ho Yang : Department of Mechanical System Engineering, PKNU.

***Jea-Min Lee : Department of Mechatronics, Graduate School, PKNU.

****Seok-Kwon Jeong : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, PKNU.

시에는 불완전 연소로 인한 주기관(main engine)의 연비 저하에 따른 막대한 연료비 증가와 환경오염 물질 배출로 대기오염을 유발하는 심각한 문제점을 갖고 있다. 특히 이들 선박이 실제로 고속 기동하는 경우는 입·출항 또는 비상 상황 시로 제한되므로 전체 운항 시간의 수% 수준에 불과하다. 따라서 이들 선박의 효율적 운용을 위해서는 저속에서도 연비 저하가 없고 대기오염을 유발하지 않는 고효율 친환경 추진시스템의 장착이 요구된다. 전기추진시스템(Electric Propulsion System; EPS)은 저속 운항 시에도 저소음, 고효율, 제로에미션(zero-emission)을 달성할 수 있는 추진 방안 중 하나이다.¹⁻³⁾ 하지만 소형 특수 목적 선박에서는 기관실이 매우 협소하여 별도의 엔진 구동의 보조발전기 설치가 사실상 어렵고, 설치에 따른 부가 비용 지출과 선체 하중 증가로 인한 선속 및 연비 저하를 초래한다.^{4,5)}

이러한 문제점들을 해결하기 위해 본 연구에서는 주기관의 동력인출장치(Power Take Off; PTO)를 이용한 발전 및 축전지(rechargeable battery)로 구성되는 전기추진시스템을 검토한다. 이 시스템의 핵심 구성 요소인 발전기는 해상에서의 선박 고립성, 열악한 기관실 환경을 고려, 신뢰성과 안정성이 최우선 요구되며 체적 대비 고 출력 저 중량의 컴팩트한 구조가 바람직하다. 자여자유도발전기(Self Excited Induction Generator; SEIG)는 이러한 특성을 갖춘 발전기로 최근 풍력발전 등의 신재생에너지 시스템에 널리 사용되고 있다. PTO 이용 전기추진시스템의 효율은 주기관의 회전속도 및 부하 변동 하에서도 전기에너지를 축전지에 저장하는 능력에 크게 의존한다. 그럼에도 불구하고 PTO를 이용한 독립(stand alone)형 SEIG의 회전속도 및 부하 가변시의 출력 특성 등은 현재 잘 알려져 있지 않다.⁶⁻¹¹⁾ 본 논문에서는 속도 및 부하 가변 시의 독립형 SEIG(이하 SEIG로 기술)의 출력 특성을 분석하여 하이브리드 전기추진시스템의 설계 자료로 제공하고자 한다.

2. 하이브리드 전기추진시스템

2.1 PTO를 이용한 전기추진시스템

Fig. 1은 PTO를 이용한 하이브리드 전기추진시

스템 개념도이다. 이 시스템은 발전기(GEN), 축전지(BAT), 전기모터 구동 추진시스템으로 구성된다. 발전기는 선박의 주기관 배치에 따라 PTO에 직결 또는 유압펌프(H/P.P)와 유압모터(H/M)를 경유해 연결되며 축전지에 전기에너지를 저장한다. 전기모터는 축전지의 전기에너지를 이용하여 선박의 저속 운항 시에 전기추진시스템을 구동한다.

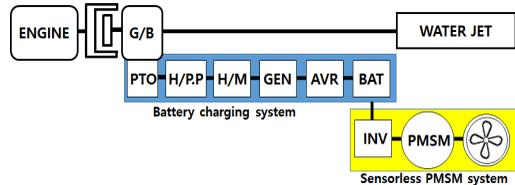
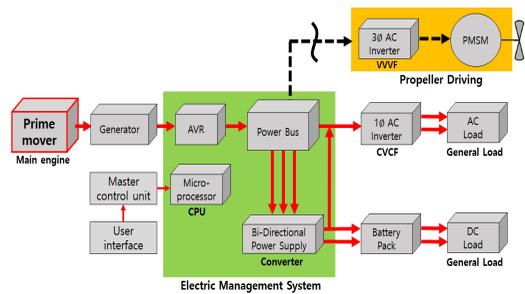
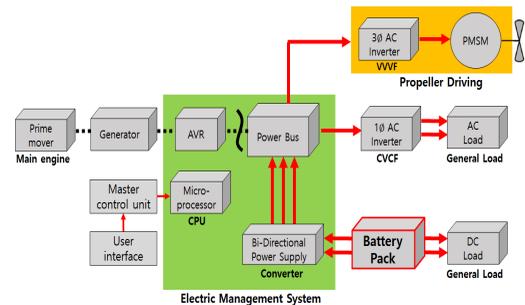


Fig. 1 Conceptual diagram of a hybrid EPS



(a) High speed mode (generating & charging)



(b) Low speed mode (motor driving)

Fig. 2 Two types of operating modes for the H-EPS

모터로는 제어가 용이한 유도전동기 등이 있으나, 본 연구에서는 에너지 밀도가 높고 저 중량, 고효율의 컴팩트한 구조를 갖는 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 사용을 고려하였다.

Fig. 2는 하이브리드 EPS(이하 H-EPS) 선박의 전기 공급 계통도 및 추진 모드를 나타낸다. (a)의 고속모드에서는 주기관의 PTO에 연결된 발전기를 통해 생성된 전기에너지를 축전지에 저장하고 컨버터(Constant Voltage Constant Frequency)를 통해 AC 부하에 연결한다. (b)의 저속모드에서는 고속 주기관은 정지하고 축전지에 저장된 DC를 두 컨버터(CVCF, VVVF)를 통해 AC 부하에 연결하고, 전기모터를 구동하여 선박을 추진한다.

3. 실험 장치 및 실험 결과

3.1 자여자유도발전기의 특성 시험 장치

일반적으로 전력망(power grid)에 연계되지 않은 독립형 SEIG는 발전을 위한 공극자속 생성을 위해 무효전력을 필요로 한다. 자여자 방식은 발전기의 고정자 측에 커패시터를 병렬 연결하여 무효전력을 공급함으로써 유기전압을 출력한다. 이 방식은 발전시스템 구축이 간단하고 유지 및 보수가 쉬워 전력망이 없는 도서 외지에서 전력을 생산하는 소형 발전 시스템에 널리 적용되고 있다.^{5,6)} 하지만 제2장에서 언급한 바와 같이 공극자속 생성을 위한 커패시터 용량 설계와 SEIG의 다양한 속도, 부하 가변 시의 유기전압 특성 등에 대한 자료는 충분하지 못한 실정이다.

Fig. 3은 H-EPS와 자여자유도발전기의 실험 장치 구성을 각각 나타낸다. 그림의 (a)는 H-EPS의 주된 구성 요소를 나타내었고, (b)는 SEIG의 출력 특성 분석을 위한 실험 장치 구성을 나타내었다.

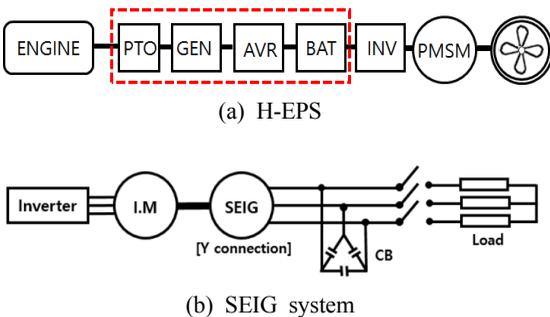


Fig. 3 Hybrid electric propulsion system and SEIG

본 연구에서는 실제 시스템의 주기관 대신에 유도전동기(I.M)를 사용하였고, 주기관의 회전수 변동은 V/f 일정 제어의 인버터로 구현하였다. SEIG는 2중 고정자 구조의 컴팩트한 G-5000 (AuraGen, U.S.A)을 사용하였으며, 주요 구성부의 상세 사양을 Table 1에 나타내었다. 발전기는 Y결선, 무효전력 공급을 위한 커패시터는 Δ 결선으로 하였다. 주기관의 최대 회전속도가 2,300 rpm과 2,900 rpm임을 고려하여 실험용 커패시터 용량은 이론적 설계값¹²⁾ 근방의 $50 \mu F$, $70 \mu F$, $90 \mu F$, $100 \mu F$ 의 네 가지로 선정하였다.

Fig. 4는 자여자유도발전기의 유기전압 특성 분석을 위한 실제 실험 장치의 구성을 나타낸다.

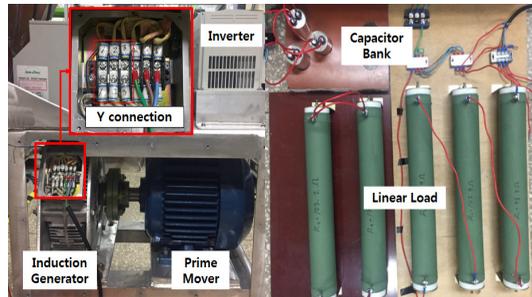


Fig. 4 Real experimental system for the SEIG

Table 1 Specifications of the tested system

Component	Value
SEIG	Rated power : 5 kW Pole number : 4 Output : 240/21 V/A, 120/42 V/A Weight : 28.2 kg Volume (D×L) : 311×158 mm Maximum rotor rpm : 12,000
Motor	Rated power : 7.5 kW Rated speed : 3600 rpm Pole number : 2 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[V/A/ Φ] : 0~input/32/3
Resistor	Rated power : 2 kW Resistance : 100 Ω

3.2 실험 방법

이론적으로 설계한 SEIG용 커패시터 용량이 적절할지를 우선 실험을 통해 확인한다. Fig. 3(b)와 같이 장치를 구성한 후, 무부하 상태에서 각기 용량이 다른 4종류의 커패시터에 대해 SEIG의 유기전압 특성을 분석한다. 이때 주기관의 회전속도는 인버터와 유도전동기로 구현한다. 다음은 부하시험으로서 부하 전류 변동에 따른 SEIG의 유기전압 특성을 분석한다. 부하실험 시에는 SEIG의 AC 유기전압을 부하에 직접 연결 및 DC로 변환 후 부하에 연결하는 두 방식을 모두 검토하였다. 특성 분석을 위해 계측한 물리량과 계측 장비의 오차율을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Physical quantities, measuring equipments and each error rate

Physical quantities	Measuring equipments	Error rate(%)
AC voltage[V]	multimeter (FLUKE 179)	1.0
DC voltage[V]	multimeter (FLUKE 179)	0.09
Current[A]	clamp-meter (CHAUVIN ARNOUX F05)	1.5
Frequency[Hz]	clamp-meter (CHAUVIN ARNOUX F05)	1.0

3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 5는 무부하 상태에서 CB(Capacitor Bank) 용량(50 μF , 70 μF , 90 μF , 100 μF)별, 유도전동기의 회전수 즉 발전기 회전수 변화에 따른 SEIG의 유기전압과 자화전류 변화를 각각 나타내었다.

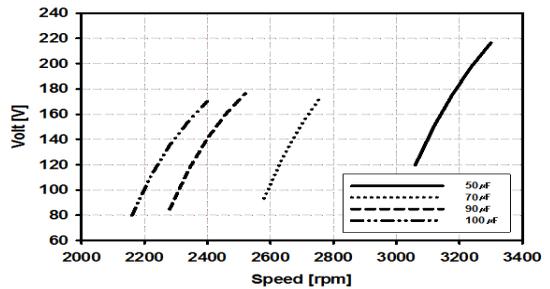
실험에서는 적용 대상 선박의 주기관(750 HP)의 상용 운전 영역인 2,300, 2,900 rpm을 고려하여 발전기 구동용 모터의 회전수를 인버터로 가변시켜 실험하였다.

그림에서 무부하시 SEIG의 유기전압 특성은 자화전류의 거동과 유사하였다. 또한 유기전압은 CB의 용량이 클수록 낮은 회전수에서 유기되었으며, 동일 용량의 CB일 경우에 특정 rpm 이상에서 발전기의 회전수에 거의 비례하여 증가하였다.

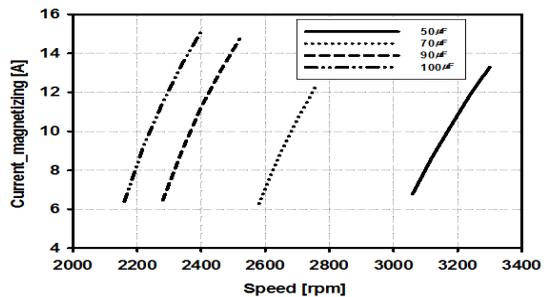
특히 SEIG 유기전압은 자화전류가 특정 회전수

이상에서만 흐르게 되므로 회전수 변화에 대해 비선형 특성을 보였다.

선박 주기관의 운전 영역을 고려, 축전지 저장에 필요한 적정 유기전압을 얻기 위한 CB 용량은 70~100 μF 인 것으로 나타났다. 자화전류 특성은 CB 용량이 작을수록 발전기 회전수가 높은 영역에서 동일 크기의 자화전류가 얻어짐을 확인할 수 있었다. 또한 동일 CB의 경우, 자화전류는 일정 rpm 이상에서 발전기 회전수 증가에 근사적으로 비례하였다. 무부하시 자화전류 크기는 상용 운전 영역에서 6~15 A로 나타났다.



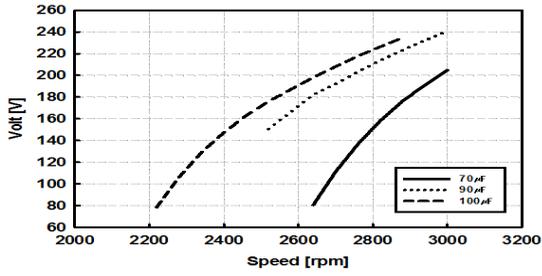
(a) Induced AC voltage



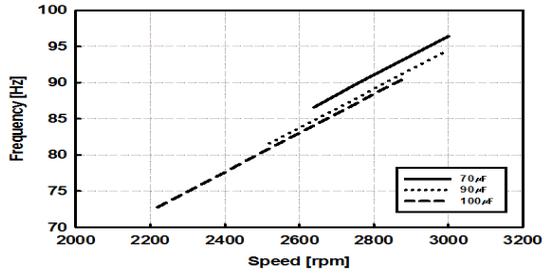
(b) Magnetizing current

Fig. 5 Output characteristics according to change of rotating speed of the SEIG

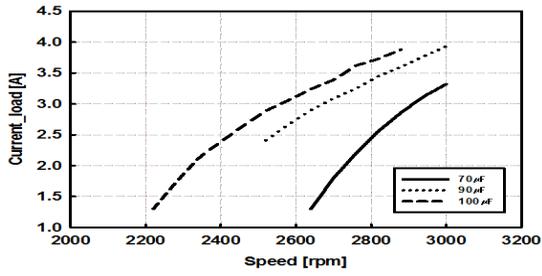
Fig. 6은 AC를 부하에 인가한 경우, CB 용량별 발전기 회전수 변화에 따른 SEIG의 유기전압과 주파수, 부하전류, 자화전류 변화를 각각 나타내었다. 부하 인가 시의 SEIG 유기전압 특성은 무부하 시험 경우와 마찬가지로 CB 용량이 클수록 발전기의 낮은 회전수, 작을수록 높은 회전수 영역에서 동일한 전압이 유기된다. 동일한 CB 용량의



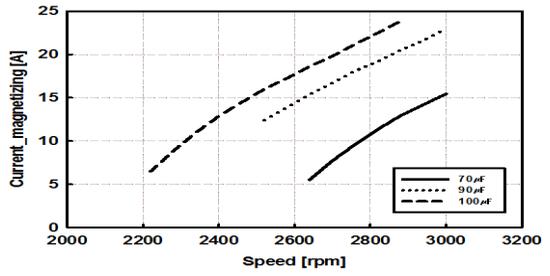
(a) AC voltage



(b) Frequency

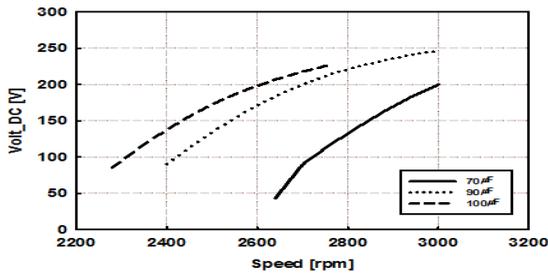


(c) Load current

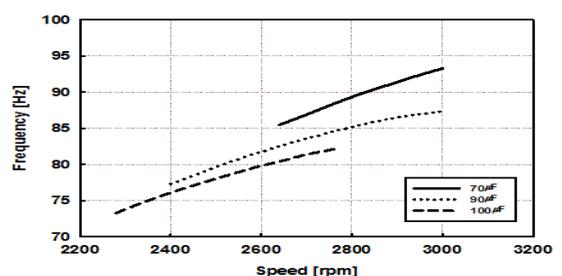


(d) Magnetizing current

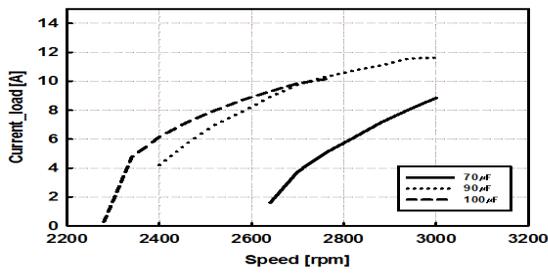
Fig. 6 Output characteristics according to change of rotating speed of the SEIG under AC voltage addition



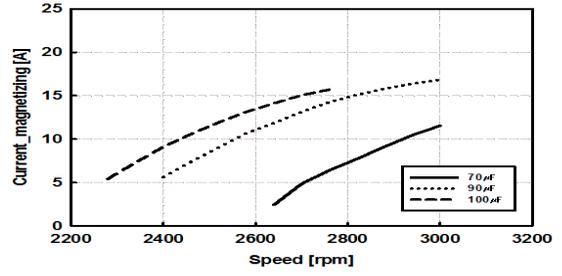
(a) DC voltage



(b) Frequency



(c) Load current



(d) Magnetizing current

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

경우, 발전기의 회전수가 증가할수록 유기전압은 비선형적으로 증가하였다. 주파수 특성은 발전기의 회전수가 동일한 경우, CB 용량이 클수록 주파수는 감소하였다. 동일 CB의 경우에 발전기 회전수가 증가할수록 유기전압의 주파수는 비선형적으로 증가하였다. 이는 CB 용량이 커 자화전류가 많이 흐를수록 발전기의 회전자 속도는 느려져 유기전압의 주파수도 감소하게 된다. 일정한 자화전류를 흘리기 위해서는 낮은 회전수 영역일수록 CB 용량이 커야 한다. 또한 동일한 CB 용량의 경우, 발전기의 회전수가 증가할수록 자화전류도 비선형적으로 증가하였다. 자화전류의 출력 특성은 유기전압의 출력 특성과 매우 유사하였다.

Fig. 7은 DC를 부하에 인가한 경우, CB 용량별 발전기 회전수 변화에 따른 SEIG의 유기전압과 주파수, 부하전류, 자화전류를 각각 나타내었다. 동일 크기의 부하전류를 흘리기 위해서는 CB 용량이 감소할수록 높은 회전수에서, 동일한 CB 용량의 경우에 발전기 회전수가 높을수록 부하전류도 비선형적으로 증가하였다. 결국 CB 용량이 크고 회전수가 높을수록 큰 자화전류와 유기전압이 생성되며 전류도 많이 흘릴 수 있음을 알 수 있다. 대상 선박의 엔진 회전수, CB 용량 및 적정 자화전류 범위(6~21 A)를 종합적으로 고려하면, 적정 SEIG 유기전압은 부하 운전의 경우 DC 80~250 V임을 확인하였다. 따라서 충전시스템의 충전 효율을 높이기 위해서는 SEIG의 유기전압 AC를 DC로 변환하고, 대상 축전지에 맞는 적절한 충전 전압 확보를 위한 전압조정기(Automatic Voltage Regulator; AVR) 설계가 필요함을 확인하였다.

4. 결 론

특수 목적 선박의 저속 운항 시 저소음, 고효율, 제로 에미션을 달성하기 위해 주기관의 PTO를 이용한 하이브리드 전기추진시스템을 제안하였다. 독립형 SEIG의 CB는 이 전기추진시스템의 핵심 구성 요소로 선박 주기관의 운전 영역과 무

부하 시험과 부하 시험을 수행한 결과, 축전지 저장에 필요한 적정 유기전압을 얻기 위한 CB 용량은 70~100 μ F인 것으로 나타났다. 또한 무부하 시험과 부하 시험을 통해 SEIG의 출력 특성을 상세히 분석하였다.

대상 선박의 엔진 회전수, CB 용량 및 적정 자화전류 범위(6~21A)를 종합적으로 고려하면, 적정 SEIG 유기전압은 부하 운전의 경우 DC 80~250 V임을 확인하였다. SEIG의 유기전압 및 자화전류, 부하전류는 CB의 용량과 발전기의 회전속도 증가에 따라 증가하지만 그 패턴은 비선형 특성을 보였다. 부하 증가 시 SEIG 출력 유기전압의 크기와 주파수 및 자화전류는 소폭 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과들을 통해 전기 에너지의 효율적인 충전을 위해서는 출력 AC 전압의 DC 변환과 그리고 속도와 부하 변동 시에도 안정적 전압 출력이 가능한 자동전압조정기의 설계가 필요함을 확인하였다.

본 논문의 실험 결과들은 향후 특수 목적 선박의 축전지의 고효율 충전과 전기추진시스템의 통합제어장치(Electric Management System) 설계의 기초 자료가 될 것으로 기대된다. 최근 국제해사기구로부터 선박에서 발생하는 온실가스 감축과 이를 위한 규제가 점차 강화되는 추세이다. 따라서 본 논문에서 제안한 기술은 선박의 저속 운전 시 제로 에미션 달성과 더불어 연비 향상을 통한 연료비 절감에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2016) 지원으로 수행되었습니다.

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. J. S. Kim and S. H. Kim, 2011, "Harmonic Analysis of Power Conversion System for Torque and Speed Changing of Electric Propulsion Ship", The Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 17, No. 1, pp. 83-88.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. G. K. Singh, 2004, "Self-excited induction generator research—a survey", Electric Power Systems Research, Vol. 69, No. 2, pp. 107-114.
7. 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.
8. Levi, Emil, 1995, "A unified approach to main flux saturation modelling in DQ axis models of induction machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 455-461.
9. 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.
10. 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.
11. T. Wildi, 2002, "Electrical Machines, Drives, and Power Systems(fifth edition)", Prentice-Hall, p. 313.