

# 선박 운전 환경에 따른 하이브리드 전기추진선박의 운전모드별 출력 특성에 관한 연구

김종수<sup>1</sup> · 전현민<sup>2</sup> · 김덕기<sup>†</sup>

(Received December 2, 2016 ; Revised January 17, 2017 ; Accepted February 8, 2017)

## A study on characteristics of each operation mode for hybrid electric propulsion ship by operation circumstances

Jong-Su Kim<sup>1</sup> · Hyeon-Min Jeon<sup>2</sup> · Deok-Ki Kim<sup>†</sup>

**요약:** 전 세계적으로 온실가스 및 대기 오염물질 배출 저감을 위한 환경 규제가 강화되고 있고, 그에 따라 여러 가지 대책들이 마련되고 있다. 또한 환경오염 최소화화 더불어 효과적이고 합리적인 에너지 절감 방법에 대한 필요성이 점차 커지고 있는 실정이다. 선박 분야의 경우에는 친환경 선박 개발이 활발히 연구되고 있으며 배기가스 배출저감, 대체 연료 개발, 새로운 추진 방식의 선박 등이 이러한 연구 범주에 속한다. 본 논문에서는 하이브리드 전기추진선박에 대한 기본 개념을 제시하고, 선박 운전환경 분석에 따른 하이브리드 전기추진선박의 전력공급 시스템 배터리 단독 운전, 발전기 단독 운전 및 전 출력 운전 모드로 구성하고 각 운전 모드별 속도, 전류, 전압 및 출력 특성을 분석하였다.

**주제어:** 하이브리드 전기추진, 선박 운전환경, 배터리 운전 모드, 발전기 운전 모드, 전 출력 운전 모드

**Abstract:** Worldwide environmental regulations have been enhanced for emission reduction of greenhouse gases and air pollutants; accordingly, some measures were prepared. Furthermore, the need for effective and reasonable energy-saving methods is growing in accordance with that for environmental pollution minimization. In the case of marine engineering, techniques for the development of eco-friendly vessels have been actively studied, including reduction of exhaust gas emissions, development of alternative fuel, and development of a new propulsion system. In this study, we presented the basic concepts and analyzed the speed, current, voltage, and output power characteristics of each operating mode, i.e., operating mode of battery, generator, and full power.

**Keywords:** Hybrid electric propulsion, Operating conditions, Operating mode of battery, Operating mode of generator, Operating mode of full power

### 1. 서 론

국제연합의 기후변화협약에서 온실가스 배출에 대한 규제가 발효됨에 따라 국제해사기구에서는 선박에 의한 해양 환경 파괴 요인에 대한 규정을 제정하였고, 이에 따라서 2025년까지 온실가스 배출은 현행 대비 30[%] 감축을 목표로 강화될 예정이다. 또한 해양오염방지협약 부속서 6장에서는 질소산화물 및 황산화물 배출에 대한 규제를 강화하고 있다. 이와 같이 온실가스 및 대기 오염물질 배출 저감을 위한 환경 규제가 강화되고 이에 따라 효과적이고 합리적인 에너지 절감 방법에 대한 필요성이 점차 커지고 있는 실정이다. 그로인해 디젤 전기추진시스템의 개발이 활발히 진행되어 왔으며[1][2] 최근에는 새로운 개념의 전기추진방

식이 연구되고 있다. 신 개념의 추진방식에는 하이브리드 추진과 전 전기추진 방식이 있다[3]. 본 연구에서는 하이브리드 전기추진선박에 대한 기본 개념을 제시하였으며 선박의 운전환경 분석을 통한 최적의 부하 운전환경 모드를 설정하여 모드별 운전 특성을 분석하였다. 운전 모드는 입출항, 정상 항해 및 황천 항해의 운전환경에 적합한 모드를 선택하였으며 입출항 시에는 배터리 단독 출력 모드, 정상 항해 시는 발전기 단독 출력 모드, 황천 항해 시는 발전기와 배터리 출력의 혼합 모드로 설정하여 전력 시스템을 구성하였다. 또한, 그 유효성을 분석하기 위해서 시뮬레이션을 하였으며 각 운전 모드에서의 추진전동기의 속도 응답성, 공급 전류, 전압 및 출력 특성을 통해 분석하였다.

<sup>†</sup>Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0799-2746>): FLNG FEED Team, Shipbuilding Division, Hyundai Heavy Industries, 1000, Bangeojinsunhwan-doro, Dong-gu, Ulsan 44032, Korea, E-mail: sense315@hhi.co.kr, Tel: 052-203-6230

<sup>1</sup> Division of Marine System Engineering, College of Maritime Sciences, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jongskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4831

<sup>2</sup> Division of Marine System Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jhm861104@gmail.com, Tel: 051-410-4831

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.

## 2. 하이브리드 전기추진 선박의 기본 개념 및 구성요소

### 2.1 하이브리드 전기추진 선박

하이브리드 전기추진 선박이란 디젤 엔진 및 발전기에서 생산된 출력과 배터리에 충전된 에너지를 직·병렬로 이용하여 추진전동기를 구동하는 것이다. 하이브리드 전기추진 방식은 기계적인 배치가 유연하여 효율적인 선박 구조 설계가 가능하며, 연료 소모량과 배기가스 배출이 저감되어 친환경적인 시스템으로 평가되고 있다. 이러한 하이브리드 전기추진 선박은 직렬 하이브리드와 병렬 하이브리드로 나누어진다[4].

#### 2.1.1 직렬 하이브리드

디젤발전기를 이용하여 생산된 전력을 정류기를 통하여 직류로 변환한 후 다시 인버터를 이용 교류로 변환하여 직접 추진전동기를 구동하거나, 배터리 출력만 이용하여 구동하는 시스템을 말한다. 이 시스템은 DC-DC 컨버터를 이용하여 배터리의 충·방전이 가능하다. Figure 1은 직렬 하이브리드 추진시스템의 개념도이다.

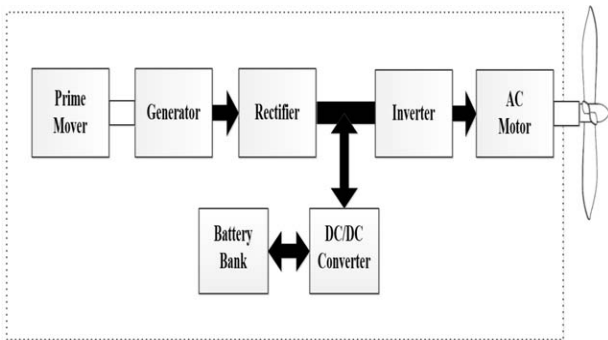


Figure 1: Block diagram of serial hybrid system

#### 2.1.2 병렬 하이브리드

병렬 하이브리드는 파워 스플릿 시스템을 사용하여 메인 엔진이 샤프트에 직결되어 구동되는 기존의 전통적인 추진 방식과 전력변환장치를 이용하여 전력을 배터리에 충·방전하고 또한, 추진동력으로 이용하는 시스템이다. Figure 2는 병렬 하이브리드 추진시스템의 개념도이다.

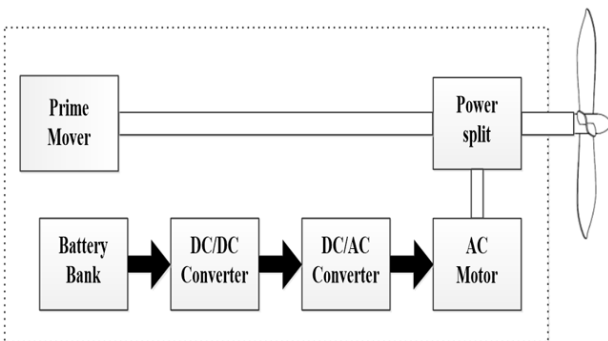


Figure 2: Block diagram of parallel hybrid system

## 3. 본 논문에서 구성한 하이브리드 전기추진시스템

### 3.1 하이브리드 전기추진시스템 전체 구성

운전특성 분석을 위한 하이브리드 전기추진시스템은 원동기, 발전기, DC/DC 컨버터, 추진전동기, 리튬 이온 배터리 리모듈로 구성하였으며 전체 블록도는 Figure 3과 같다[5].

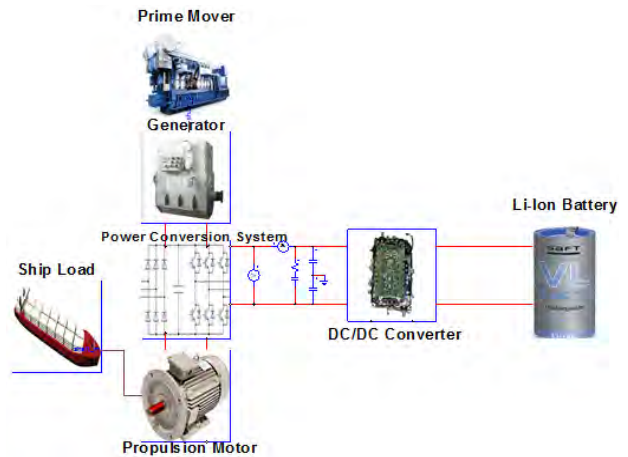


Figure 3: Schematic diagram of hybrid electric propulsion system

### 3.2 세부 구성요소

하이브리드 전기추진시스템의 세부 구성요소에 대한 특성은 다음과 같다.

#### 3.2.1 원동기-발전기

정속도로 운전되는 디젤 엔진을 사용하는 발전기에서 3상 교류 전력을 출력하여 사용한다. 발전기는 8극의 영구자석형 동기발전기를 사용하였으며, 정격 출력은 30kW, 정격 속도는 2100rpm이다.

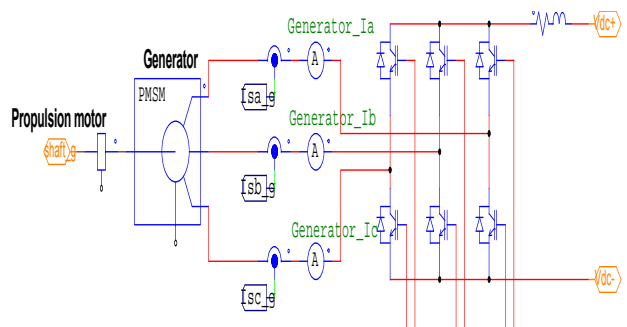


Figure 4: Schematic diagram of generator for hybrid electric propulsion system

#### 3.2.2 양방향 DC-DC 컨버터

배터리의 충·방전을 위해 직류단에 하프-브릿지 방식을 적용한 양방향 DC-DC 컨버터를 설치한다. 하부의 스위치가 동작할 경우에 상부 측 다이오드의 동작으로 부스트 컨

버터가 되어 배터리에서 직류단으로 에너지가 전달되어 추진전동기 구동에 사용되고, 상부의 스위치가 동작할 경우에는 하부 측 다이오드의 동작으로 인해 역 컨버터가 되어 직류단에서 배터리로 에너지가 이동하여 충전모드로 동작하게 된다.

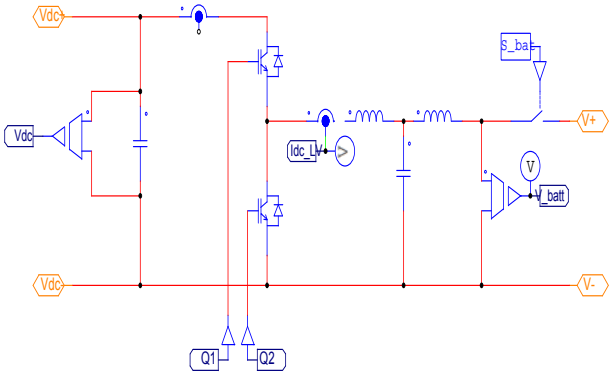


Figure 5: Schematic diagram of bi-directional dc converter for hybrid electric propulsion system

### 3.2.3 추진전동기

극수가 8극인 영구자석형 동기전동기를 사용하였으며, 정격 출력은 30kW이고 정격 속도는 1400rpm이다. 또한 추진전동기의 속도제어를 위해서 IGBT 모듈을 사용하는 인버터를 설치하였다. 또한, 추진전동기의 속도 및 토크 제어에는 간접벡터제어 알고리즘을 이용하였다.

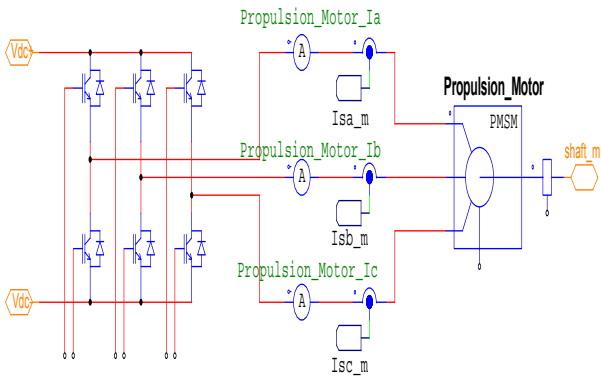


Figure 6: Schematic diagram of propulsion motor for hybrid electric propulsion system

## 4. 시뮬레이션 결과

### 4.1 시뮬레이션을 위한 선박의 부하 운전환경 분석

본 연구에서는 선박의 실제 운전환경에 부합하는 최적의 출력모드를 선택하고자 선박의 항해 시 부하환경을 분석하였으며 Figure 7과 같다. 주요 운전모드는 입·출항 모드, 정상 항해 모드, 황천 항해 모드의 부하 운전환경으로 구분하였다.

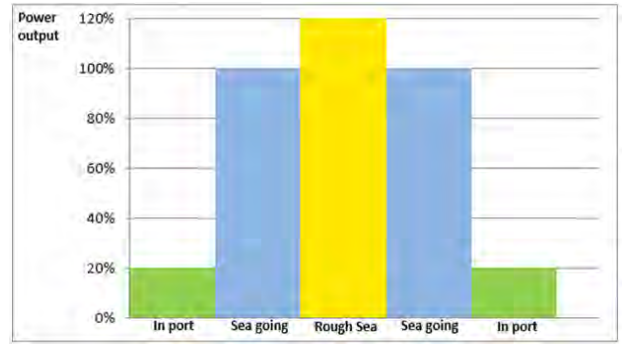


Figure 7: Load profile for hybrid electric propulsion system

### 4.2 부하환경에 따른 운전 모드별 시뮬레이션 결과

#### 4.2.1 입·출항 시 배터리 단독 출력모드

배터리 단독 출력모드는 선박이 입항 전 대기 상태, 배기 가스 배출 제한 구역통항, 입·출항을 위한 항내 통항 등의 경우에 사용하는 모드이며 부하환경 분석에 의하면 전체 출력의 20% 정도이며 300[rpm]에 해당한다.

Figure 8은 배터리 단독 출력모드 시 추진전동기의 추진 속도 응답 시뮬레이션 결과이다. 속도 응답특성이 우수함을 알 수 있다.

Figure 9 및 Figure 10은 배터리 단독 출력모드 시 배터리 출력 전류 및 전압 파형을 보여주고 있으며, Figure 11은 추진전동기의 출력이다.

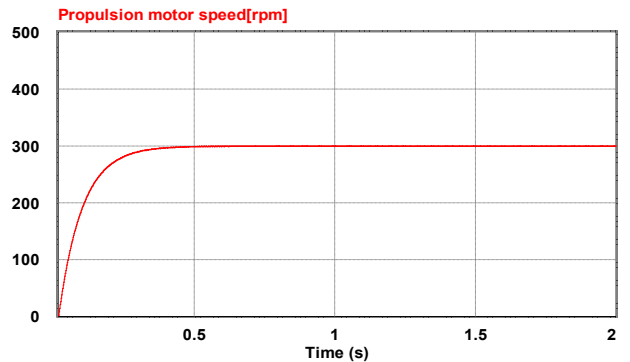


Figure 8: Simulation response of speed for propulsion motor

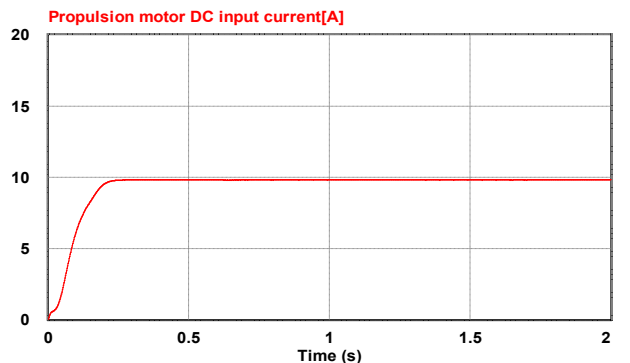


Figure 9: Simulation result of DC input current for propulsion motor

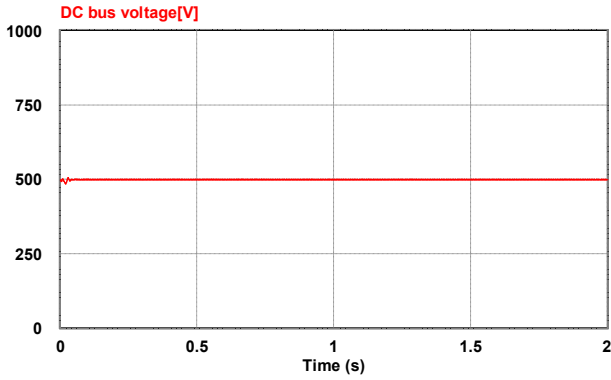


Figure 10: Simulation result of DC bus voltage for propulsion motor

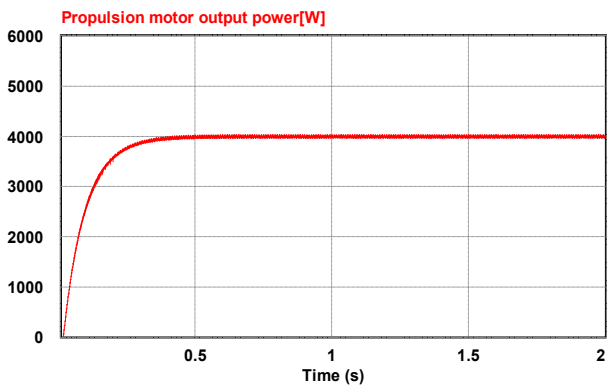


Figure 11: Simulation result of output power for propulsion motor

#### 4.2.2 항해 시 발전기 출력 & 배터리 충전 모드

선박이 대양을 정상적으로 항해할 경우의 모드이며 발전기 출력을 이용하여 추진전동기를 구동하고, 또한 배터리에 충전하는 모드이다. 부하 운전환경 분석에 의하면 전체 출력의 100%로서 추진전동기의 속도는 1400[rpm]에 해당한다.

Figure 12는 발전기 출력에 의해 추진되는 추진전동기의 속도응답 시뮬레이션 결과이며 속응성이 우수함을 알 수 있다.

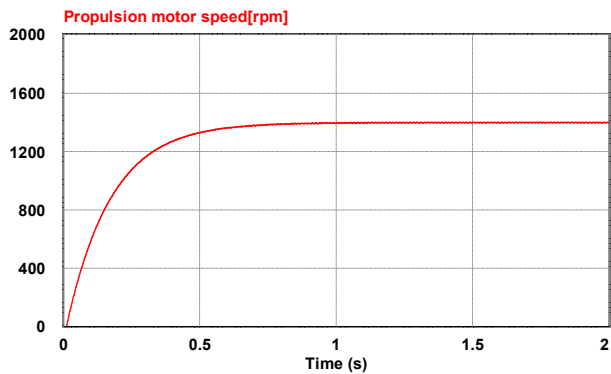


Figure 12: Simulation response of speed for propulsion motor

Figure 13은 발전기에서 출력되어 직류로 변환된 전류 (60A)파형이며, Figure 14에서 전동기의 추진을 위해 50A가 추진전동기에 공급되고, 동시에 배터리 충전을 위해 10A의 전류가 공급되는 것을 보여준다. 또한, Figure 15는 추진전동기에 공급되는 전압 파형이다.

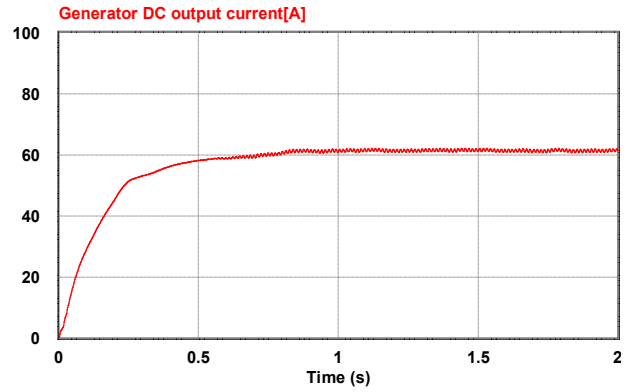


Figure 13: Simulation result of DC output current for generator

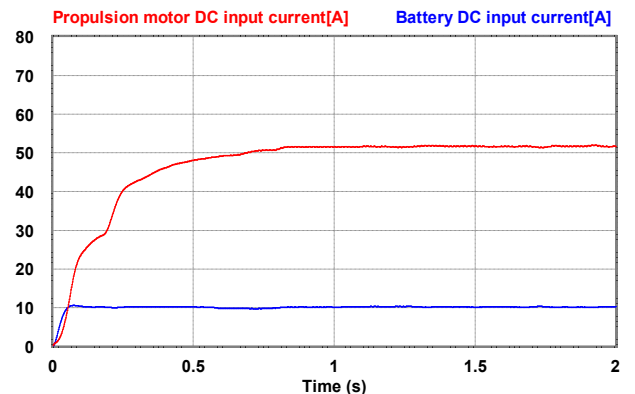


Figure 14: Simulation result of DC input current for propulsion motor and battery

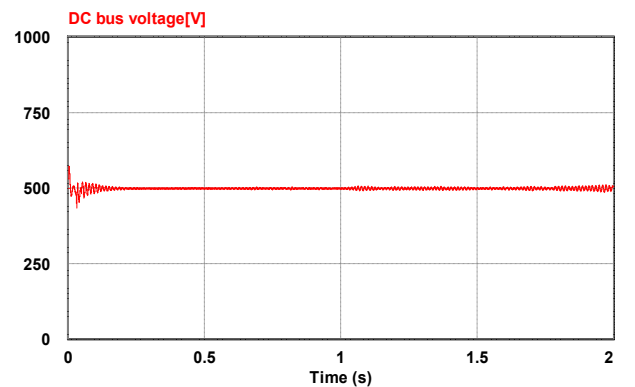


Figure 15: Simulation result of DC bus voltage for propulsion motor

Figure 16은 정상 항해 시 발전기의 출력이며, Figure 17은 추진전동기의 출력이다.

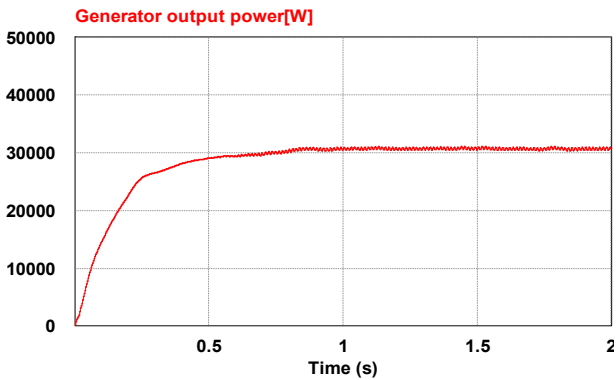


Figure 16: Simulation result of output power for generator

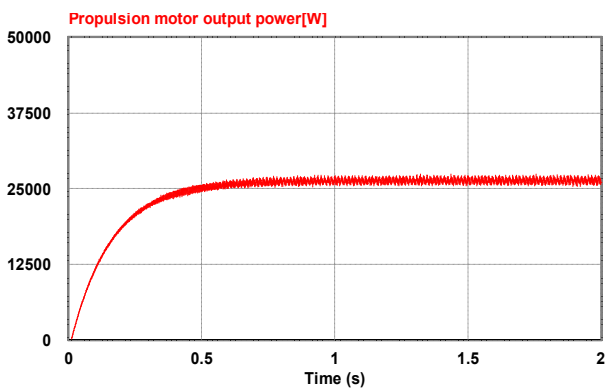


Figure 17: Simulation result of output power for propulsion motor

#### 4.2.3 황천 항해 시 전 출력 모드

전기추진선박의 황천 항해 시에는 바람, 파도, 피칭 등에 의해 선박의 추진을 위해 큰 토크가 필요하다. 이를 위해서 정상 항해 시에 사용하는 발전기 출력과 충전된 배터리 출력을 추가하여 전 출력 모드로 선박을 운전한다. 이 경우의 시뮬레이션을 위해서 선박 부하를 20[%] 증가하여 설정하였다.

Figure 18은 추진전동기의 속도 시뮬레이션 결과이며 증가된 부하에 대응하여 전 출력 모드에 의해 속도 응답특성이 양호함을 알 수 있다.

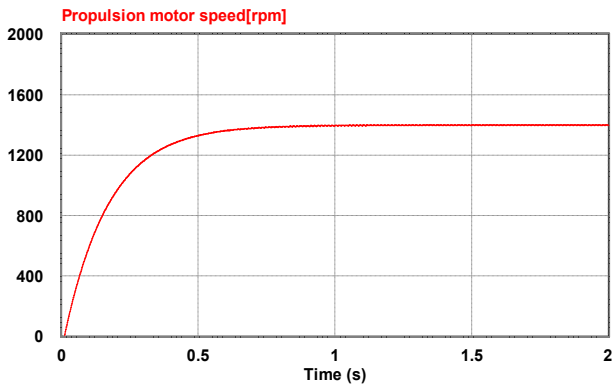


Figure 18: Simulation response of speed for propulsion motor

Figure 19는 출력을 위해서 추진전동기에 공급되는 직류 (60A)과형이며, Figure 20에 나타내고 있는 발전기에서 공급되는 50A에 배터리에서 10A의 전류를 추가로 보충하여 공급한 것임을 알 수 있다. Figure 21은 추진전동기로 공급되는 전압이다.

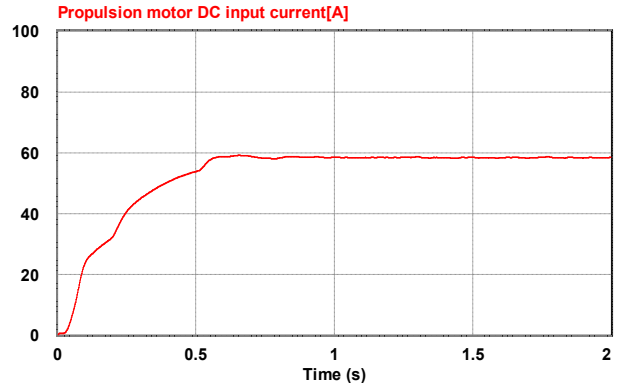


Figure 19: Simulation result of DC input current for propulsion motor

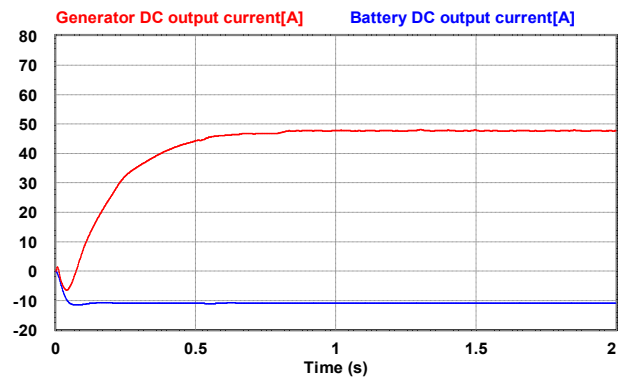


Figure 20: Simulation result of DC output current for generator and battery

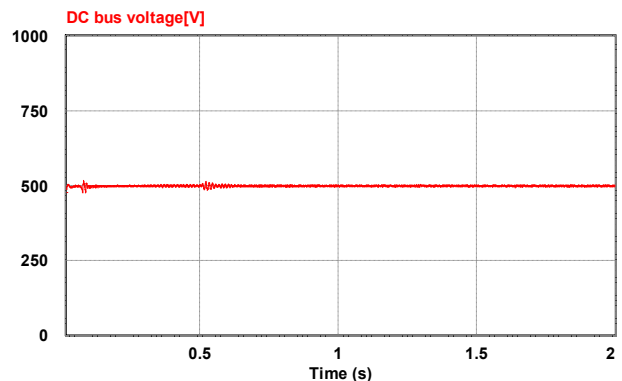


Figure 21: Simulation result of DC bus voltage for propulsion motor

Figure 22는 전 출력 모드에서의 추진전동기의 출력을 시뮬레이션 한 파형이다.

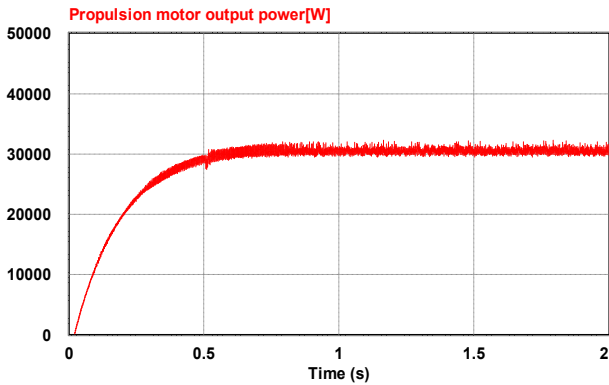


Figure 22: Simulation result of output power for propulsion motor

## 5. 결 론

직렬 하이브리드 전기추진 방식을 선박의 부하 운전환경을 고려한 새로운 운전 모드 개념을 적용하여 선박의 부하 운전특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 부하 운전환경 분석에 따른 운전 모드를 배터리 단독 출력 운전 모드, 발전기 단독 출력 운전 모드 및 전 출력 운전 모드로 설정하였으며 각 모드별 운전 특성을 시뮬레이션을 통해 확인한 결과에서 설정 속도응답, 전류, 전압 및 출력이 부하 환경에 적절히 대응하여 단독 또는 병렬운전이 진행됨을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원(KIMST)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(NO. 20150177)

## References

- [1] T. J. McCoy, "Trends in ship electric propulsion," Proceedings of IEEE Workshop on Power Engineering Society Summer Meeting Electrical and Electronics Engineers, pp. 343-346, 2002.
- [2] J. W. Park and S. Y. Kim, "Trend of technology for electric propulsion system," Journal of Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 31-37, 2014 (in Korean).
- [3] B. Zahedi, Shipboard DC Hybrid Power Systems, Ph.D. Dissertation, Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2014.
- [4] Y. Tang and A. Khaligh, "On the feasibility of hybrid battery/Ultracapacitor Energy Storage System for next generation shipboard power systems," Proceedings of IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010.
- [5] B. Woo, High-Power Converters and AC Drives, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2006.