



Received: 2024/09/23
Revised: 2024/10/04
Accepted: 2024/11/04
Published: 2024/12/31

***Corresponding Author:**

Heemoon Kim

Eco-friendly Propulsion Technology Team,
Korea Marine Equipment Research Institute
28-36, Yusangongdan4-gil, Yangsan-si,
Gyeongsangnam-do, 50592, Korea
E-mail: hmkim@komeri.re.kr

운항 프로파일 기반 전력제어시스템 시뮬레이터 개발

Development of a Power Control System Simulator Based on Ship Operation Profiles

이나영¹, 박영남², 김희문^{3*}

¹국립한국해양대학교 기관시스템공학과 석사과정

²해군 중령/국립한국해양대학교 해양군사대학 해양공학전공 박사과정

³(재)한국조선해양기자재연구원 친환경추진기술팀 팀장/책임연구원

Nayoung Lee¹, Youngnam Park², Heemoon Kim^{3*}

¹M.S candidate, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University

²CDR, ROK Navy/Ph.D candidate, Major in Ocean Engineering, College of Maritime Military, Korea Maritime & Ocean University

³Principal researcher/Team leader, Eco-friendly Propulsion Technology Team, Korea Marine Equipment Research Institute

Abstract

본 논문은 선박 운항 프로파일을 기반으로 한 전력제어시스템 시뮬레이터 개발에 대해 다룬다. Matlab/Simulink를 활용하여 전력제어시스템, 발전원, 전력 부하를 모사하고 디젤발전기의 단위 부하별 연료소모량 데이터를 기반으로 개별 발전기의 연료소모량을 계산하는 방법을 제안한다. 또한 시뮬레이터에 선박의 운항 프로파일 입력을 통해 그 유효성을 검증하였다.

This study discusses the development of a power control system simulator based on a ship operation profile. Using Matlab/Simulink, the simulator models the power control system, power generators, and electric load, and proposes a method for calculating the fuel consumption of individual diesel generators based on unit load fuel consumption data. The effectiveness of the simulator was verified by inputting the ship's operation profile.

Keywords

전력관리시스템(Power Management System),
전력제어시뮬레이터(Power Control System Simulator),
선박 운항 프로파일(Ship Operating Profile),
연료 소모량(Fuel Oil Consumption)

Acknowledgement

이 논문은 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가원의 지원을 받아 수행된 “시제품 연계 HILS 및 육상 성능검증 기술개발”의 연구 결과임(RS-2024-00432064)

1. 서론

선박은 운항 모드와 환경에 따라 요구되는 선내 전력 부하가 달라지며 이러한 전력 부하의 크기나 변동성은 발전원, 선내 계통 및 전력관리시스템을 설계하는 기본 데이터이다[1,2]. 최근 강화되는 배기배출물 규제와 탄소중립에 대한 국제사회의 요구에 따라 선박 효율 개선을 위한 다양한 기술이 개발되어 적용되고 있고[3,4] 전력시스템 또한 기존의 발전원과 다른 연료전지, 배터리 등 친환경적인 발전원에 대한 적용성 연구가 활발히 진행되고 있다[5-7].

현존선 및 신조선에 새로운 발전원을 적용할 경우 실제 운항에 따른 전력계통의 상태와 에너지 효율 개선 효과에 대해 사전에 검토할 필요가 있으나, 신조선 에너지효율지수(EEDI, energy efficiency design index)와 같이 일반적인 수식에 의존하여 에너지효율을 개선하거나 ELA(electric load analysis)에 따른 단순한 운항 모드별 선내 전력 부하량을 확인하는 것이 최선이었다.

본 논문에서는 Matlab/Simulink에 기반한 선박 전력시스템 및 에너지효율 시뮬레이터를 제안한다. 해당 시뮬레이터는 선박의 전력 시스템을 간소화하고 전력 관리 시스템의 필수적인 제어 알고

리즘을 모델링하여 부하에 따른 전력 계통의 상태를 모니터링할 수 있도록 하였다. 또한 발전원의 부하에 따른 SFOC(specific fuel oil consumption)을 기반으로 연료 소모량을 계산할 수 있는 시뮬레이터 모델을 확보하고자 하였다.

2. 시뮬레이터 설계

2.1 전력시스템 모델

발전원 및 전력부하는 계통의 유효전력 및 유효전력을 입력하거나 출력하는 형태로 모델링할 수 있으며 식 (1), 식 (2)와 같이 발전기 및 전력부하로 동작할 수 있다.

- 유효전력

$$P(s) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right) \frac{n_{p1} + T_{p1s}}{1 + T_{p2s}} \quad (1)$$

- 무효전력

$$Q(s) = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right) \frac{n_{q1} + T_{q1s}}{1 + T_{q2s}} \quad (2)$$

여기서, V_0 : 초기 정상분 전압,

P_0, Q_0 : V_0 에 따른 초기 유효전력·무효전력,

V : 정상분 전압,

n_p, n_q : 부하 특성 제어를 위한 상수,

T_{p1}, T_{q2} : 유효전력 동적 특성 제어를 위한 시정수.

2.2 전력관리시스템 제어로직

긴 시간 스케일에서 효과적인 전력제어시스템 시뮬레이션을 위해서는 필수적인 제어 로직으로만 시스템을 간소화할 필요가 있다. 해당 모델에서는 선박 전력관리시스템의 여러 기능 중 전력부하에 따라 발전기의 운전 및 정지를 결정하는 load dependent start stop에 대한 알고리즘을 모델에 구현하였고, 전력 부하에 따른 디젤발전기(DG, diesel generator)의 운전 대수를 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1은 동일한 용량의 DG 4기를 탑재하는 선박에 대한 load dependent start stop 기능에 따른 발전기 운전 상태를 나타낸 예시이다. 여기서 전력

부하율은 발전기 1기의 정격용량이 기준이며, 전력 부하율 크기에 따른 발전기 운전 및 정지에 대한 제어 로직을 설계하였다.

Table 1. DG running status according to electric load for PMS load dependent start stop

Diesel generator	Electric load (%)			
	0 - 85	85 - 170	170 - 255	Higher than 255
DG No.1	Run	Run	Run	Run
DG No.2	Stop	Run	Run	Run
DG No.3	Stop	Stop	Run	Run
DG No.4	Stop	Stop	Stop	Run

2.3 SFOC 계산 및 적산값 계산을 위한 모델

개별 발전기 부하에 대한 SFOC에 대한 정확성을 높이기 위하여 실측 데이터 기반으로 식 (3), 식 (4)의 Lagrangian interpolation을 통해 획득하였다[8].

$$L_{sfoc}(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x) \quad (3)$$

여기서, $l_i(x)$ 는 라그랑지안 기저 다항식이며 아래의 식과 같이 정의된다.

$$l_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (4)$$

DG의 부하량과 해당 부하값에 따른 SFOC값을 알 수 있을 때 식 (5)에 의해 연료소모량 값을 계산할 수 있으며, 시뮬레이션 시간 동안 적산하면 전체 연료소모량을 얻어낼 수 있다.

$$FOC_{DG} = x_{loadkw} L_{sfoc}(x_{load\%}) \quad (5)$$

3. 시뮬레이터 모델 및 입력 데이터

3.1 시뮬레이터 모델의 구성

시뮬레이터의 전체 시스템은 Fig. 1과 같이 발전기, 전력 부하, 전력관리시스템 및 모니터링 시스템으로 구성된다. 발전기와 전력부하 사이에 위치한 버

스단에서 전압, 전류 및 전력을 측정할 수 있으며, 여기에서 수집된 데이터는 각각 전력관리시스템과 모니터링 시스템으로 송신된다.

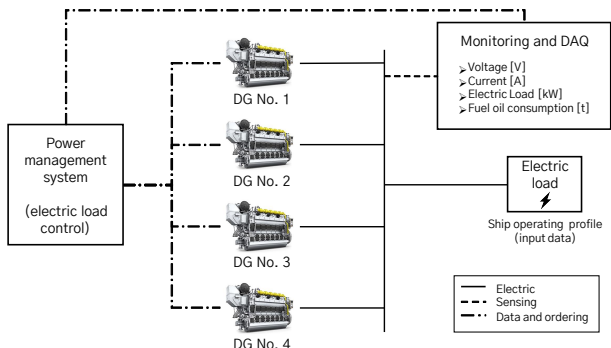


Fig. 1. Configuration of simulator model

선박의 전력부하 변동은 시뮬레이터의 입력 데이터이다. 실제 선박에서는 전력을 소모하는 장비의 운전 여부에 따라 전력부하가 실시간으로 변동하지만 해당 모델은 전력부하 변동에 따른 전력 시스템의 상태와 연료 소모량 확인 목적에 따라 선박의 운항 데이터를 입력하여 동작하도록 구성하였다.

전력관리시스템은 Fig. 2의 순서도와 같이 전력부하를 계산하여 load dependent start stop 기능에 따라 개별 발전기에 운전 및 정지를 지령하고, 발전기가 병렬 운전되는 경우 동일한 부하 분담율로 운전되도록 하였다.

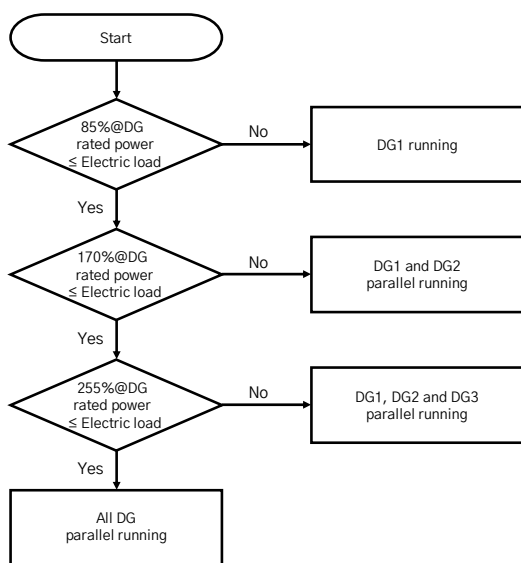


Fig. 2. Sequence diagram for power management system

모니터링 시스템에서는 각 버스단의 3상 전압, 전

류 및 전력 데이터와 개별 발전기의 부하율에 따라 SFOC의 순시값, 평균 SFOC값을 그래프로 나타낼 수 있도록 하였고, 전체 연료소모량을 적산할 수 있도록 구성하였다.

3.2 시뮬레이터 검증을 위한 대상 선박 데이터

대상 선박은 총 4개의 항구에 정기적으로 입출항하는 13,000 TEU 컨테이너 선박으로 주요 재원은 Table 2와 같다.

Table 2. Specifications for target vessel

Part	Item	Value
Main engine	sMCR power	61,776 kW
	sMCR speed	98.5 rpm
	Propeller LRM	5 %
Aux. generator	Unit	4
	Rated speed	720 rpm
	Rated power	3,300 kW
	Output voltage	6,600 V
	Grid voltage	690 V

Table 3는 각 포트별 대상 선박의 포트별 입출항 스탠바이(S/B), 정박 및 항해 기간 동안 전력 소모량에 대한 데이터를 수집한 결과이다. 해당 데이터는 항해기간 동안 100초 간격으로 수집하여 저장하였으며, 그 사이 시점의 값은 이전 데이터를 유지한다고 가정하였다.

Table 3. Navigation data for subject vessel

No	Course	S/B for arrival (h)	In port (h)	S/B for departure (h)	Seagoing (h)
1	Port A - Port B	-	24	3	39.4
2	Port B - Port C	3	24	3	13.1
3	Port C - Port D	3	24	3	36.4
4	Port D - Port C	3	24	3	36.4
5	Port C - Port A	3	-	-	28.6
Sum		12	96	12	153.8

Fig. 3는 수집된 시간별 전력 부하에 대한 변동 그래프이며 개발한 시뮬레이터의 입력 파라미터이다. 컨테이너 선박 전력 부하의 큰 비중을 차지하는 냉동 컨테이너를 전량 적재하여 운전함에 따라 in port 상태에서도 DG 1기의 부하를 넘어서는 것을 확인할 수 있다.

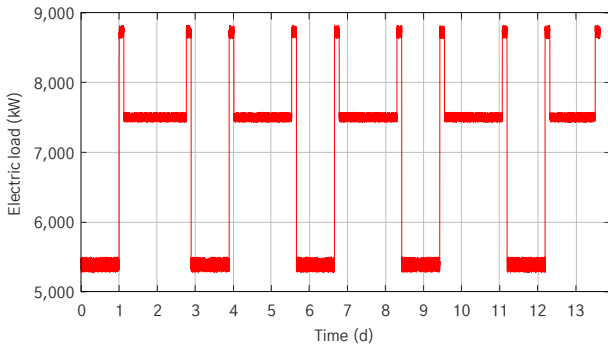
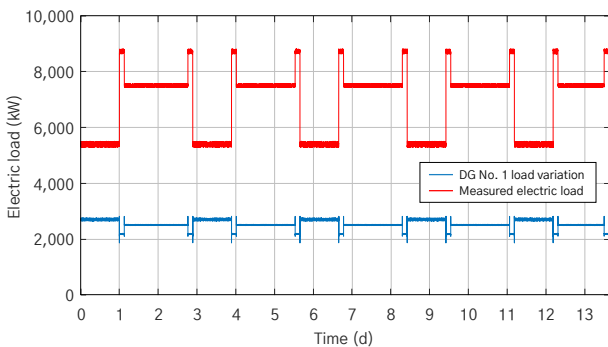
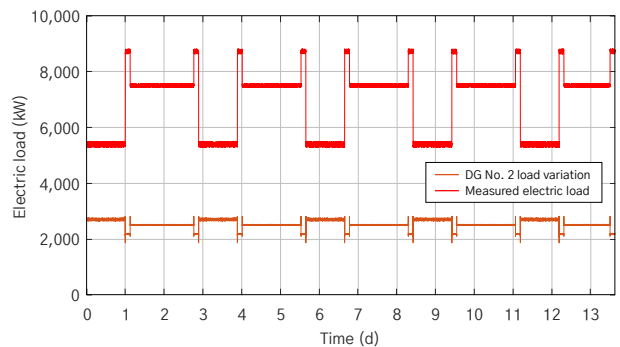


Fig. 3. Navigation data for target vessel

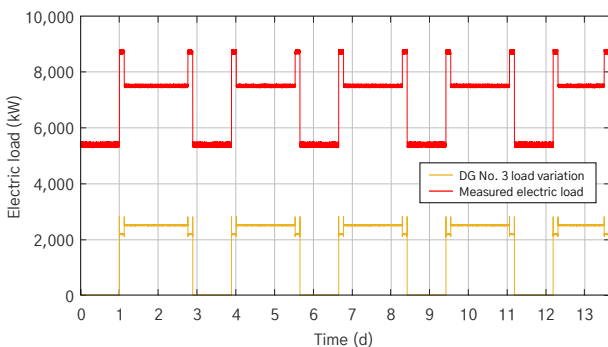
입출항 스탠바이 시 주기관 보조 블로워 구동 및 추가적인 전력 부하의 인가로 인해 약 8.7 MW의 전력이 요구되는 것을 확인할 수 있으며, 항해 중에도 약 7.5 MW의 전력 부하가 인가되는 것을 알 수 있다.



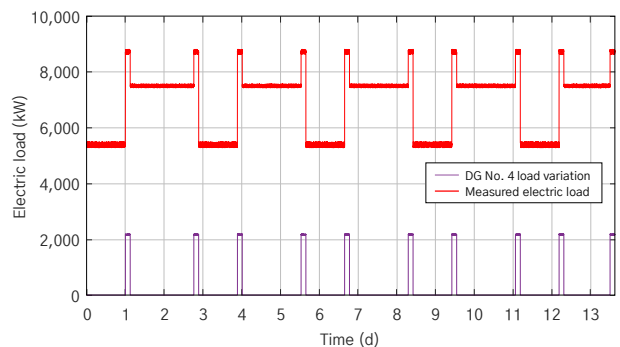
(a) DG No. 1



(b) DG No. 2



(c) DG No. 3



(c) DG No. 4

Fig. 4. Load variation for the diesel engines

4. 시뮬레이션 검증 및 결과

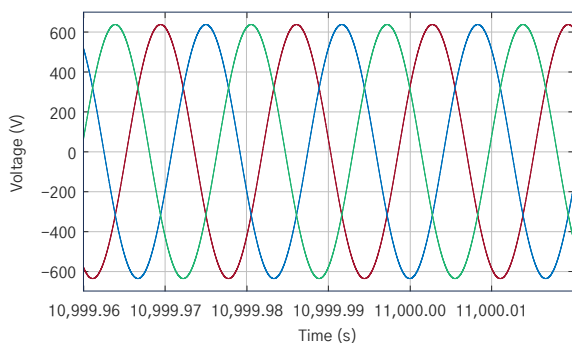
4.1 전력제어시스템

전력제어시스템으로 입력되는 전력 부하 변동에 따라 load dependent start stop 기능이 제대로 동작하는 것을 Fig. 4와 같이 확인할 수 있다.

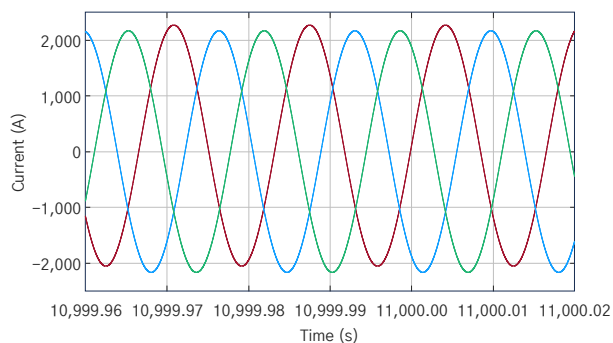
전력 요구량이 가장 낮은 in port 구간에서도 DG 1기의 정격인 3,300 kW의 85 %인 2,805 kW를 상회하므로 DG No. 1과 DG No. 2가 병렬운전하는 것을 확인할 수 있다. 입출항 스탠바이 구간에서는 DG 3기의 정격인 9,900 kW의 85 %인 8,415 kW를 상회함에 따라 DG 4기가 병렬운전하는 것을 알 수 있고, seagoing 상태에서는 8,415 kW 이하로 운전됨에 따라 No. 1부터 No. 3까지 DG 3대가 병렬운전하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 계통 전압 및 전류

Fig. 5는 스탠바이 구간에서 특정 시간대의 No. 1 DG의 전압 및 전류 상태를 확인한 그래프이다. 전체



(a) 3-phase voltage



(b) 3-phase current

Fig. 5. 3-phase voltage and current for DG No. 1

운항 구간에서 10,999.96~11,000.02초 구간을 한정하여 조정된 시간 스케일에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과이며, DG No. 1의 3상 출력 전압 및 전류를 확인할 수 있다. 전력제어시스템에서 DG No. 1로 지령한 전력량에 따라 전류가 출력되고 있으며, 계통의 전압과 동일한 전압이 인가되고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 발전원 및 전체 연료 소모량

시뮬레이션 전체 시간 동안 개별 DG 및 전체 발전 연료소모량을 Table 4와 같이 확인할 수 있다.

Table 4. Fuel oil consumption of each DGs for generating power

Diegel generator	Fuel oil consumption for generating power (ton)
DG No. 1	157.414
DG No. 2	157.414
DG No. 3	96.619
DG No. 4	12.665
Sum	424.112

DG No. 1, No. 2는 지속적으로 병렬운전을 수행함에 따라 동일하게 157.414톤을 소모하는 것으로 나타나 있고, seagoing 및 스탠바이 구간에서 병렬 운전되는 DG No. 3는 96.619톤을 소모하는 것으로 확인된다. 스탠바이 및 seagoing 구간에서 간헐적으로 운전되는 DG No. 4의 경우 12.665톤으로 가장 적은 양의 연료가 소모됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Matlab/Simulink 기반의 전력제어시스템 시뮬레이터를 개발하여 선박의 운항 프로파일 기반으로 전력, 제어시스템 및 연료소모량을 예측하는 연구를 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 선박의 전력제어시스템을 포함한 발전원, 전력부하, 모니터링 시스템을 모사하여 13일 이상의 긴 시간 스케일의 시뮬레이션을 효과적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 전력제어시스템에서 load dependent start stop 기능은 DG의 운전 대수를 결정하는 매우 중요한 요인이며, 해당 기능을 통해 DG의 운전 경향 및 시간별 전력 부하를 확인할 수 있었다.
- (3) DG의 부하별 SFOC 측정값을 기반으로 Lagrangian interpolation을 적용하여 부하에 따른 SFOC값을 얻을 수 있는 수식을 수립하였으며, 해당 값의 적산을 통해 개별 DG에 대한 연료소모량을 계산할 수 있었다.
- (4) 시뮬레이션 스텝 시간 및 구간 조정을 통해 특정 시점에서의 개별 발전원 및 부하 등 전력시스템 구성요소에 대한 전압 및 전류값을 획득할 수 있음을 확인하였다.

선박의 신조 또는 개조를 준비하는 과정에서 다양한 운항 시나리오에 의해 예측되는 정보들을 사전에 검토하는 것은 매우 중요하다[9]. 예를 들어 축발전기나 ESS를 신조선에 탑재하는 경우 본 시뮬레이터를 통해 최적 용량의 축발전기나 ESS를 선정함으로써

써 경제성을 개선할 수 있고, 특정 구간의 전압 및 전류를 시뮬레이션함으로써 ESS의 C-rate를 효과적으로 검토할 수 있다. 또한 본 시뮬레이터를 통해 획득한 예상 연료 소모량은 지정된 항로에서 대상 선박을 투입함에 따르는 예상 비용을 미리 검토할 수 있고 이를 통해 효과적이고 체계적인 선대 운용이 가능하다[10-11].

본 시뮬레이터의 전력제어시스템은 DG의 운전대수를 결정하는 가장 기본적인 제어로직으로만 구성되어 있다. 실제 항해 시에는 로직 작동에 요구되는 지연시간이나, DG가 구동되고 계통에 연계되는 시간 등의 다이나믹한 요소들은 모델에 반영되지 못하였다. 이러한 기능 및 과도상태 시뮬레이션을 위한 세부 모델링은 향후 연구를 통해 개선하고자 하며, 예상 연료소모량 기반으로 연료 절감을 위한 제어로직 설계 및 경제성 분석 또한 추가적으로 수행하고자 한다.

본 연구 결과를 토대로 다양한 선박의 신조 및 개조에 대한 기초 자료로 활용하고 추가적인 연구로의 확장을 기대한다.

참고문헌

- [1] Byrne, Raymond H., Tu A. Nguyen, David A. Copp, Babu R. Chalamala, and Imre Gyuk. "Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems." *IEEE Access* 6 (2017): 13231-60.
- [2] Khersonsky, Yuri, and Giorgio Sulligoi. "New IEEE & IEC Standards for Ships and Oil Platforms." Paper presented at the 2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2014.
- [3] Bayraktar, Murat, and Onur Yuksel. "A Scenario-based Assessment of the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) and Carbon Intensity Indicator (CII) Regulations." *Ocean Engineering* 278 (2023): 114295.
- [4] IMO. "IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships." In RESOLUTION MEPC.377(80), edited by IMO, IMO, 2023.
- [5] Vosen, S. R., and J. O. Keller. "Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Electric Power Systems: Optimization of System Performance and Cost through Control Strategies." *International Journal of Hydrogen Energy* 24, No. 12 (1999): 1139-56.
- [6] Sarigiannidis, A., A. Kladas, E. Chatziniolaou, and C. Patsios. "High Efficiency Shaft Generator Drive System Design for Ro-Ro Trailer-Passenger Ship Application." Paper presented at the 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), 2015.
- [7] McKinlay, C. J., S. R. Turnock, and D. A. Hudson. "Fuel Cells for Shipping: To Meet on-Board Auxiliary Demand And." *Energy Reports* (2021): 21.
- [8] Dahiya, Vijay. "Analysis of Lagrange Interpolation Formula." *IJISSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* 1, No. 10 (2014).
- [9] Chalfant, Julie. "Early-Stage Design for Electric Ship." *Proceedings of the IEEE* 103, No. 12 (2015): 2252-66.
- [10] Xiong, Zi-hao, Zong-ren Xie, Jian-wei Lv, and Yi-fan Xu. "Task Strategy Optimization for Multi-State System Based on Virtual Ship." *Simulation Modelling Practice and Theory* 119 (2022): 102578.
- [11] Lang, Xiao, Helong Wang, Wengang Mao, and Naoki Osawa. "Impact of Ship Operations Aided by Voyage Optimization on a Ship's Fatigue Assessment." *Journal of Marine Science and Technology* 26 (2021): 750-71.