

# 전기추진선박의 통합전력계통 시뮬레이션 모델에 관한 연구

구현근<sup>1</sup>, 광기곤<sup>2</sup>, 김장목<sup>†</sup>

## A Study Integrated-Power-System Simulation Model of All-Electric-Ship

Hyun-Keun Ku<sup>1</sup>, Ki-Kon Kwak<sup>2</sup>, and Jang-Mok Kim<sup>†</sup>

### Abstract

The simulation model of All-Electric-Ship consists of electrical and mechanical systems. Running the total simulation requires considerable time and causes a lack of computer memory, because the two systems have different dynamic characteristics. Therefore, integrated simulation is practically impossible. This paper proposes the simplified model of electrical system to reduce simulation time significantly, compared to the detailed model. The validity of the proposed simplified model is verified by comparing detailed and simplified simulation results. Thus, the simplified models are applied to the integrated system. As a result, total system simulation can be implemented.

**Key words:** AES(All Electric Ship), IPS(Integrated Power System), Simulation, Modeling, Simplified model

### 1. 서 론

최근 고유가 시대를 맞이하여 연료소모율에 대한 해운선사들의 관심이 높아지고 있으며, 배출가스 허용기준을 만족하기 위한 대책으로 전기추진선박에 대한 활발한 기술개발이 진행되고 있다. 기계적 추진 시스템이 적용된 기존의 선박들은 엔진과 프로펠러에 의해 직접 구동되는 방식이지만 전기적 추진방식은 발전기에서 생산된 전력을 추진뿐만 아니라 선박 내의 모든 부하에 공급하는 시스템이다. 전기추진시스템은 에너지 효율향상 및 온실가스 저감 효과 등 많은 장점을 가지고 있으며 이를 바탕으로 전기추진시스템 선박의 시장 규모는 점차 확대되고 있다<sup>[1]-[3]</sup>. 전기추진선박의 기술개발 단계에서 설계, 시스템 요구조건 분석, 전력관리 및 제어를 위해서는 신뢰할만한 시뮬레이션 모델이 필수적이며, 이러한 시뮬레이션 모델을 구성하기 위해서는 전기추진선박의 내부 요소들의 적합한 모델링이 필요하고 이러한 요소들을 설계된 계통도에 맞게 통합해야 하지만 이러한 시스템 통합에는 많은 어려움이 있다<sup>[3]</sup>.

전기추진선박의 구성요소들은 크게 전기적 시스템과 기계적 시스템으로 분류되며, 표 1은 두 시스템의 시뮬레이션 구동 관점에서의 차이를 비교한 것이다. 발전기, 정류기, DC/AC 인버터 그리고 DC/DC 컨버터와 같은 전기적 시스템은 터빈, 엔진, 프로펠러 및 선박모델과 같은 기계적 시스템에 비해 상대적으로 운전주파수와 응답성이 매우 빠르며, 이로 인해 전기적 시스템은 기계적 시스템에 비해 단위 시간당 시뮬레이션 소요시간이 길며 구동 컴퓨터의 메모리 사용량도 급증하게 된다.

이러한 동특성이 다른 두 시스템을 통합하여 선박의 운전 상황에 대한 시뮬레이션의 구동 시 상대적으로 운전주파수가 빠른 전기적 시스템을 기준으로 샘플링 주파수를 선정해야 하나 이를 기준으로 시뮬레이션의 구동 시 소요시간과 메모리 사용량이 급격하게 증가하여 실질적으로 시뮬레이션의 구동이 불가능하다. 그러므로 전기적 시스템과 기계적 시스템의 동특성을 모두 반영할 수 있는 통합시뮬레이션 모델에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 기존의 연구들에서는 선박 내부의 구성요소들을 간략화하거나 전기적 시스템의 요소들은 이상적인 전압/전류원으로 대체하여 구성하였기 때문에 실제의 내부 구성요소들의 특성이 반영되지 않는 단점이 있다<sup>[3]</sup>.

따라서 본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 전기적 시스템의 구성요소들을 간략화된 수학적 모델로 구성하여 본래의 모델과 비교를 하고, 기계적 시

Paper number: TKPE-2015-20-1-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: jmok@pusan.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

<sup>2</sup> Samsung Heavy Industries Co. LTD

Manuscript received Nov. 13, 2014; accepted Dec. 10, 2014

TABLE I  
CHARACTERISTIC COMPARISON OF ELECTRICAL  
SYSTEM & MECHANICAL SYSTEM

	AES Components	
	Electrical Component	Mechanical Component
Operating Frequency	$10^3 \sim 10^6 \text{ Hz}$	$1 \sim 10 \text{ Hz}$
Speed Response	fast	slow
Simulation Run Time	long	short
Amount of Memory	heavy	light

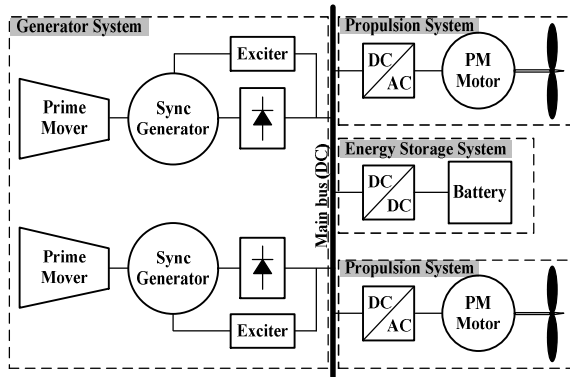


Fig. 1. Single-line diagram of proposed AES model.

시스템과의 통합을 하였으며, 이를 이용해 선박 속도의 가-감속 시나리오를 통해 완성된 시뮬레이션을 검증하였다.

## 2. 전기추진선박 계통 구성요소 모델링

그림 1은 본 논문에서 제안하는 전기추진선박의 단선도이며, 발전시스템과 추진시스템, 에너지저장시스템으로 구성된다.

전기적 시스템은 발전기 및 다이오드 정류기, 여자기, DC/AC 인버터, DC/DC 컨버터 등을 시뮬레이션 구현을 위해 수학적 해석을 통한 간략화된 모델을 제안하고 개별적 요소들의 동작은 상세모델과 결과 및 시뮬레이션 구동 시간을 비교하였다.

### 2.1 발전시스템 모델링<sup>[4]</sup>

발전시스템은 그림 2와 같이 발전기를 구동하는 원동기와 3상동기발전기, 발전기의 출력을 제어하는 여자시스템, 다이오드 정류기로 구성된다. 발전시스템 시뮬레이션 구동 시 다이오드 정류기의 전기적 특성으로 인해

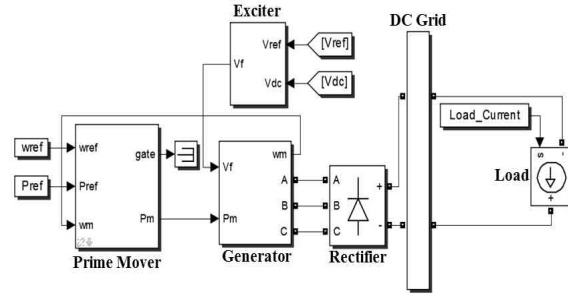


Fig. 2. The detailed model of power generation system.

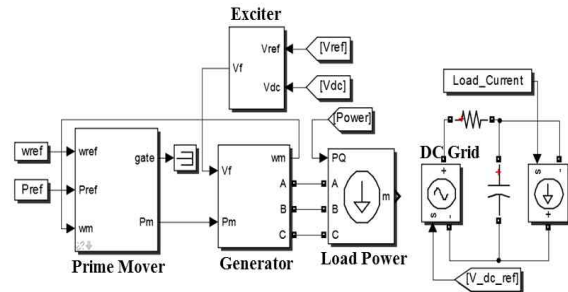


Fig. 3. The proposed model of power generation system.

시뮬레이션 소요 시간이 오래 걸리므로, 그림 3과 같은 간략화된 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 그림 3의 발전기는 d-q축 모델 기반의 3상 동기발전기를 이용하였으며, 이는 MATLAB/SIMULINK에서 제공하는 Preset 모델을 적용하였다. 발전기 입력은 원동기의 출력에서 제공받게 되고, 발전기 측과 부하 측을 분리하여 식(1)과 같이 부하의 양을 계산하여 발전기에 인가한다. 식 (1)의  $P_{load}$ 는 부하전력,  $V_{dc}$ 는 직류단 전압,  $i_{dc}$ 는 출력 전류이며, 이때의 발전기 d,q축 전압 ( $V_d, V_q$ )를 이용해 식 (2)와 같이 DC계통의 전압을 계산하여 부하 측에 전압원으로 인가하였다. 여자시스템은 부하가 변동할 때에 발전기의 계자전압을 제어하여 발전기의 출력을 제어하는 역할을 수행하며, 그림 3에 적용된 여자시스템은 IEEE에서 표준모델로 제공하는 DC1A 타입의 여자를 적용하였다<sup>[5]</sup>.

$$P_{load} = V_{dc} \cdot i_{dc} \quad (1)$$

$$\sqrt{V_d^2 + V_q^2} = V_{dc\_ref} \quad (2)$$

그림 4는 발전시스템의 상세모델과 제안한 모델의 부하 변동에 따른 시뮬레이션 결과 비교파형이다. 부하전류를 Ramp의 형태로 Up/Down 구동 시켰을 때, 푸른색 선은 상세모델의 시뮬레이션 결과이며, 붉은색은 제안한 모델의 결과파형을 보여준다. 부하변동에 따라 원동기의 출력과, DC 계통전압, 발전기 주파수가 적절하게 제어되고 있으며, 고조파 함유의 양에서만 두 시뮬레이션 결과가 차이가 발생하나 과도 및 정상상태에서의 시뮬레

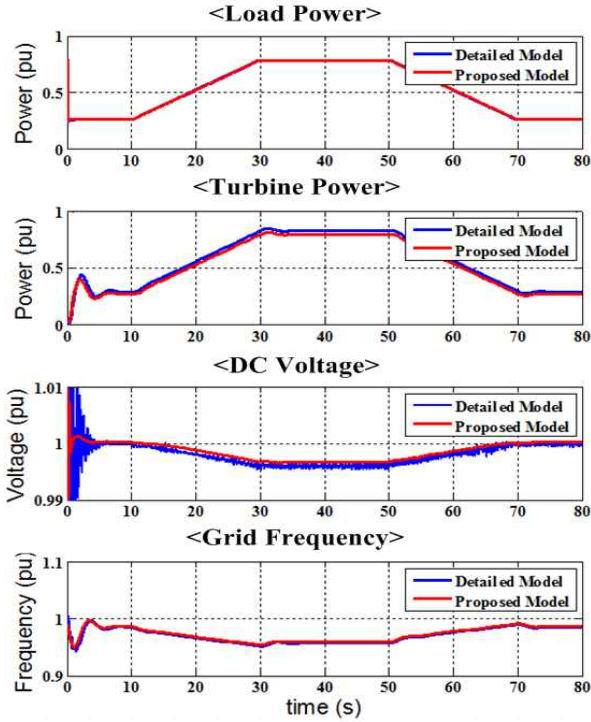


Fig. 4. Simulation result of power generation system.

이전 결과는 거의 유사하며 표 II와 같이 시뮬레이션 소요시간도 확연히 감소한 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 추진시스템 모델링

추진시스템은 그림 5와 같이 DC/AC 인버터와 추진전동기로 구성된다. 추진전동기는 영구자석 전동기로 회전자의 기계적 구조가 원통형으로 형성되어, 쇠교 자속의 분포가 정현적인 원통형 영구자석 동기전동기를 적용하여 이를 시뮬레이션 모델에 이용하였다<sup>[6]</sup>. DC/AC 인버터는 고속의 PWM 스위칭 동작을 통해 DC전압을 원하는 크기와 주파수의 AC 전압으로 변환하여 추진전동기에 인가하며 이는 빠른 운전주파수로 인해 시뮬레이션 소요시간이 길어진다. 추진전동기의 제어를 위해 속도 및 전류제어기가 필요하며, 제안한 모델은 전류 제어기에서 출력되는 AC 전압 지령 값을 실제 스위치로 구성된 인버터를 거치지 않고 추진전동기 모델에 직접 인가되어 스위칭 특성은 나타나지 않으나 식 (3)과 같이 추진전동기의 파워( $P_{PM}$ )를 계통 전압으로 나누어 DC계통( $V_{grid}$ )에 전류( $i_{grid\_PM}$ )으로 인가하였다.

$$i_{grid\_PM} = \frac{P_{PM}}{V_{grid}} \quad (3)$$

그림 7은 추진시스템의 상세모델과 제안한 모델의 정격 속도 지령에 따른 시뮬레이션 결과 비교과형이다. 속도의 변화에 따라 추진전동기의 입력전류, 토크, 출력파워가 적절하게 제어됨을 보여준다.

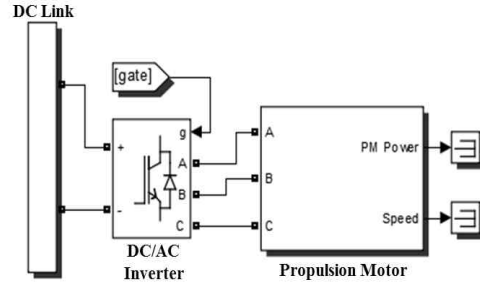


Fig. 5. The detailed model of propulsion system.

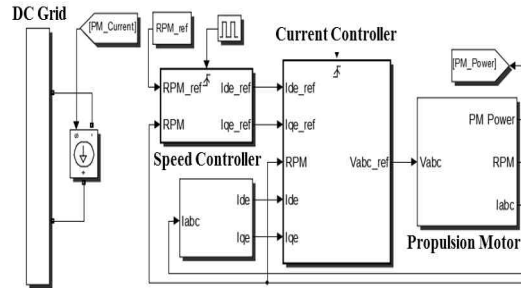


Fig. 6. The proposed model of propulsion system.

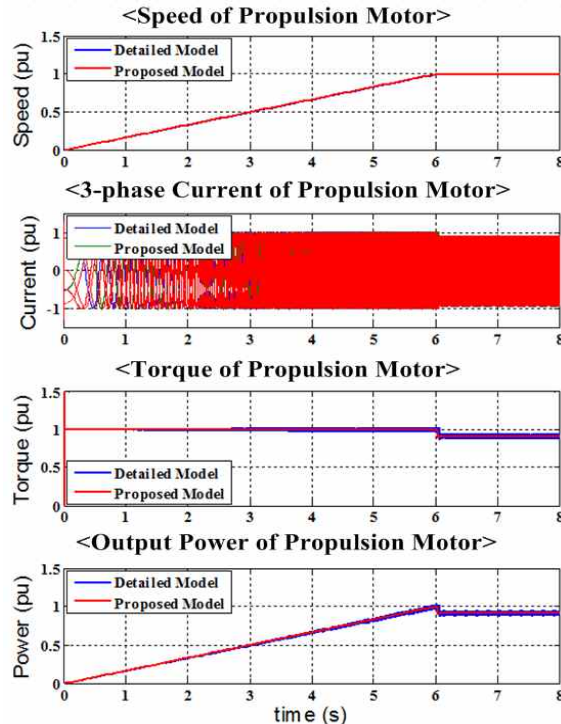


Fig. 7. Simulation result of propulsion system.

발전시스템과 마찬가지로 제안한 모델과 상세모델의 시뮬레이션 결과는 고속의 스위칭으로 인한 리플성분을 제외하고는 거의 유사하며, 시뮬레이션 소요시간도 줄어든 것을 표 II를 통해 확인할 수 있다.

### 2.3 에너지저장시스템 모델링<sup>[7]</sup>

에너지저장시스템은 계통의 전력 품질을 개선시키는

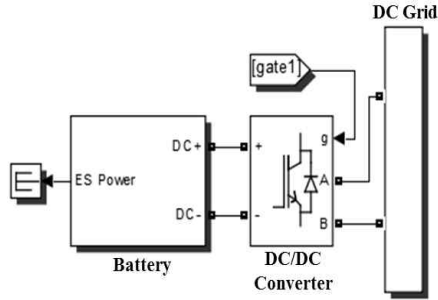


Fig. 8. The detailed model of energy storage system.

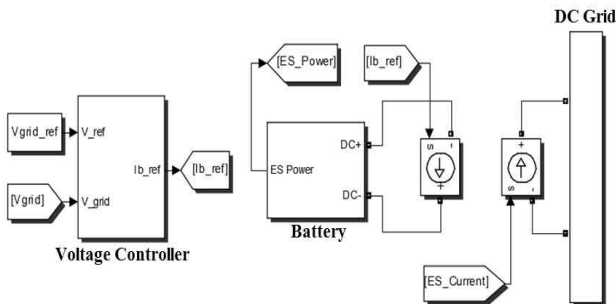


Fig. 9. The proposed model of energy storage system.

용으로 이용된다. 전력품질의 저하원인은 추진전동기의 기동이나 정지, 대형부하의 갑작스러운 투입, 계통의 단락 시에 생길 수 있는 정전이나 순간전압변동이 있으며 이 때 에너지 저장장치를 적절히 사용하여 전력품질의 개선효과를 기대 할 수 있다. 그림 8과 같이 양방향 DC/DC 컨버터와 배터리로 구성하였으며, 양방향 DC/DC 컨버터 또한 이전의 요소들처럼 간략화된 모델을 제안하였다. 배터리는 무게대비 용량성이 우수하고 에너지 밀도가 높은 Li-ion 배터리를 채택하였으며, 이는 MATLAB/SIMULINK의 preset 모델을 이용하였다.

에너지저장시스템은 컨버터의 스위칭 동작을 통하여 DC 계통의 전압을 일정하게 제어하나 제안한 모델은 추진시스템의 수학적 모델과 같이 제어기에서 출력되는 전류지령을 배터리 모델에 직접 부여하여 충·방전 특성을 획득하였으며 식 (4)와 같이 계통의 충·방전 동작을 모사를 위해 배터리의 파워( $P_{batt}$ )를 계통전압( $V_{grid}$ )으로 나누어 DC계통에 전류원( $i_{grid\_batt}$ )으로 인가하였다.

$$i_{grid\_batt} = \frac{P_{batt}}{V_{grid}} = \frac{V_{batt} \times I_{batt}}{V_{grid}} \quad (4)$$

그림 10은 에너지저장시스템의 상세모델과 제안한 모델의 충·방전에 따른 시뮬레이션 결과 비교파형이다. 음의 부하 인가시에는 배터리의 충전, 양의 부하 인가 시에는 방전을 통해 DC계통의 전압이 일정하게 제어되고 있다. 두 시뮬레이션 모델의 결과는 유사하며 시뮬레이션 소요시간이 확연히 줄어든 것을 확인 할 수 있다.

TABLE II  
COMPARISON OF SIMULATION RUN TIME (min/sec)

	Simulation run time	
	Detailed model	Proposed model
Generation system	5min 7sec	5sec
Propulsion system	64min 36sec	2min 20sec
Energy storage system	33min 36sec	32sec
Integrated system	Drive don't	84min 28sec

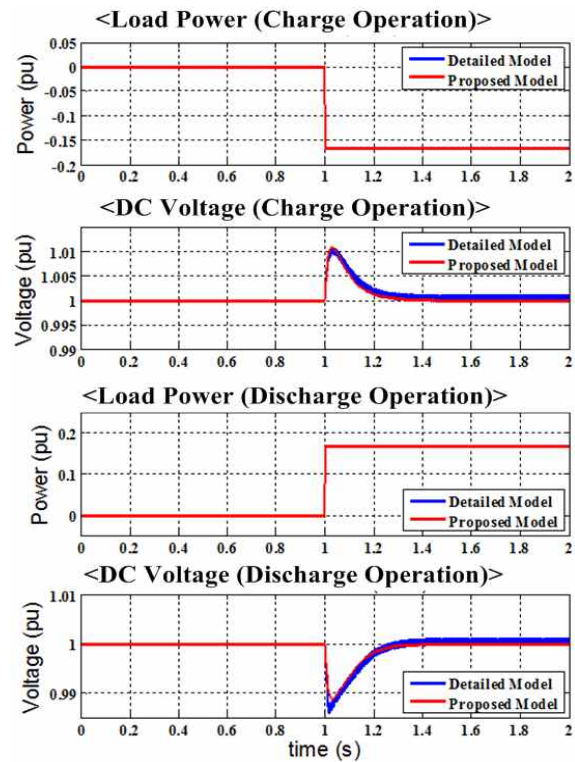


Fig. 10. Simulation result of energy storage system.

### 3. 전기추진선박의 통합전력계통 시뮬레이션

전기추진선박의 통합시뮬레이션 모델을 구동하기 위하여 발전시스템, 추진시스템, 에너지저장시스템의 구성 요소들을 제안한 모델을 적용하여 그림 11과 같이 구성하였다. 구성된 선박모델은 프로펠러의 추력을 통해 속도를 계산하도록 모델링 하였으며, 선박의 속도를 계산하기 위해서는 선박의 운동방정식이 필요하며, 세부 변수들은 실험적 결과를 통해 획득하여야 하나 이러한 데이터들을 직접 확보하기가 불가능하기에 간접적으로 획득하여 시뮬레이션에 적용하였다<sup>[8]</sup>.



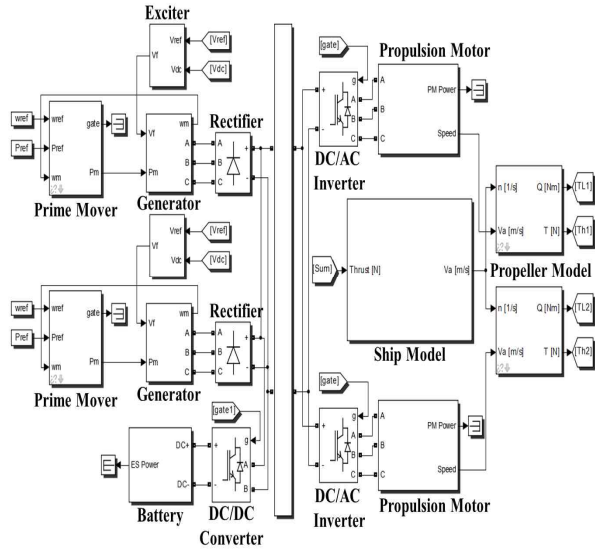


Fig. 11. Integrated power system(IPS) of all-electric-ship.

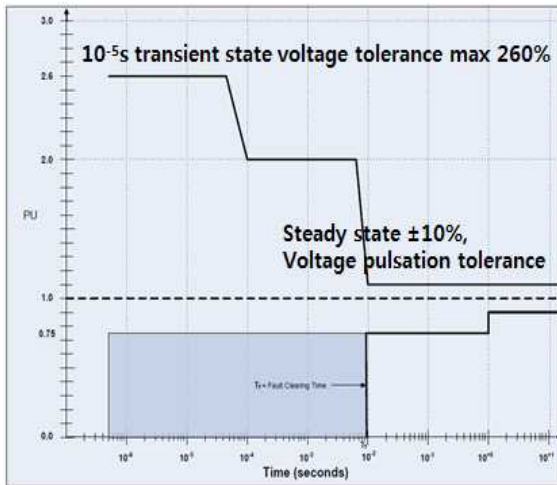


Fig. 12. MVDC Voltage standard of IEEE std 1709-2010.

선박 속도의 가·감속 시나리오를 적용하여 80초간의 시뮬레이션을 구동했으며, 표 II와 같이 기존의 상세모델을 적용하였을 때에 동작이 되질 않았던 통합 시뮬레이션 모델은 제안한 모델을 적용하여 구동이 가능하다. 또한 부하변동에 따라 DC계통 전압이 정격전압의  $\pm 5\%$ 를 초과할 때 에너지시스템의 충·방전 동작을 통해 계통의 안정성을 확보하였다.

그림 12는 IEEE에서 제안하는 선박의 DC 배전시의 과도상태 및 정상상태의 전압 기준을 보여주며, 순간적인 전압의 최대상승은  $10^{-5}$ 초 동안에 260%까지 허용하며, 정상상태에서는  $\pm 10\%$ 의 전압 변동을 허용한다.

그림 13은 선박의 가·감속 운전시나리오에 대한 시뮬레이션 결과이며 에너지 저장장치의 효과를 확인하기 위해 에너지 저장장치를 투입하지 않은 시뮬레이션 결과를 보여준다.

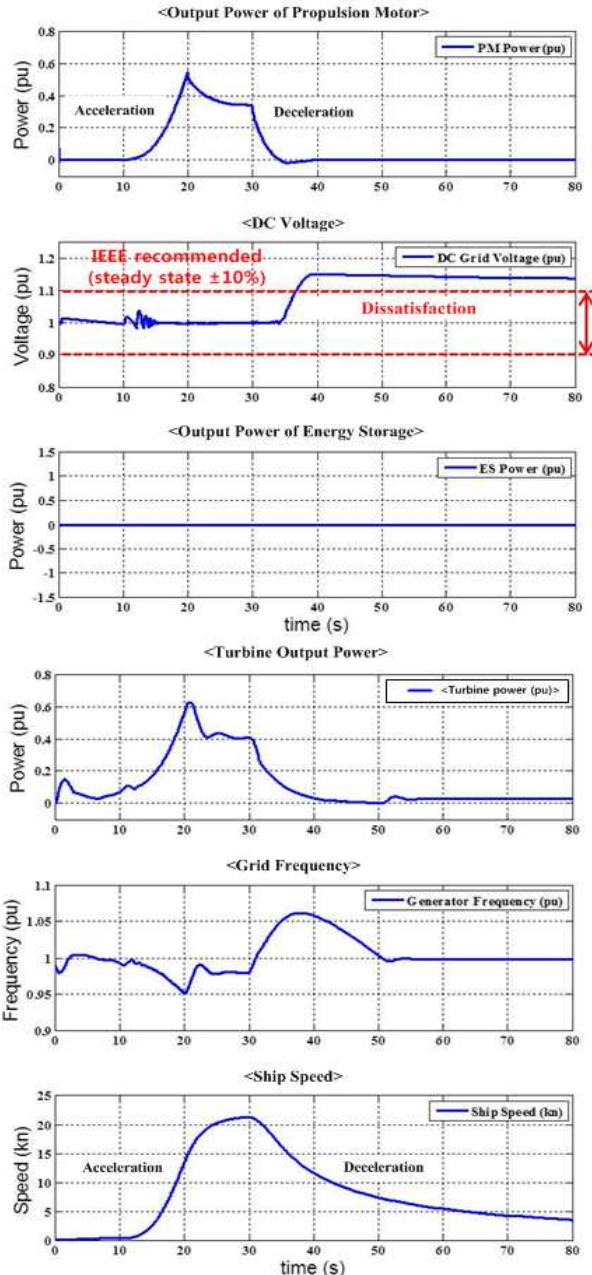


Fig. 13. Integrated power system (IPS) of all-electric-ship without energy storage system.

가속 구간에서 DC계통의 맥동이 존재하나 미비하여 IEEE DC 전압에 대한 기준<sup>[9]</sup>을 만족하나 감속구간에서는 추진전동기의 회생전력이 DC 계통 전압을 충전하여 전압의 기준을 만족하지 못한다. 터빈의 출력과파와 발전기의 주파수, 선박의 속도 또한 추진전동기의 가·감속에 적합한 결과를 보여준다.

그림 14는 그림 13의 결과와 비교하여 에너지 저장장치의 전압 안정도 개선을 확인하기 위한 시뮬레이션의 결과이며, 추진전동기의 속도 감속 시, 에너지 저장장치의 충전동작으로 인해 DC 계통 전압이 IEEE DC 전압의 제한 안으로 제어되고 있음을 보여준다.

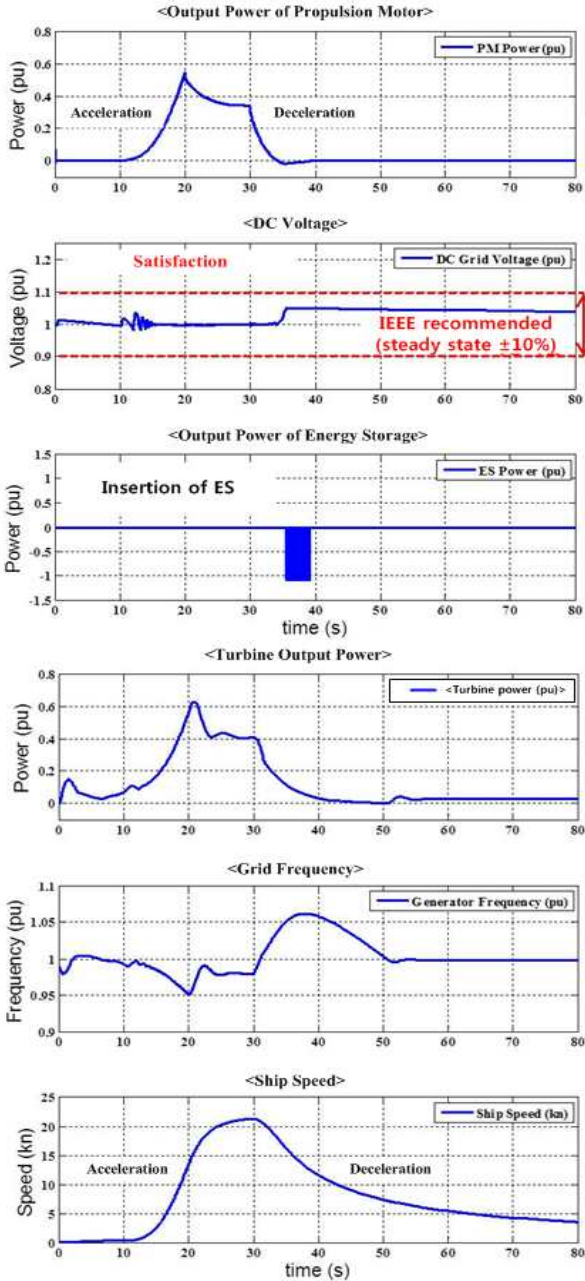


Fig. 14. Integrated power system (IPS) of all-electric-ship with energy storage system.

### 5. 결 론

본 논문에서는 전기추진선박의 통합시뮬레이션 모델을 원활하게 구동할 수 있도록 전기적 시스템 내부 구성요소들의 간략화된 수학적 해석을 통해 모델링 방법을 제시하고 상세모델과 개별적인 동작 비교를 통하여 시뮬레이션 구동시간 및 메모리 사용량, 정확도를 검증하였다. 또한 제안한 방법으로 전기추진선박 통합모델을 구성하여 선박 속도의 가·감속 운전 시나리오를 통해 DC 계통전압의 안정도 향상에 대한 연구를 수행하였다.

이 논문(저서)은 2012년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012H1B8A2026153)

### References

- [1] S. S. Kalsi and O. Nayal, "Ship electrical system simulation," *Electric Ship Technologies Symposium, IEEE Digital Object Identifier*, 10.1109/ESTS, 2005.
- [2] S. G. Lee, S. H. Kim, Y. S. Jeong, and S. Y. Jung, "Power system modeling and analysis of electric ship propulsion system," *Telecommunications Energy Conference, INTELEC*, 2009.
- [3] B. Zahedi and L. E. Norum, "Modeling and simulation of all-electric ships with low-voltage DC hybrid power systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 10, 2013.
- [4] P. C. Krause, "Analysis of electric machinery," *Mcgraw-Hill*, 1986.
- [5] IEEE Std 421.5 IEEE Recommended Practice for Excitation System for Power system Stability Studies, 2006.
- [6] S. K. Sul, "Control of electric machine drive systems," *Wiley*, 2010.
- [7] R. W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, Springer, 2013.
- [8] <http://www.marinecontrol.org/>
- [9] IEEE Std 1709-2010, IEEE Recommended Practice for 1kV to 35kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships, 2010.



#### 구현근(具賢根)

1984년 12월 11일생. 2009년 부산대 전자전기통신 공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 석·박사 통합과정.



#### 곽기곤(郭玓坤)

1987년 4월 23일생. 2012년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2014년 동 대학원 로봇관련협동과정 졸업(석사). 2014년 8월~현재 삼성중공업 연구원.



#### 김장묵(金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2007년 Florida State University 방문교수. 2001년 3월~현재 부산대 전기공학과 교수. LG전자 스마트 제어 센터장.