

# HILS 테스트를 위한 터그보트의 샤프트제너레이터 모델링 및 시뮬레이션

김성동 · 김남호\*

부경대학교

## Modeling and Simulation of a Tugboat's Shaft Generator for HILS Testing

Sung-Dong Kim · Nam-Ho Kim\*

Pukyong National University

E-mail : nhk@pknu.ac.kr

### 요 약

친환경선박법에서 샤프트제너레이터(shaft generator)는 친환경선박 해당 기자재로 정부와 선주의 높은 관심을 보이고 있다. 하지만, 선박에서 신기술을 적용하기 위해서는 높은 신뢰성을 요구하고 있으며, 이를 위한 검증 방법으로 HILS(hardware in loop system)테스트를 사용한다. 이에, 본 논문에서는 샤프트제너레이터를 적용한 터그보트의 HILS 테스트를 위해, 샤프트제너레이터를 모델링하고 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 통해, 시나리오에 따라 샤프트제너레이터의 충전방전이 동작하는 것을 검증하였다.

### ABSTRACT

In the Eco-Friendly Ship Act, the shaft generator is an equipment for eco-friendly ships. However, in order to apply the new technology in ships, high reliability is required, and the HILS (hardware in loop system) test is used as a verification method for this. Therefore, in this paper, a shaft generator is modeled and simulated for HILS test of a tugboat to which a shaft generator is applied. Through simulation, it was verified that the charging/discharging of the shaft generator operates according to the scenario.

### 키워드

Shaft generator, Tugboat, HILS, Modeling, Simulink

### 1. 서 론

환경문제 대응을 위해 정부에서는 2018년 12월 “환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률”(약칭:친환경선박법)을 제정하였다. 이는 환경친화적 선박으로의 전환 등을 지원하고, 환경친화적 선박 구입을 의무화하여 친환경 선박의 개발 및 보급을 촉진하는 법령이다. 이에 샤프트제너레이터(shaft generator)는 친환경선박법에 해당하는 기자재로 그 필요성이 점차 높아지고 있다.

하지만, 선박은 해상환경에서 오랜 시간 동작함

으로 안전 및 신뢰성에 대한 높은 법적규제를 가지고 있으며, 특히 신기술에 대해서 높은 신뢰성을 요구한다. 이에 노르웨이 선급에서는 신뢰성 검증을 위한 방법으로 HILS(hardware in loop system)테스트를 제시하였다. HILS 테스트는 개발된 신규시스템을 선박에 설치하기 전에 해당 선박의 시스템들을 물리모델로 구현하여, 가상으로 신규시스템의 동작을 검증하는 시스템이다.

이에 본 논문에서는 HILS 테스트를 위한 샤프트제너레이터를 모델링하고, 각 동작모드에 따른 시뮬레이션을 수행하였다.

\* corresponding author

## II. 샤프트제너레이터의 모델링

샤프트제너레이터는 발전기와 모터의 기능을 갖는 회전기기를 선박의 샤프트에 설치하여, 낮은 부하에서는 샤프트제너레이터를 통해 발전을 하고, 높은 부하가 필요할 때에는 샤프트제너레이터가 모터로 동작하여 메인엔진 추진력을 지원한다.

샤프트제너레이터 모델링을 위해서는 대상 선박에 적합한 기본설계가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 표 1의 사양을 갖는 터그보트를 기준으로 샤프트제너레이터를 모델링하였다[1].

표 1. 터그보트 사양

구분		사양
LOA(length overall)		37m
Tonnage		256tons
Speed		15kn
Bollard pull	Ahead	55t
	Astern	52t
Main engine		1,500kW×2
Shaft generator		230kW×2 (440V, 60Hz)
Main generator		500kW×2 440V, 60Hz (440V, 60Hz)

터그보트의 주요사양으로는 Main engine을 1,500kW급으로 선정하였고, Main generator는 500kW급 2기, Shaft generator는 230kW급 2기로 선정하였다.

또한, 터그보트의 구성은 그림 1과 같이 구성하였다.

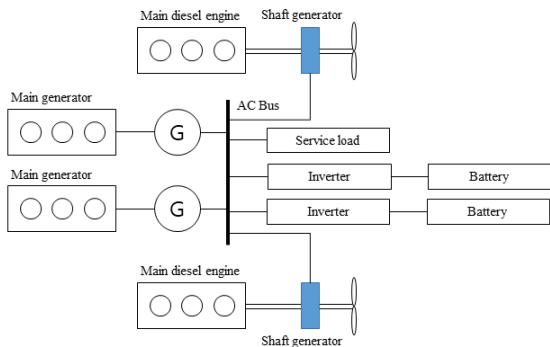


그림 1. 터그보트의 구성도

터그보트는 쌍축선으로 두 개의 Main engine, 두 개의 Main generator, 두 개의 Shaft generator로 구

성하였으며, 낮은 부하에서는 Shaft generator를 통해 추진을 하고, 높은 부하에서는 Shaft generator가 메인엔진의 추진력을 지원하도록 구성하였다.

샤프트제너레이터의 모델링을 위해서는 터그보트의 운전모드가 정의되어야 한다. 터그보트의 운전모드는 “접안”, “이동”, “작업” 세 가지 모드로 나눌 수 있으며, “접안”모드는 선박이 접안하고 있을 때에 육상전원을 이용하여 선박의 배터리를 충전하거나 선내의 전력을 이용하는 모드이다. “이동”모드는 저속, 고속이동에 따라 샤프트제너레이터를 모터로 사용하거나, 모터와 엔진을 함께 동작하는 모드이다. 마지막 “작업”모드는 선박을 예인하는 모드로, 세 가지 모드 중에서 가장 많은 부하를 필요하는 조건이다. 본 논문에서는 각 운전모드에 따라 Simulink의 MATLAB Function을 이용하여 제어조건을 정의하였다. 운전모드에 따른 세부 제어동작은 표 2와 같다.

표 2. 운전모드에 따른 세부 제어동작

운전모드	제어동작	조건
접안	- 샤프트제너레이터 : OFF - 메인디젤엔진 : OFF - 메인발전기 : OFF	-
이동	저속	부하 : 20%이하 속도 : 2,000rpm
	고속	부하 : 20%초과 속도 : 2,400rpm
작업	- 메인디젤엔진 : ON - 메인발전기 : ON	부하 : 80%이상 속도 : 2,000rpm

운전모드의 이동 시에 저속은 부하값 20% 이하, 속도 2,000rpm을 기준으로 하였고, 고속은 부하값 20% 초과, 속도 2,400rpm으로 정의하였다. 작업모드는 선박의 부하가 80% 이상, 속도는 2,000rpm으로 사용되는 것으로 정의하였다. Simulink의 MATLAB Function에서 입력값은 선박의 부하값으로 정의하였고, 출력 값은 Main engine의 기준토크, 기준 rpm, Shaft generator의 기준 토크, 기준 rpm으로 정의하였다.

샤프트제너레이터 모델은 그림 2와 같이 디젤엔진거버너와 여자기, 동기발전기, 저항부하, 인버터

를 포함하는 모터로 구성하였다.

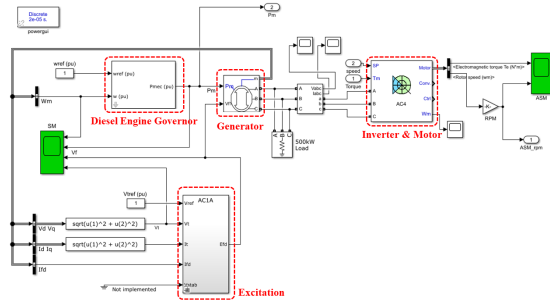


그림 2. 샤프트제너레이터 모델

전력계통 해석 시에 디젤엔진거버너는 시간지연을 갖는 역할로 구성하였다. 여기서는 IEEE 421 표준에서 제시하는 모델을 적용하였으며, 발전기에 출력되는 전압과 전류의 값을 이용하여 계자전압이 공급되도록 모델링하였다[2-4]. 발전기는 500kW 3상 440V 60Hz를 갖는 동기형 발전기를 적용하였고, 샤프트제너레이터는 230kW급 비동기 전동기와 다이오드 정류기와 IGBT 인버터로 구성하였다.

메인엔진 모델은 그림 3과 같이 MATLAB에서 제공하는 ‘Engine Timing Model with Closed Loop Control’ 모델을 사용하였다.

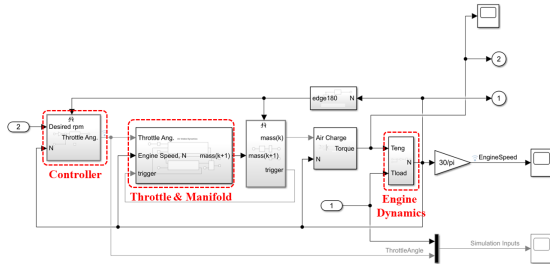


그림 3. 메인엔진 모델

메인엔진 모델은 속도를 제어하기 위한 제어기, 엔진의 구동을 위한 스로틀과 매니폴드로 구성하였다. 제어기는 속도제어를 위해 PI제어기를 사용하였다. 식 (1)은 스로틀각도를 제어하는 수식이다.

$$\theta = K_p(N_{set} - N) + K_i \int (N_{set} - N)dt \quad (1)$$

여기서  $N_{set}$ 은 속도의 셋팅값을 나타내고,  $N$ 은 현재속도,  $K_p$ 는 비례항의 이득,  $K_i$ 는 적분항의 이득이다.

운전모드에 따른 동작검증을 위해 그림 4와 같이 모델을 구성하였다.

부하의 입력값에 따라, 메인엔진과 샤프트제너레이터의 토크와 속도를 제어할 수 있도록 제어조건을 만들었고, 각 제어조건에 따라 메인엔진과 샤프트

트제너레이터가 동작하도록 구성하였다.

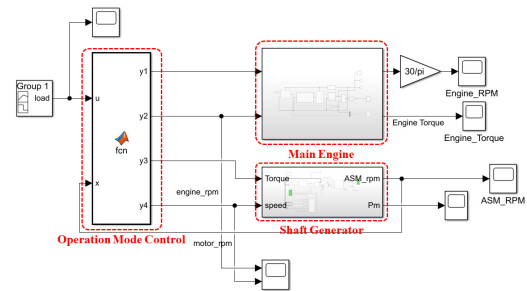


그림 4. 통합 검증모델

메인엔진의 속도는 샤프트제너레이터가 먼저 회전하고 있기 때문에 샤프트제너레이터의 회전을 추정하도록 구성하였다.

### III. 시뮬레이션 결과

부하의 입력은 운전모드에 따른 결과를 확인하기 위해 그림 5와 같이 구성하였다.

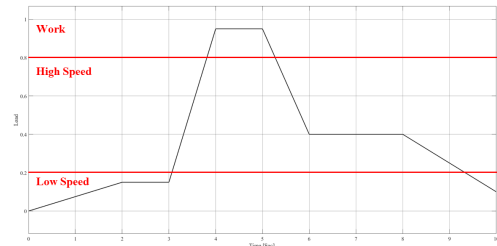


그림 5. 부하 입력

저속구간은 0~3.06초, 9.33~10초 사이, 고속 구간은 3.06~3.82초, 5.27~9.33초 사이, 작업모드는 3.82~5.27초 사이로 구성하였다. 부하입력에 따른 운항모드 제어기의 속도 출력은 그림 6과 같다.

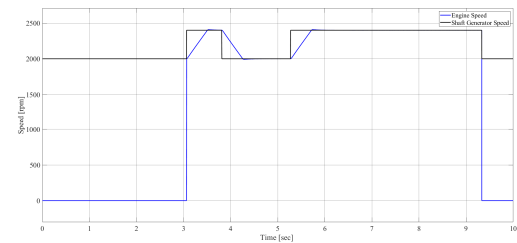
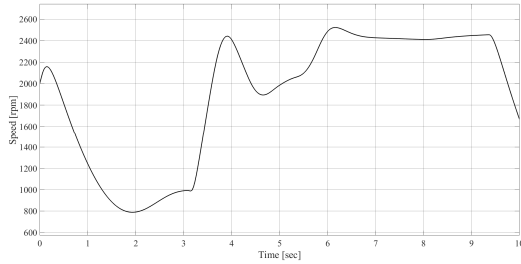


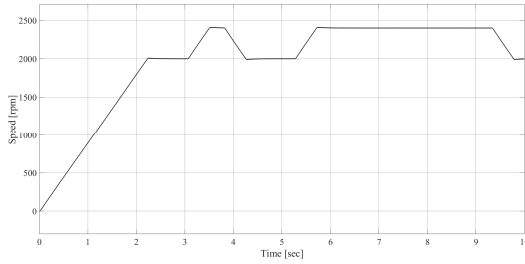
그림 6. 운항모드 제어기의 속도 출력

저속구간에서 메인엔진은 정지하고 있고, 고속구간에서는 2,400rpm의 속도로 동작하다 작업모드에서는 다시 2,000rpm의 속도로 변경되었다.

운항모드에 따른 메인엔진의 속도와 샤프트제너레이터의 속도는 그림 7과 같다.



(a) 메인엔진의 속도



(b) 샤프트제너레이터의 속도

그림 7. 메인엔진과 샤프트제너레이터의 속도

메인엔진과 샤프트제너레이터 두 시스템 모두 운항모드에 따라 속도가 제어되는 것을 확인 할 수 있었으며, 샤프트제너레이터는 고속구간에서 2,400rpm으로 동작하고 저속구간 및 작업모드에서는 2,000rpm을 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

샤프트제너레이터의 입력단 전압값은 그림 8과 같다.

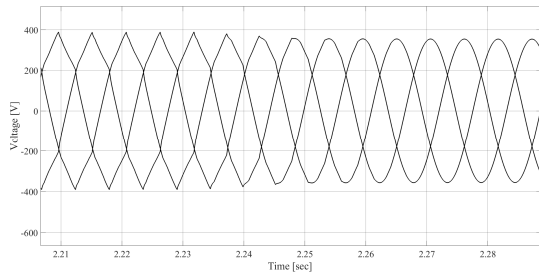


그림 8. 샤프트제너레이터 입력단 전압

440V 계통 시스템이지만, 부하 측 모델에 의해 전압다운이 일부 발생되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 HILS 테스트를 위한 샤프트제너레이터를 모델링하였다. HILS 테스트는 개발된 제어기가 정상적인 동작을 하는지 검증하기 위해 대형 기계 및 전기시스템 등을 물리모델로 구현하고, 제어기의 기능테스트를 수행하는 시험이다. 본 논

문에서는 각 운전모드에 따른 제어를 Simulink의 MATLAB Function으로 구현하고, 샤프트제너레이터 모델과 디젤엔진 모델의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 저속, 고속, 작업모드에 따라 안정적인 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있었다. 하지만, 메인엔진의 물리적 초기값에 의해 운전조건에 상관없이 2,000rpm으로 되어있어 메인엔진 모델에 대한 추가수정이 추가연구과정으로 진행되어야 한다. 또한, 추가연구과정으로 HILS 테스트 구성을 위한 해양환경 모델링이 진행되어야 한다.

#### References

- [1] S. Koichi, M. Syunichi and K. Masanori, "Development of the Hybrid Tugboat System," *IHI Engineering Review*, Vol. 48, No. 1, pp. 23-28, 2015.
- [2] Y. C. Lee, J. S. Kim and B. G. Jung, "A Study on Improvement of the Control Performance of the Automatic Voltage Regulator of a Brushless Synchronous Generator," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 38, No. 7, pp. 909-915, Sep. 2014.
- [3] Aya M. Elsherbiny, Adel S. Nada, Mohammed Kamal, "Smooth Transition from Grid to Standalone Solar Diesel Mode Hybrid Generation System with a Battery," *International Journal of Power Electronics and Drive System*, Vol. 10, No. 4, pp. 2065-2075, Dec. 2019.
- [4] W. J. Lee, H. J. Lee, and H. C. Chag, "Modeling and Experiment of 50kW Diesel Generator in Grid-connected Mode," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 10, pp. 1347-1353, Oct. 2014.