

SIL 기반 액화천연가스운반선 전력관리시스템의 모델링 및 시뮬레이션

이광국*

Software-In-the-Loop based Power Management System Modeling & Simulation for a Liquefied Natural Gas Carrier

Kwangkook Lee*

Department of Naval Architecture & Ocean System Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea

요 약

액화천연가스운반선(LNGC) 건조 시 증가하는 리스크로 인해 시스템 통합 및 안전 운용에 다양한 시나리오의 사전 시뮬레이션이 필요하다. 특히, LNGC에서 전력관리시스템은 중요한 장비이고, 전력 제어 시스템과의 오류없는 통합이 이루어져야 기대하는 성능 및 안전성이 보장된다. 본 논문에서는 LNGC에서 발생하는 오류를 개선하기 위해 Software-In-the-Loop(SIL) 기반의 PMS 테스트용 전력 발생원과 소모원에 대한 시뮬레이션 모델을 구현하였다. PMS 제어 및 검증에 위해 MATLAB/Simulink를 활용하여 수치적 물리 시뮬레이션 모델링을 수행하였고, 시뮬레이션 모델을 검증하기 위하여 시운전 시나리오를 대상으로 부하 분배 테스트를 하였다. PMS SIL 시뮬레이션은 고부가가치 선박 및 해양플랜트의 시운전, 설치, 유지보수 시장 진출에 크게 기여할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

With the increasing risk in building liquefied natural gas carriers (LNGC), pre-simulation of various scenarios is required for system integration and safe operation. In particular, the power management system (PMS) is an important part of the LNGC; it works in tight integration with the power control systems to achieve the desired performance and safety. To verify and improve unpredicted errors, we implemented a simulation model of power generation and consumption for testing PMS based on software-in-the-loop (SIL) method. To control and verify the PMS, numeric and physical simulation modeling was undertaken utilizing MATLAB/Simulink. In addition, the simulation model was verified with a load sharing test scenario for a sea trial. This simulation allows shipbuilders to participate in new value-added markets such as commissioning, installation, operation, and maintenance.

키워드 : 모델링 및 시뮬레이션, 액화천연가스운반선, 전력관리시스템, 소프트웨어 인 루프 시뮬레이션

Key word : M&S(Modeling & Simulation), LNGC(Liquefied Natural Gas Carrier), PMS(Power Management System), SILS(Software-In-the-Loop Simulation)

Received 11 May 2017, Revised 15 May 2017, Accepted 17 May 2017

* Corresponding Author Kwangkook Lee(E-mail:kklee@kyungnam.ac.kr, Tel:+82-55-249-2583)

Department of Naval Architecture & Ocean System Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.6.1218>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

액화천연가스운반선(Liquefied Natural Gas Carrier, LNGC), 셔틀탱커(shuttle tanker), 드릴십(drillship)과 같이 고부가가치 선박일수록 자동화에 대한 선주의 요구가 다양하게 변화하고, 해양플랜트 공사에 적용되는 통합시스템의 복잡도가 증가할수록 소프트웨어의 오류 발생 빈도는 증가한다. 향후 선박 및 해양플랜트 통합 시스템 소프트웨어의 복잡도는 계속 증가할 것으로 예상되며, 이를 해상 시운전으로 대체하는 것은 한계가 있으므로 통합시스템의 고장 및 오작동을 테스트하기 위한 검증체계가 필요하다[1].

International Marine Contractors Association(IMCA)에서 발간한 “DP station keeping incidents” 보고서(2012)에 따르면[2] 2010년 41척 중 DP(dynamic positioning) 관련 사고가 56회로 집계되었고, 그림 1과 같이 사고의 주요 요인이 전기적 오류 21%, 컴퓨터 오류 11%, 전력문제 9%로 나타났다. 이로 인한 선박 및 해양플랜트에서 복잡한 제어 시스템의 안전 및 신뢰성이 주요 이슈이다.

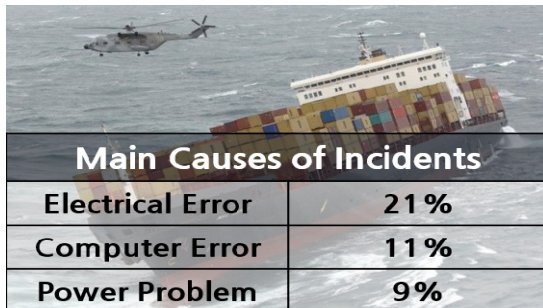


Fig. 1 Needs of Shipbuilding HILS [4]

통합시스템의 오류 검증을 위해 ABS(American Bureau of Shipping), DNV-GL(Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd) 등의 외국선급에서는 선박 또는 해양프로젝트에 적용되는 소프트웨어 기반 시스템 개발 및 각 시스템 통합 과정에 있어 검증 프로세스와 가이드라인을 제공한다. 특히 ABS-ISQM (Integrated Software Quality Management), DNV-GL ISDS (Integrated Software Dependent System) Notation [3,4]에 따르면 소프트웨어 개발 시 요구사항 분석, 기능분

석, 기술설명, 안전요소 분석 결과를 공유함으로써 소프트웨어 검증 및 확인 (Verification & Validation, V&V) 절차를 강화한다.

고부가가치선 및 해양플랜트의 통합시스템 신뢰성 향상을 위해 소프트웨어 및 하드웨어 테스트 검증 수단인 SILS(Software In-the-Loop Simulation) 및 HILS (Hardware In-the-Loop Simulation)의 요구사항은 지속적으로 늘어나지만, 제3자 검증 기업으로 노르웨이의 Marine Cybernetics가 독점적으로 조선해양 분야의 HIL 시뮬레이션을 수행하고 있고, 현재 국내의 경우 HILS의 상용화 실적을 가진 기업이 없다. 몇몇 기업은 정부의 지원으로 DP(dynamic positioning) HIL 사업을 수행한 바 있고, 조선 3사(현대중공업, 삼성중공업, 대우조선해양)에서는 HILS 기술 개발시스템 개발에 집중하고 있다[1].

국내 조선 3사 연구사례로서 동적위치유지시스템 대상으로 한 HIL 테스트 패키지 개발 및 국제 선급인증에 관한 연구사례가 대표적[5]이나 선박의 각 부하로 전력을 배분 및 관리하고 감시하는 기능을 갖는 Power Management System(PMS) 관련 연구는 부족한 편이다. LNGC에서 전력관리시스템은 중요한 장비이고, 전력 제어 시스템과의 오류 없는 통합이 이루어져야 기대하는 성능 및 안전성이 보장된다[6].

PMS 관련 연구로 LNGC용 전력관리시스템 시뮬레이터 모델링의 국산화 연구 일환으로 진행된 사례가 있다[7]. PMS 주요 부품들인 동기발전기, 디젤 엔진 시스템, 변압기, 차단기, 3상 부하들의 개별 모델링을 수행하였고, 특성해석 시퀀스에 따라 시뮬레이션 및 특성해석 결과의 비교 검토를 통해 모델링의 신뢰성을 검증하였다. 하지만 발전기 중심의 모델링이 수행하였고, 전력 부하 측면에서는 다루지 못 하였다. 또한 Duel Fuel Generator를 모델링하고 전력 시뮬레이션 결과와 출력값을 비교한 연구[8]의 의미가 크지만 전력 부하를 다루지 않아 한계가 있다. PMS 외에도 유정 주위의 흐름 안정성 기반 해저 모니터링 시스템과 검증용 HILS를 구현한 연구처럼 심해에 대한 연구[9] 또한 HILS의 중요성을 반증한다.

본 논문에서는 최근 발주가 늘어나고 있는 LNG 선박의 통합 자동화 시스템의 일부로서 전력계통을 원격에서 제어 감시하는 기능 갖는 PMS를 시뮬레이션 대상으로 한다. PMS의 주요 기능 테스트를 비롯한 전력계

통의 시스템 시퀀스 동작 확인, 파라미터 설정, 알람 표시, 시스템 오류 등의 문제 요소들을 찾아내기 위해 PMS-SIL 시뮬레이션 모델링을 수행하였다. 더불어 PMS-SIL 시뮬레이션 모델링 시 발전기뿐만 아니라 전력 사용량이 많은 heavy consumer의 모델링 및 시뮬레이션을 구현하였다. 또한 LNGC PMS 시뮬레이션 모델을 검증하기 위해 시운전 시나리오에 맞춰 테스트하고 신뢰성을 검증하였다.

II. PMS-SIL 모델링 및 시뮬레이션

2.1. PMS 물리 모델링을 위한 사양정의

Table. 1 Specification of generators and heavy consumers

Equipment	Power (kW)	Voltage (V)	Frequency (Hz)
Diesel Generator	3,450	6,600	60
Turbine Generator	3,450	6,600	60
Bow Thruster	1,800	6,600	60
HD Compressor	1,000	6,600	60
Cargo Pump	530	6,600	60
Ballast Pump	330	6,600	60
Lumped Load	1,000	440	60

LNG 선박에 설치된 PMS는 발전기에서 공급된 전력을 선박의 각 부하로 전력을 배분 및 관리하고 감시하는 시스템으로 선박용 전력 시스템을 제어하고 관리하는데 필수적이다. LNG 선박에서의 전력 주요 장비는 전력공급원과 전력 소모원으로 나누어 전력 공급원은 터빈 발전기 2기, 디젤 발전기 1기로 구성하였고, 전력 소모원은 6,600V 고압부와 440V 저압부로 나누어 구현하였다. 6,600V 고압부 모델링은 선추진기 1기, 압축기 2기, 화물창 펌프 8기, 평형수 펌프 3기로 구성하였고, 440V 저압부는 일반부하 4기로 구성하였다. 해당 기기들의 상세사양은 표 1과 같이 명기하였고, 디젤 및 터빈 발전기의 경우 최대 출력, 전압, 주파수 각각 3.45MW, 6,600V, 60Hz를 기본으로 사양을 정의하였다. 아울러 그림 2와 같이 PMS 모델링 사양에 맞게 MATLAB/Simulink를 활용하여 시뮬레이션 모델링을 구현하였다.

2.2. PMS 전력 생성원의 물리 모델링

선박용 발전기의 모델링은 실제 발전기와 동일한 물리 모델을 기반으로 발전기 출력을 도출한다. 그림 3과 같이 디젤 및 터빈 발전기에서 발전기 정격속도와 발전기 속도를 입력받아 P_m (기계동력)을, 필드 전압 계산기

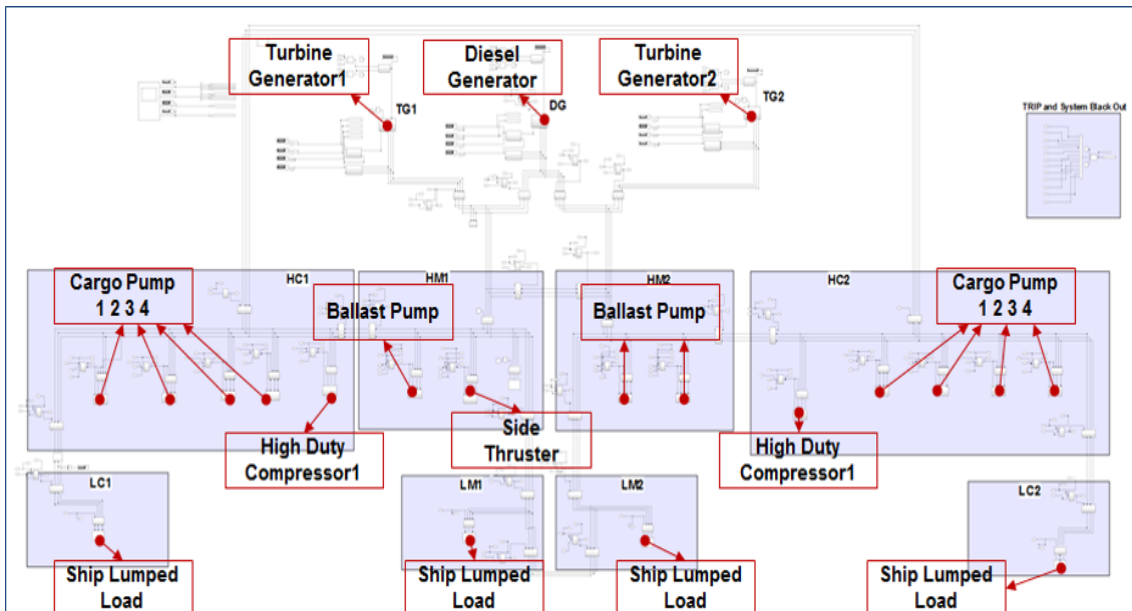


Fig. 2 LNGC PMS-SIL Simulation model

에서 발전기 정격속도와 발전기 속도를 입력받아 V_{α} (필드전압)을 출력하여 Synchronous Machine(동기기)를 통해 3상 전압을 출력한다.

3상 전압은 3상 전류 차단기를 거쳐 선박에 사용되는 화물창 펌프, 선수 추진기와 같은 부하에 인가된다. 선박용 발전기를 구성하고 있는 조속기, 디젤 및 터빈 발전기, 필드 전압 계산기, 동기기는 그림 3와 같이 Matlab/Simulink 기반의 시뮬레이션 모델로 구성된다.

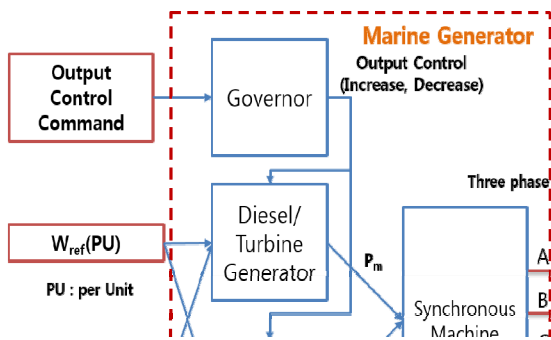


Fig. 3 Modeling logic of diesel generator & turbine generator

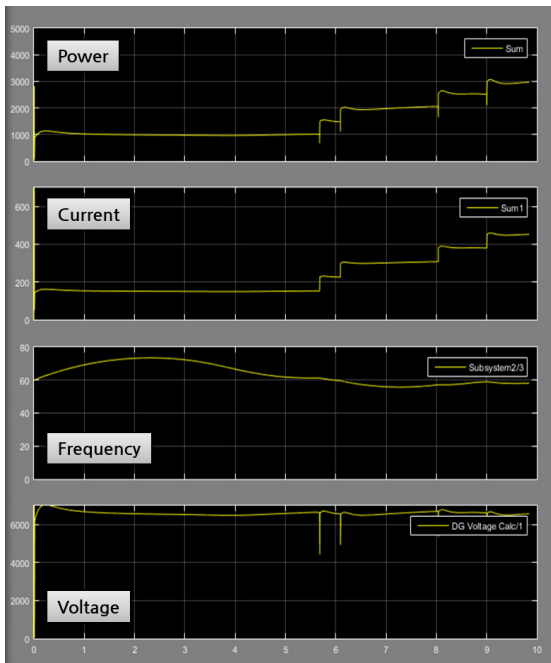


Fig. 4 Turbine generator simulation verification

설계된 모델은 엔진 조속기가 시스템에 포함된 모델로 입력 참조값에 따라 적용된 수식에 의해 출력이 조절된다. 또한 디젤 엔진, 조속기, 여기시스템, 동기기 모델 라이브러리를 이용하여 시뮬레이션에 검증에 필요한 발전기 출력 데이터를 도출하고, 동기기 모델의 출력부에 전력 부하를 인가하여 발전기 출력 특성 파악 및 정상 출력 검증을 수행한다.

그림 4의 출력 그래프는 설계된 터빈 발전기의 출력을 나타낸 것으로 위에서부터 전력, 전류, 주파수, 전압을 나타낸다. 초기 로드 1MW가 인가되어 발전기 운전 시작 후 빠르게 안정화되고 있으며, 이후 0.5MW씩 인가되는 로드에서도 5sec 이내에 안정화되어 동작한다. 터빈 발전기의 경우 동작 특성상 안정화에 시간이 다소 소요되는 것을 확인하였다.

2.3. PMS 전력 소모원의 물리 모델링

대표적 전력 소모원인 선수추진기는 선박의 정지 시 또는 미속 항해 시에 있어서의 선박 조정성능을 향상시키기 위한 장치로 선박이 정지하고 있을 때라도 선수 또는 선미의 운동을 제어하는 것이 가능하기 때문에 예인설비가 없는 항구나 협수로의 항행 시에도 용이하고 PMS 관점에서는 전력 소모량이 많은 부하 중의 하나이다.

선수추진기 시뮬레이션 모델은 그림 5와 같이 선박에 실제 사용되는 장비를 물리 모델로 구현하여 3상 전력을 입력값으로 받아 3상 차단기를 거쳐 농형 유도전동기 기반의 전동기로 전달된다. 여기에 기계적 토크를 받는 입력값은 선수추진기가 가지고 있는 프로펠러의 블레이드 각도가 변함에 따라 기계적 출력 값이 변화한다.

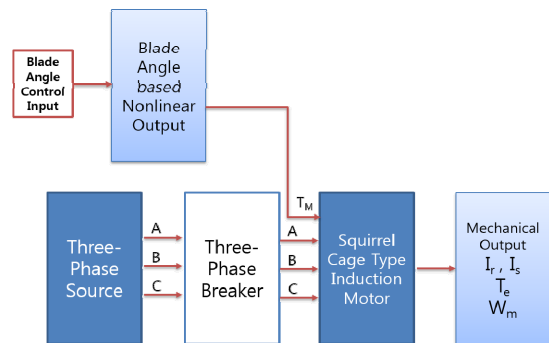


Fig. 5 Modeling logic of heavy consumers

블레이드 각도에 따른 지령값을 선수추진기의 기계적 토크로 입력받아 선수추진기의 기계적 출력(T_m)이 변화하고, 블레이드 각도에 따른 선수추진기의 최종출력은 고정자의 전류(I_s), 회전자의 전류(I_r), 전기적 토크(T_e), 그리고 각속도(ω_m)로 나타낸다.

선수추진기에 쓰이는 농형유도전동기의 제어 및 해석의 용이성을 위해 abc 좌표계의 3상 변수를 좌표축이 회전하지 않고 정지된 좌표계인 정지 좌표계 dq축으로 변환한다. 정지 좌표계 dq축 전압을 동기 좌표계 dq축 전압으로 변환하게 되면 좌표축이 회전자계에 동기하여 회전하게 된다. 그 결과 변수들이 직류성분으로 나타나게 되어 시변계수가 제거된다. 정지 좌표계로 좌표 변환 후 다시 동기 좌표계로 변환하여 나타낸 동기 좌표계 dq축상 고정자 전압 방정식은 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^e &= R_s i_{ds}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e - \omega \lambda_{qs}^e \\ V_{qs}^e &= R_s i_{qs}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e - \omega \lambda_{ds}^e \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, i_{ds}^e 는 고정자의 d축 전류, i_{qs}^e 는 고정자의 q축 전류, λ_{ds}^e 는 고정자의 d축 쇄교자속, λ_{qs}^e 는 고정자의 q축 쇄교자속, ω 는 각속도를 각각 나타낸다.

또한, 고정자 쇄교자속 λ_{ds}^e 는 고정자 리액턴스 L_s 와 상호 리액턴스 L_m 에 의해 발생됨으로, 이를 다시 나타내면 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^e &= L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \\ \lambda_{qs}^e &= L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, i_{dr}^e 는 회전자의 d축 전류, i_{qr}^e 는 회전자의 q축 전류를 나타낸다.

식 (2)를 정지 좌표계로 좌표변환 후 다시 동기 좌표계로 변환하여 나타낸 동기 좌표계 dq축상 회전자 전압 방정식은 (3)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{dr}^e &= 0 = R_r i_{dr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^e - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}^e \\ V_{qr}^e &= 0 = R_r i_{qr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^e - (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}^e \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, R_r 은 회전자 권선저항, ω_r 은 회전자 각속도를 나타낸다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P}{2} \frac{3}{2} L_m (i_{qs}^e i_{dr}^e - i_{ds}^e i_{qr}^e) \\ &= \frac{P}{2} \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}^e i_{qs}^e - \lambda_{qr}^e i_{ds}^e) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, P 는 전동기의 극수를 나타낸다. 좌표변환을 통하여 동기 좌표계 dq축 변수로 표현한 결과는 (4)와 같다.

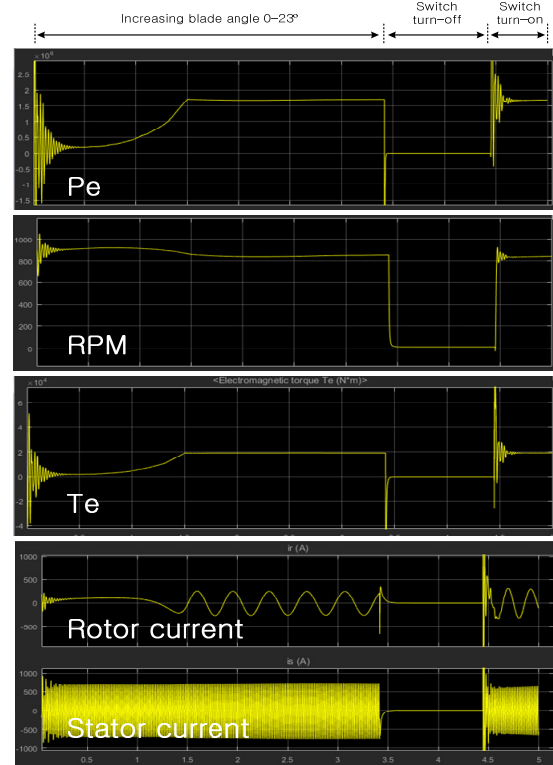


Fig. 6 Simulation results of side thruster

그림 6은 선수추진기의 출력전력, 모터토크, RPM, 회전자 및 고정자 전류의 파형을 나타낸다. 블레이드 각도를 0°에서 23°까지 증가하면 토크지령이 지속적으로 증가하며 23°에서 최대 토크를 가진다. 일정시간이 지난 후 전동기 동작 스위치를 열게 되면, 제동시스템이 동작함으로써 전동기에 입력되는 전압 및 전류가 차단되어 속도가 0이 된다. 또한 다시 스위치를 닫게 되면, 정상적으로 전동기가 동작함을 알 수 있다. 그 결과, 선수추진기의 최대 모터출력전력은 1.8MW인 것을 확인할 수 있다.

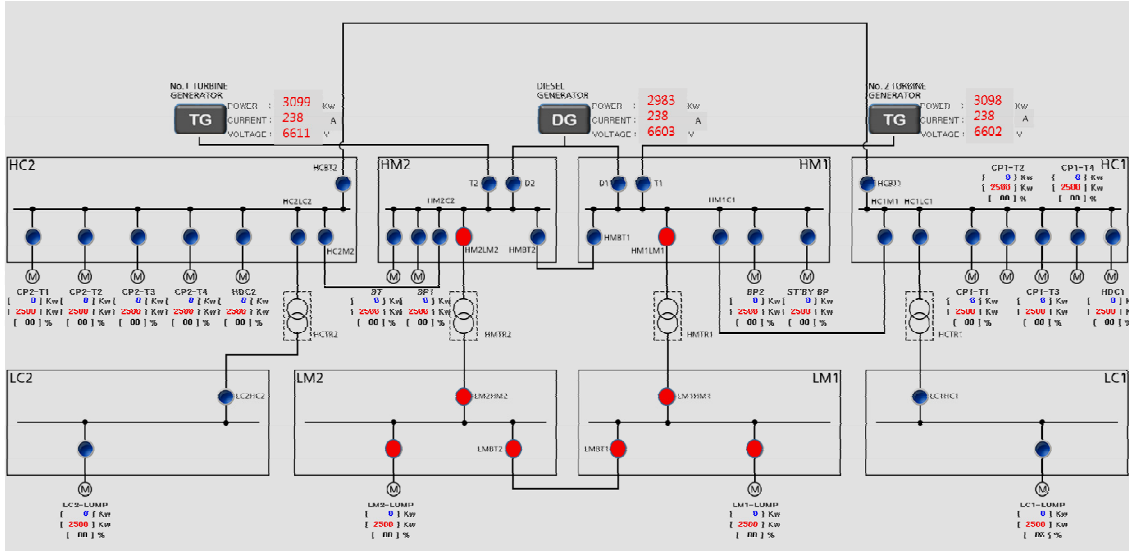


Fig. 7 Graphical user interface for PMS-SIL simulator

2.4. PMS-SIL 시뮬레이션 결과 및 고찰

PMS-SIL 시뮬레이션 모델을 통합 후 제어 시퀀스를 쉽게 확인하기 위하여 C#을 활용하여 그림 7과 같이 LNGC PMS 계통도를 구현하였다. 디젤발전기, 터빈발전기를 비롯한 6,600V의 고전압 부하단과 440V의 저전압 부하단의 전력정보를 확인하고, 차단기를 통해 제어 가능하다.

구현한 시뮬레이션 모델을 검증하기 위하여 터빈 발전기와 디젤 발전기 간의 부하 분할 기능을 테스트하였다. 특히, 디젤 발전기를 자동모드로 두고 임의의 부하를 초과하였을 때 디젤 발전기가 구동하여 부하 분할을 하는지에 대해 확인하였다. PMS 시운전 시나리오 중 두 시나리오는 추출하여 테스트 시나리오를 계획하였고, 9,000kW를 지령값으로 균등부하분배(symmetrical load sharing) 및 비균등부하분배(asymmetrical load sharing) 모드를 각각 수행하였다. 이에 대한 결과로 표 2와 같이 발전기가 병렬 구동될 때 부하 분배되는 상태가 3% 불감대(dead band) 내에 들어와 설계 범위 내 테스트를 만족함을 알 수 있었다.

Table. 2 Load sharing test results

Item	Conditions	Results
Symmetric load sharing	- Power Consumer: 9,000kW - TG1: 3,000kW - TG2: 3,000kW - DG: 3,000kW - Dead band: ±3% of rated power	- Power Consumer: 9070kW - TG1: 3010kW - TG2: 3010kW - DG: 3050kW - Satisfied
Asymmetric load sharing	- Power Consumer: 9,000kW - TG1: 2,700kW(90%) - TG2: 3,000kW - DG: 3,300kW - Dead band: ±3% of rated power	- Power Consumer: 9040kW - TG1: 2,770kW - TG2: 2,990kW - DG: 3,280kW - Satisfied

III. 결론

본 논문에서는 선박 및 해양플랜트의 PMS를 검증하기 위해 널리 사용되는 SIL 시뮬레이션을 구현하고자 하였다. 기존 발전기 위주의 연구와 달리 LNGC PMS-SIL 테스트하기 위해 전력 발생원과 소모원에 대한 시뮬레이션 모델을 함께 구현하였다. PMS 제어 및 검증을 위해 수치적 물리 모델링 및 시뮬레이션을 MATLAB/Simulink를 활용하여 수행하였고, 시뮬레이션 모델을

검증하기 위하여 시운전 시나리오를 대상으로 부하 분배 테스트를 수행하였다. 테스트 결과, 3%의 불감대 영역내에 만족함을 도출하였다.

향후 PMS-SIL 시뮬레이터의 검증을 위한 하드웨어 환경을 구축하여 PMS-HIL 테스트를 수행할 수 있는 실시간 시뮬레이션을 구현할 계획이다. 아울러 PMS-HIL 시뮬레이션은 고부가가치 선박 및 해양플랜트의 시운전, 설치, 유지보수 시장 진출에 크게 기여할 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was financially supported by Kyungnam University Foundation Grant, 2013.

REFERENCES

[1] K. K. Lee, J. S. Park, S. H. Kim, "Hardware-In-the-Loop Simulation Technology for Productivity and Quality Improvement of Offshore Plant," *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 52, no. 4, pp.1-6, 2016.

[2] International Marine Contractors Association. DP station keeping incidents. *International Marine Contractors Association*, 2012. [Internet] Available: <https://www.imca-int.com/news/2012/11/30/imca-publishes-dp-station-keeping-incidents/>.

[3] Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd(DNV GL). Offshore standard DNV-OS-D203: Integrated software dependent systems (ISDS). *Det Norske Veritas AS*, 2012. [Internet]. Available: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/codes/docs/2012-12/Os-D203.pdf>.

[4] American Bureau of Shipping(ABS). Guide for Integrated Software Quality Management(ISQM). *American Bureau of Shipping*, 2014. [Internet] Available: https://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/185_ISQM/Guide.

[5] S. G. Cheon, J. W. Kim, S. K. Lee, S. T. Lee, "Development of Hardware In the Loop Simulation Package for DPS and Acquisition of Certification by Class Society," *Proceedings of the Annual Autumn Conference*, pp.450-453, 2016.

[6] A. Parizad, "Dynamic stability Analysis for Damavand power plant considering PMS functions by DIGSILET software," in *Proceedings of the 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Wroclaw, Poland, pp.1-11, 2013.

[7] T. O. Kim, G. H. Kang, "HILS based PMS Testing of 30MW LNGC Electric Propulsion System," in *Proceedings of the Conference on the Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)*, Yongpyong, Korea, pp. 1710-1711, 2014.

[8] J. T. Hwang, S. Y. Hong, H. W. Kwon, K. K. Lee, J. H. Song, "Dual Fuel Generator Modeling and Simulation for Development of PMS HILS," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 613-619, 2017.

[9] K. I Park, H. M. Chae, J. H. Jang, Y. W. Jang, E. G. Kim, "Flow assurance based subsea monitoring system and HILS for verification," *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 4, pp.12-16, 2016.



이광국(Kwangkook Lee)

2008년 서울대 조선해양공학과(공학박사)
※관심분야 : SIL/HIL, M&S, PLM