실선 운항데이터 기반 축발전기 운전특성 분석 및 PMS HILS 검증 시나리오 개발

한명관[1], 이석구[2], 김동현[3*]
[1]한국조선해양기자재연구원 팀장, [2]에스엔시스 이사, [3]부경대학교 교수

Development of PMS HILS Validation Scenarios Based on Operational Data Analysis of a Marine Shaft Generator

Myeong-Gwan Han[1], Seok-Goo Lee[2], Dong-Hyun Kim[3*]
[1]Team Leader, Integrated Testing & Certification Team, Korea Marine Equipment Research Institute
[2]Director, R&D Center, S&SYS
[3]Professor, Dept. Smart Machine Mobility Engineering, Pukyong National University

요 약 국제해사기구(IMO)의 온실가스 규제 강화에 따라 다종 전력원을 통합 운용하는 전력관리시스템(PMS)의 중요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 320K급 초대형 원유운반선(VLCC)에서 2024년 7월 6일부터 15일까지 1시간 간격으로 수집된 219개 표본을 분석하였으며, SG 관련 분석에는 주요 분석변수가 모두 확보된 199개 유효표본을 사용하였다. SG는 185개 표본에서 운전 중이었으며, 이때 주기관 회전수는 36.7~51.1 RPM(평균 45.2±5.3 RPM), SG 출력은 평균 692.3±135.0 kW, 부하율은 평균 47.7±9.3%였다. 주요 병렬운전 조합인 G1+SG와 G2+SG는 전체 유효표본의 81.4%를 차지하였으며, G3+SG를 포함한 AG 1대-SG 병렬운전에서 SG 전력분담률은 49.8±0.8%로 나타났다. 실선 데이터에서 확인된 대표 운전상태와 부하변화 크기, 그리고 SG 제어사양의 운전경계조건을 단계적으로 연계하여 정상 병렬운전, SG 단독운전, 부하변동, 발전원 전환, 저·고회전수 한계 및 SG 탈락의 7개 PMS HILS 검증 시나리오를 입력조건, 작동조건, 기대응답 및 판정항목 형태로 개발하였다. 본 연구의 범위는 HILS 검증 시나리오 개발까지이며 실제 HILS 성능시험 결과는 포함하지 않는다.

주제어 : 축발전기, 전력관리시스템, 실선 운항데이터, 부하분담, 하이브리드 선박, HILS

Abstract As greenhouse-gas regulations for ships become increasingly stringent, the integrated operation of multiple power sources and power management systems (PMS) has become important for improving ship energy efficiency. This study analyzed 219 hourly operational samples collected from a 320K-class very large crude carrier (VLCC) from 6 to 15 July 2024, of which 199 complete samples were used for SG-related analyses. Shaft-generator (SG) operation was identified in 185 samples; the main-engine speed ranged from 36.7 to 51.1 RPM (45.2±5.3 RPM), while the mean SG power and load ratio were 692.3±135.0 kW and 47.7±9.3%, respectively. The G1+SG and G2+SG combinations accounted for 81.4% of the valid samples, and the SG power-sharing ratio for single-AG–SG parallel operation, including G3+SG, was 49.8±0.8%. Representative operating states and load-change magnitudes obtained from ship data were combined with SG control-boundary conditions to develop seven PMS HILS validation scenarios covering normal parallel operation, SG-only operation, load variation, power-source transition, low- and high-speed limits, and SG disconnection. Each scenario was defined in terms of input conditions, triggers, expected PMS responses, and evaluation items. The scope of this study is limited to scenario development and does not include PMS performance testing in a HILS environment.

Key Words : Shaft Generator, Power Management System, Ship Operational Data, Load Sharing, Hybrid Ship, HILS

본 논문은 산업통상부와 한국산업기술진흥원의 "지역혁신클러스터육성(R&D)(P0025328)"사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.
*교신저자 : 김동현(dhkim8@pknu.ac.kr)
접수일 2026년 09월 11일 수정일 2026년 10월 06일 심사완료일 2026년 10월 12일

www.kci.go.kr

1. 서론

국제해사기구(IMO)의 온실가스 감축정책 강화와 선박의 친환경·고효율화 요구에 따라 다양한 전력원을 연계하여 운용하는 하이브리드 선박 전력시스템의 중요성이 증가하고 있다[1-5]. 특히 선박의 운항조건과 전력수요에 따라 발전기, 축발전기(Shaft Generator, SG), 배터리 및 연료전지 등을 효율적으로 운용하기 위해서는 발전원의 기동·정지, 병렬운전 및 부하분담을 수행하는 전력관리시스템(Power Management System, PMS)의 역할이 중요하다[4,5,15,16]. 또한 PMS의 이상상태 대응 및 신뢰성 향상을 위해 FMEA 기반의 위험분석 연구도 수행되고 있다[13,14].

SG는 주기관 축계의 기계적 에너지를 이용하여 선내 전력을 공급하는 발전장치로, 독립형 발전기와 달리 주기관 회전수에 따라 발전 가능영역과 최대 가용출력이 제한된다[17,18]. 반면 실제 SG 출력은 주기관 회전수만으로 결정되지 않고 선내 전력수요, 발전원 조합 및 PMS의 부하분담 조건 등에 영향을 받는다. 따라서 SG가 적용된 선박 전력계통의 운전특성을 평가하기 위해서는 설계조건과 함께 실선에서 수집된 발전원별 운항데이터를 분석할 필요가 있다.

또한 PMS의 제어기능을 Hardware-in-the-Loop Simulation(HILS) 환경에서 검증하기 위해서는 실제 선박의 운전특성을 반영한 시험조건 설정이 중요하다[10-12]. 설계사양만을 기반으로 시험 시나리오를 구성할 경우 실제 운항에서 빈번하게 나타나는 발전원 조합과 부하변동을 충분히 반영하기 어려우므로, 실선 운항데이터로부터 대표 운전상태를 도출하여 시험조건으로 변환하는 과정이 요구된다.

본 연구의 목적은 실선 운항데이터에서 확인된 축발전기의 대표 운전상태를 PMS HILS 시험조건으로 전환하는 분석 및 시나리오 개발 절차를 제시하는 것이다. 본 연구의 기여는 다음과 같다.

(1) 실선 데이터 기반 SG 운전영역 도출: 주기관 회전수, SG 출력 및 부하율의 분포를 기술통계와 회전수 구간별로 정량화하였다.

(2) 발전원 조합별 부하분담 특성 분석: 주요 발전원 조합별 회전수, 총 발전전력, SG 및 AG 출력을 비교하고, AG-SG 병렬운전에서의 전력분담 특성과 SG 단독운전 조건을 정량화하였다.

(3) PMS HILS 검증 조건 및 시나리오 제안: 실선에서 직접 관측된 대표 운전상태·부하변화와 SG 제어 사양 기반 경계조건을 구분하여 단계별 개발절차와 시나리오별 입력조건·작동조건·기대응답·판정항목을 제시하였다.

단, 본 연구는 검증 시나리오 개발까지를 범위로 하며 HILS 장비에서의 PMS 성능시험 결과는 포함하지 않는다. 기존 연구와 본 연구의 차이는 표 1과 같이 정리하였다.

〈Table 1〉 Comparison with related studies

Ref.	Method	Focus	Ship SG data	HILS
[2]-[5]	Review	Hybrid ship EMS	No	No
[6]-[9]	Simulation	Ship EMS	No	No
[10], [11]	HILS	Ship PMS	No	Yes
[12]	HW test	Hybrid EMS	No	Yes
[17], [18]	Analysis	Shaft generator	No	No
This study	Data analysis	SG/AG operation	Yes	Scenario

Table 1은 기존 연구의 주된 연구대상과 방법을 기준으로 비교한 것으로, 본 연구는 실선 SG 운항데이터의 정량 분석 결과를 HILS 검증 시나리오의 입력조건과 직접 연계한다는 점에서 차이가 있다.

2. 대상 선박 및 분석 방법

2.1 대상 선박 및 전력계통 구성

본 연구에서는 SG가 적용된 320K급 VLCC 1척의 실선 운항데이터를 분석하였다. 대상 선박에는 MAN ES 7G80 ME-GI Tier III 이중연료 주기관이 적용되어 있으며, 주요 발전원은 이중연료 발전기 1대, 일반 발전기 2대 및 SG 1대로 구성되고 각 발전원의 정격출력은 1,450 kW이다.

본 논문에서는 이중연료 발전기(Dual-Fuel Generator)를 G1, 나머지 발전기(Generator)를 각각 G2 및 G3으로 표기한다. G1~G3을 통칭할 때는 보조발전기(Auxiliary Generator, AG)라는 용어를 사용한다. 또한 주기관 축계에 연결된 발전기는 축발전기(Shaft Generator, SG)로 표기한다.

발전원 운전조합은 G1+SG, G2+SG 및 G2+G3 등으로 표기하였다. 또한 보조발전기 1대 이상과 SG가 동시에 운전하는 상태는 AG-SG 병렬운전으로 표현하였다. 다만, 개별 운전조합의 분석에서는 실제 투입된 보조발

www.kci.go.kr

전기를 구분하기 위해 G1+SG, G2+SG 및 G3+SG와 같이 표기하였다.

〈Table 2〉 Main power sources of the target vessel

Power source	Rated capacity	Quantity	Remarks
G1 (Dual-Fuel Generator)	1,450 kW	1 ea	SWBD signal
G2 (Generator)	1,450 kW	1 ea	SWBD signal
G3 (Generator)	1,450 kW	1 ea	SWBD signal
SG (Shaft Generator)	1,450 kW	1 ea	Main-engine coupled

대상 선박은 주기관을 이용한 기계식 추진을 기본으로 하며, 주기관 축계와 연결된 SG를 통해 선내 전력을 공급할 수 있다. 본 연구에서는 실선에서 확보된 주기관 및 발전원 출력데이터를 분석대상으로 하여 SG 운전영역과 AG-SG 간 부하분담 특성을 분석하였다.



Type	320K VLCC (Owner : MARAN, Yard : SHI)
Dual Fuel Generator	1,450KW * 1 ea
Generator	1,450KW * 2 ea
Shaft Generator	1,450KW * 1 ea
Main Engine	MAN ES 7G80 ME-GI Tier III(Dual-Fuel LNG)

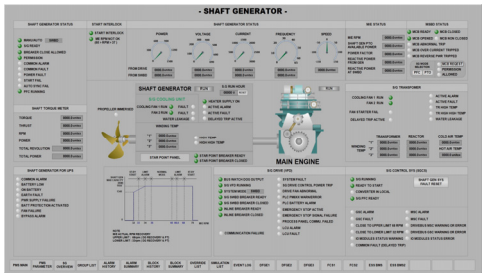
[Fig. 1] Representative vessel of the same series and main specifications of the target vessel

2.2 축발전기 운전조건 및 PEMS 구성

본 논문에서 전력관리시스템(Power Management System, PMS)은 발전원의 기동·정지, 계통 병입, 부하분담 및 운전상태 대응을 수행하는 전력계통 제어기능을 의미한다. 반면 전력·에너지 관리시스템(Power and Energy Management System, PEMS)은 PMS 기능과 함께 발전원 상태감시 및 운전정보 관리기능을 포함하는 통합관리시스템으로 정의한다. 따라서 PMS는 발전원 제어 및 부하분담 기능을 의미하고, PEMS는 PMS 기능을 포함하는 상위 감시·관리시스템을 의미하며, 본 논문에서는 두 용어를 구분하여 사용한다.

본 연구에서 개발하는 PMS HILS 검증 시나리오의 대상 기능은 발전원의 기동·정지, 계통 병입, 부하분담 및 이상상태 대응이다. Fig. 2는 이러한 PMS 기능을 포함하는 개발 중인 PEMS에 구현된 SG 감시 및 제어 화면을 나타낸다.

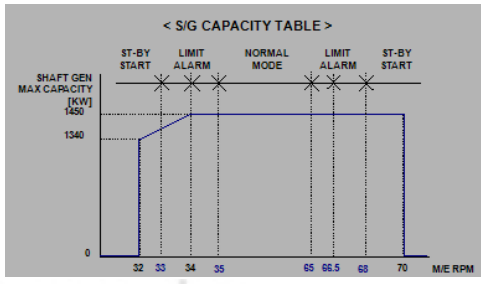
PEMS에서는 SG의 유효전력, 전압, 전류, 주파수 및 회전속도와 함께 주기관 회전수, SG 가용출력, 역률 및 무효전력 등의 정보를 감시하도록 구성되어 있다. 또한 SG 구동장치(VFD), SG 제어시스템, 변압기 및 냉각장치의 운전상태와 관련 경보·고장 정보를 표시한다.



[Fig. 2] Shaft generator monitoring and control interface implemented in the PEMS

대상 SG의 정격출력은 1,450 kW이며, 주기관 회전수에 따라 Fig. 3과 같은 최대 가용출력 및 제어조건이 설정되어 있다. 주기관 회전수가 32 RPM 이하인 경우 SG 가용출력은 0 kW이며, 32~34 RPM 구간에서는 약 1,340~1,450 kW로 증가한다. 정상운전영역에서는 최대 가용출력 1,450 kW가 적용되고, 70 RPM에서는 SG 가용출력이 0 kW로 제한되는 조건으로 설정되어 있다.

저회전수 측에서는 33 RPM에서 대기 보조발전기 기동, 34 RPM에서 운전한계 경보, 35 RPM에서 정상운전 모드 조건이 설정되어 있다. 고회전수 측에서는 66.5 RPM에서 운전한계 경보, 68 RPM에서 대기 보조발전기 기동, 70 RPM에서 SG 발전제한조건이 설정되어 있다.



[Fig. 3] Shaft generator capacity and control points according to main engine speed

www.kci.go.kr

Fig. 3의 SG 가용출력 및 제어조건은 연구개발 과정에서 확보한 운전조건 자료를 기반으로 하며, 본 연구에서는 해당 곡선을 SG의 기계적 출력특성 자체보다는 운전허용영역과 제어 설정점을 나타내는 운전조건으로 활용하였다. 따라서 32 RPM 부근의 급격한 출력변화 역시 연속적인 발전특성보다는 SG 투입 및 운전제한과 관련된 제어상 경계조건으로 해석하였다.

2.3 실선 운항데이터 및 전처리

본 연구에서는 2024년 7월 6일 00:00부터 7월 15일 02:00까지 1시간 간격으로 저장된 총 219개 표본을 분석하였다. 분석변수는 주기관 회전수, SG 출력, G1 출력, G2 출력, G3 출력 및 총 발전전력의 6개 항목으로 구성하였다. 데이터 수집 및 전처리 기준은 Table 3과 같다.

〈Table 3〉 Data collection and preprocessing criteria

Item	Description
Vessel	320K-class VLCC
Period	Jul. 6–15, 2024
Sampling	1 h; 219 samples
Variables	ME speed, G1–G3 power, SG power, total power
Missing data	20 SG samples excluded without interpolation
Operating state	Power ≥ 50 kW
Valid samples	199 for SG/mode analysis; 219 for total-power variation
Outliers	IQR outliers retained after operating-mode review

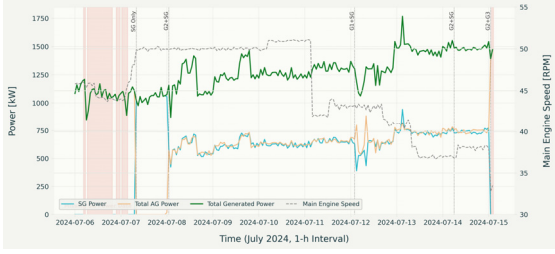
Note: Total-power variation was calculated from 218 consecutive 1-h intervals using all 219 total-power samples.

주요 분석변수 중 SG 출력에서 20개의 결측값이 확인되었으며, 결측 원인을 자료만으로 특정하기 어려워 보간하지 않고 SG 운전특성 및 발전원 조합 분석에서 제외하였다. 이에 따라 주요 분석변수가 모두 존재하는 199개 표본을 유효표본으로 선정하였다. 반면 총 발전전력은 219개 표본에서 결측이 없어, 연속된 218개 1시간 구간을 부하변화 분석에 활용하였다.

또한 199개 유효표본에서 총 발전전력과 G1~G3 및 SG 출력합이 반올림 오차 범위 내에서 일치함을 확인하였다. 기술통계의 표준편차는 표본표준편차로 산정하였으며, 회귀분석은 주기관 회전수를 설명변수, SG 출력을 반응변수로 하는 단순 선형회귀를 적용하였다.

발전원 출력분포를 검토한 결과, 낮은 출력군은 최대 약 31.2 kW 이하, 주요 운전출력군은 최소 약 375.2 kW 이상으로 나타나 두 출력군이 명확히 구분되었다. 이에 본 연구에서는 SG 및 각 발전원의 출력이 50 kW 이상인 경우를 운전상태로 정의하였다. 해당 기준은 발전기의 제어설정값이 아니라 운항데이터 분석을 위한 분류기준이다. 또한 SG 출력에 대해 사분위 범위(IQR) 1.5배 기준의 이탈점을 검토한 결과, 해당 표본은 SG 단독운전 및 고·저부하 운전 등 운전조건 차이로 판단되어 분석에서 제외하지 않았다.

본 자료는 1시간 간격의 시계열 운항데이터이므로 각 표본은 해당 시점의 대표 운전상태로 해석하였다. 따라서 발전원 투입·탈락 과정에서 발생하는 수초~수분 범위의 과도응답은 직접 분석하지 않고, 주기관 회전수, 발전원 출력, 운전조합, SG 부하율 및 전력분담률 등의 정상운전특성을 분석하여 HILS 검증 시나리오의 운전조건 설정에 활용하였다. 또한 확보한 자료에는 항로, 해상상태, 적재상태 및 기상조건 정보가 포함되지 않았으므로, 분석결과는 해당 기간에 관측된 전력계통 운전특성으로 한정하여 해석하였다.



[Fig. 4] Time-series of main engine speed and power generation during the analysis period

발전원 운전조합은 각 발전원에 대해 50 kW 운전판정 기준을 적용하여 상호배타적으로 분류하였다. 이를 통해 AG 1대-SG 병렬운전, SG 단독운전, 복수 AG 병렬운전 및 복수 AG-SG 병렬운전 등 주요 운전상태의 발생빈도와 출력특성을 비교하였다.

SG 운전표본의 전력분담률 R_{SG}는 식 (1)과 같이 산정하였다. 발전원 간 부하분담 특성은 SG 단독운전과 AG-SG 병렬운전을 구분하여 분석하였다.

$$R_{SG} = \frac{P_{SG}}{P_{Total}} \times 100 \quad (1)$$

또한 주기관 회전수에 따른 SG 최대 가용출력을 고려

www.kci.go.kr

하여 SG 부하율 L_{SG}를 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$L_{SG} = \frac{P_{SG}}{P_{SG,available}(N_{ME})} \times 100 \quad (2)$$

여기서 P_{SG}는 SG 유효전력, P_{Total}은 동일 시점의 총 발전 유효전력, $P_{SG,available}(N_{ME})$는 주기관 회전수 N_{ME}에서의 SG 최대 가용출력을 의미한다. 단, P_{Total}이 0 kW 이하인 표본은 전력분담률 산정에서 제외하였으며, $P_{SG,available}(N_{ME})$가 0 kW인 표본은 SG 부하율 산정에서 제외하였다. SG 평균 전력분담률은 해당 분석대상 표본별로 식 (1)을 적용하여 산정한 값의 산술평균으로 계산하였다.

3. 분석 결과

3.1 축발전기 운전영역 및 출력특성

199개 유효표본 중 SG 출력이 50 kW 이상인 185개 표본을 SG 운전상태로 분류하였다. SG 운전 시 주기관 회전수는 36.7~51.1 RPM으로 나타났으며, 모든 SG 운전표본이 Fig. 3의 정상운전영역인 35~65 RPM 내에 위치하였다. 따라서 해당 표본에서는 SG 최대 가용출력 1,450 kW를 적용하여 부하율을 산정하였다.

SG 운전표본의 주요 기술통계량은 Table 4와 같다. SG 출력은 평균 692.3±135.0 kW, 중앙값 654.5 kW로 나타났으며, 제1사분위수와 제3사분위수는 각각 615.7 kW와 731.0 kW였다. 평균 부하율은 47.7±9.3%, 최대 부하율은 78.6%였으며, 주기관 회전수는 평균 45.2±5.3 RPM으로 분석되었다.

〈Table 4〉 Descriptive statistics for SG operating samples (n=185)

Variable	Mean ±SD	Median	Q1-Q3	Range
ME speed (RPM)	45.2 ±5.3	44.0	40.9-50.0	36.7-51.1
SG power (kW)	692.3 ±135.0	654.5	615.7-731.0	390.4-1,139.1
SG load ratio (%)	47.7 ±9.3	45.1	42.5-50.4	26.9-78.6
Total power (kW)	1,297.7 ±152.1	1,297.2	1,214.8-1,436.7	872.8-1,768.3

Note: SD, standard deviation; Q1 and Q3, first and third quartiles; range, minimum-maximum.

주기관 회전수 구간에 따른 SG 출력특성은 Table 5와 같다. 구간별 평균 SG 출력은 654.2~733.6 kW로 나타났으며, 회전수 증가에 따라 출력이 일관되게 증가하거나 감소하는 경향은 확인되지 않았다. 이는 각 구간의 발전원 운전조합과 선내 전력수요 차이가 함께 반영된 결과로 해석하였다.

〈Table 5〉 SG output characteristics by main-engine speed range

ME speed (RPM)	n	SG power (kW)	Load ratio (%)	Main combination
35≤N〈40	41	733.6 ±18.4	50.6	G1+SG / G2+SG
40≤N〈45	52	654.2 ±82.6	45.1	G1+SG / G2+SG
45≤N〈50	23	712.7 ±185.7	49.1	G2+SG / SG only
50≤N〈55	69	689.8 ±174.7	47.6	G2+SG / SG only

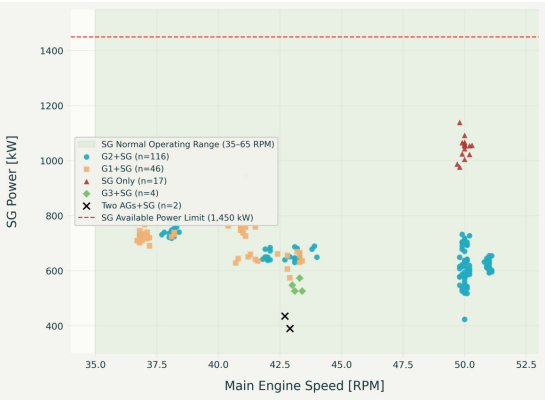
Note: N, main-engine speed; SG power, mean± SD; load ratio, mean.

전체 SG 운전표본에서 주기관 회전수와 SG 출력 간 Pearson 상관계수는 -0.071이었으며, 단순회귀분석의 결정계수는 $R^2 = 0.005$로 나타나 뚜렷한 선형관계가 확인되지 않았다. 운전조합별로 분석한 결과, G2+SG 운전표본(n=116)에서는 회귀기울기 -8.82 kW/RPM 및 $R^2 = 0.461$, G1+SG 운전표본(n=46)에서는 -10.59 kW/RPM 및 $R^2 = 0.191$로 나타났다. 이와 같은 결과는 동일한 정상운전영역에서도 발전원 운전조합에 따라 주기관 회전수와 SG 출력 간의 관계가 다르게 나타날 수 있음을 보여준다. 따라서 주기관 회전수는 SG의 운전허용영역 및 최대 가용출력을 결정하는 경계조건으로 해석하였으며, 실제 SG 출력은 회전수뿐 아니라 선내 전력수요와 발전원 운전조합의 영향을 함께 받는 것으로 판단하였다.

다만 운전조합별 회귀기울기는 관측된 운전상태 간 관계를 나타내는 것으로, 주기관 회전수 증가가 SG 출력감소를 직접 유발한다는 인과관계로 해석하지 않았다.

또한 IQR 1.5배 기준으로 확인된 21개 이탈점 중 17개는 SG 단독운전 표본이었으며, 나머지 표본도 특정 발전원 조합 및 고·저부하 운전상태에서 나타난 값으로 확인되어 계측오류로 판단하지 않고 분석에 포함하였다.

www.kci.go.kr



[Fig. 5] SG power versus main-engine speed by operating combination

Fig. 5에는 SG 운전표본의 발전원 조합별 분포와 정상운전영역 및 최대 가용출력을 함께 나타내었다.

3.2 발전원 운전조합 및 부하분담 특성

199개 유효표본의 발전원 운전조합별 분석결과는 Table 6과 같다. G2+SG가 116개(58.3%)로 가장 높은 비중을 차지하였으며, G1+SG는 46개(23.1%)로 나타났다. 두 조합은 전체 유효표본의 81.4%를 차지하였다. G3+SG 4개 표본을 포함하면 AG 1대-SG 병렬운전은 총 166개(83.4%)로, 분석기간의 대표 운전형태였다. 이 외에 SG 단독운전은 17개(8.5%), G2+G3 병렬운전은 14개(7.0%), 복수 AG-SG 병렬운전은 2개(1.0%)로 나타났다.

〈Table 6〉 Load-sharing characteristics by operating combination

Combination	n (%)	Total power (kW)	SG power (kW)	SG share (%)
G2+SG	116 (58.3)	1,292.3±123.2	643.7	49.8
G1+SG	46 (23.1)	1,420.8±114.7	708.3	49.8
G3+SG	4 (2.0)	1,115.6±57.3	543.5	48.7
SG only	17 (8.5)	1,050.0±38.8	1,048.9	99.9
G2+G3	14 (7.0)	1,115.8±113.4	0.7	0.1
Two AGs+SG	2 (1.0)	1,255.2±93.3	412.9	32.9
Total	199 (100)	-	-	-

Note: Total power is presented as mean±SD; SG power and SG share are sample means. Operating states were classified using a 50-kW threshold. Recorded values below the threshold were retained in the calculations; the SG was classified as non-operating in G2+G3.

AG 1대-SG 병렬운전 166개 표본에서 SG 전력분담률은 평균 49.8±0.8%, 범위 48.0~53.4%로 나타나 두 발전원이 거의 균등하게 부하를 분담하였다. G1+SG의 평균 총 발전전력은 1,420.8 kW로 G2+SG의 1,292.3 kW보다 높았으며, SG 평균출력도 각각 708.3 kW와 643.7 kW로 나타났다. 이와 같은 차이는 운전조합별로 관측된 부하수준의 차이를 나타내지만, 제공된 자료만으로 각 발전원 조합의 선택 원인이나 PMS의 투입 전략을 특정할 수는 없다.

SG 단독운전으로 분류된 17개 표본은 7월 7일 08시부터 7월 8일 00시까지 연속적으로 나타났다. 이때 주기관 회전수는 49.7~50.3 RPM, 총 발전전력은 976.8~1,139.1 kW, SG 부하율은 67.4~78.6%였다. 다음 시각인 7월 8일 01시에는 G2+SG 병렬운전 상태가 관측되었으나, 1시간 간격 자료이므로 발전기 기동·병입 및 부하인계 과정은 직접 확인하지 못하였다.

G2+G3 병렬운전은 SG 비운전 상태의 비교조건으로 활용하였다. 특히 7월 15일 01시에는 주기관 회전수 32.8 RPM에서 SG 출력 1.4 kW와 G2+G3 운전상태가 관측되었다. 이는 SG 제어사양의 저회전수 경계인 33 RPM 대기 보조발전기 기동 및 32 RPM 이하 가용출력 제한 조건에 인접한 관측점이다. 다만 이 표본만으로 해당 설정점에서의 경보·기동 또는 SG 분리 동작이 실제 수행되었음을 입증할 수는 없다.

SG 운전표본 전체($n = 185$)에서 SG 출력과 AG 총출력의 Pearson 상관계수는 -0.67이었으나, AG 1대-SG 병렬운전 표본($n = 166$)에서는 0.95로 나타났다. 따라서 전체 표본의 음의 상관관계는 SG 단독운전과 병렬운전이 혼합된 운전모드 구성의 영향을 받는 것으로 해석하였다. AG 1대-SG 병렬운전에서는 SG와 AG 출력이 같은 방향으로 변동하였으며, 전력분담률과 함께 고려할 때 두 발전원이 거의 균등하게 부하를 분담하는 특성이 관측되었다. 이는 PMS 내부 제어명령이나 동적 제어성능을 직접 검증한 결과가 아니라, 실선 출력자료에서 확인된 운전특성이다.

총 발전전력의 부하변화 특성은 전체 219개 표본의 연속된 218개 1시간 구간을 이용하여 분석하였다. 절대변화량의 중앙값은 34.7 kW, 90백분위는 117.5 kW, 최대값은 360.0 kW였다. 이 값은 두 관측 시점 간 전력차이로서 순간 부하변화율이나 과도응답을 의미하지 않는다. 본 연구에서는 약 120 kW와 360 kW를 HILS 부하변동 시나리오의 대표 및 관측 최대 변화조건에 대한 입력 크기 설정 근거로 활용하였다. 다만 부하변화 속도

www.kci.go.kr

는 본 자료로부터 산정하지 않았으며, 향후 HILS 시험계획에서 별도로 설정할 필요가 있다.

4. PMS HILS 검증 시나리오 개발

4.1 단계별 시나리오 개발 절차

PMS HILS 검증 시나리오는 실선 운항데이터에서 확인된 대표 운전상태와 부하변화 특성, SG 제어사양에 따른 운전경계조건 및 PMS의 비정상상태 대응조건을 단계적으로 연계하여 개발하였다. 실선 운항데이터는 대표 운전조건을 선정하는 데 활용하였으며, 1시간 간격 자료에서 직접 확인하기 어려운 경계 및 비정상조건은 SG 제어사양과 PMS의 검증 대상 기능을 기반으로 보완하였다. 시나리오 개발절차는 Fig. 6과 같이 6단계로 구성하였다.

단계 1. 데이터 품질 확인: 219개 원표본의 결측 및 정합성을 확인하고, SG 출력 결측 20개를 제외하여 SG 운전특성 및 운전조합 분석을 위한 199개 유효표본을 선정하였다. 총 발전전력 변화량 분석에는 결측이 없는 전체 219개 표본을 사용하였다.

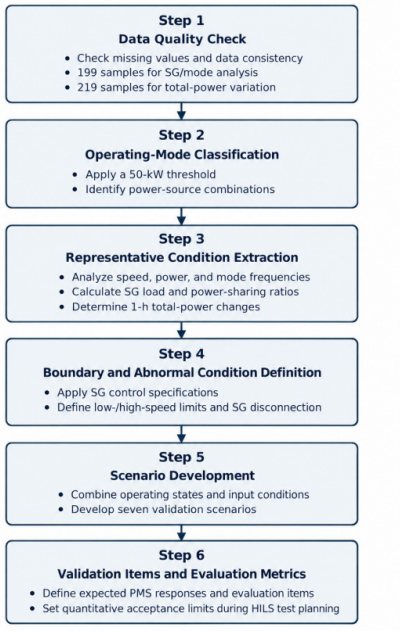
단계 2. 운전상태 분류: 발전원 출력분포를 기반으로 50 kW를 분석용 운전판정 기준으로 적용하여 각 발전원의 운전 여부와 발전원 조합을 분류하였다.

단계 3. 대표 운전특성 추출: 발전원 조합별 발생빈도, 주기관 회전수, 총 발전전력, SG 출력·부하율·전력분담률 및 연속 1시간 총 발전전력 변화크기를 분석하여 대표 운전조건을 선정하였다.

단계 4. 경계 및 비정상조건 정의: 저·고회전수 운전경계는 Fig. 3의 SG 제어사양을 적용하고, SG 탈락은 PMS의 비정상상태 대응 및 AG 부하인수 기능을 확인하기 위한 시험조건으로 정의하였다.

단계 5. 검증 시나리오 구성: 실선에서 확인된 대표 운전상태와 부하변화 크기를 시나리오의 초기조건 및 입력조건으로 활용하고, 운전경계조건과 비정상조건을 결합하여 총 7개의 PMS HILS 검증 시나리오를 구성하였다.

단계 6. 검증항목 및 판정방향 설정: 각 시나리오의 기대 PMS 응답과 기능별 검증항목을 정의하였다. 전압·주파수 허용범위, 부하분담 오차, 대기 보조발전기 기동시간 및 부하인수시간 등의 정량 허용값은 대상 PMS 요구사항과 적용 기준에 따라 향후 HILS 시험계획 단계에서 설정하도록 하였다.



[Fig. 6] Development procedure of PMS HILS validation scenarios based on ship operational data

이 절차에 따라 정상 AG-SG 병렬운전, SG 단독운전 및 부하변동 조건은 실선 운항데이터를 주요 근거로 설정하였다. AG-SG 전환운전은 발전원 간 정상적인 부하인계 기능을 확인하기 위한 조건으로 구성하였으며, 저·고회전수 한계조건은 SG 제어사양을 기반으로 설정하였다. SG 탈락조건은 PMS의 비정상상태 대응기능을 확인하기 위한 조건으로 추가하였다. 각 시나리오의 개발근거, 주요 입력조건 및 검증항목은 Table 7에 요약하였으며, 대표 초기조건과 기대 PMS 응답은 4.2절에서 설명하였다.

4.2 시나리오별 입력조건 및 검증항목

4.1절의 개발절차에 따라 총 7개의 PMS HILS 검증 시나리오를 구성하였다. Table 7에는 시나리오별 개발근거, 주요 입력조건 및 검증항목을 요약하였으며, 대표 초기조건과 기대 PMS 응답은 다음과 같이 설정하였다.

www.kci.go.kr

〈Table 7〉 PMS HILS validation scenarios

Scenario	Basis	Input	Check
S1 Parallel	Ship data	AG+SG	Load sharing
S2 SG-only	Ship data	SG only	Supply stability
S3 Load change	Ship data	±120 / ±360 kW	Load response
S4 Transition	Data / function	AG↔SG	Load transfer
S5 Low-speed	Data / spec.	35→32 RPM	Alarm / AG start / SG limit
S6 High-speed	SG spec.	65→70 RPM	Alarm / AG start / SG limit
S7 SG trip	Abnormal case	SG trip	AG takeover / protection

Note: Detailed conditions and expected responses are described in Section 4.2.

S1은 G2+SG 병렬운전의 평균 부하수준을 반영하여 총부하 약 1,290 kW의 대표 초기조건으로 설정하고, AG와 SG의 거의 균등한 부하분담 및 전력공급 연속성을 확인하도록 구성하였다. S2는 약 50 RPM, 총부하 약 1,050 kW의 SG 단독운전 조건에서 전력공급 안정성과 가용출력 이내의 운전을 확인하도록 설정하였다. S3은 S1 조건에 약 120 kW와 360 kW의 부하 증가·감소를 인가하여 출력 재분담과 정상상태 회복을 확인하도록 구성하였으며, 부하변화 속도는 향후 시험계획에서 별도로 설정하도록 하였다.

S4는 실선에서 관측된 발전원 조합의 전환 전·후 상태를 참고하여, AG 기동·병입 또는 정상 전환명령에 따른 부하인계와 전력공급 연속성을 확인하도록 구성하였다. S5와 S6은 AG-SG 병렬운전 상태에서 주기관 회전수를 각각 35→32 RPM 및 65→70 RPM으로 변화시키고, Fig. 3의 설정점에 따른 경보, 대기 AG 기동 및 SG 발전제한 기능을 확인하도록 설정하였다.

S7은 AG-SG 병렬운전 중 SG 탈락을 모사하여 잔여 AG의 부하인수와 보호기능을 확인하도록 구성하였다. 총부하가 AG 1대의 정격출력 1,450 kW를 초과하는 고부하 조건에서는 대기 AG 기동 및 필요 시 부하차단 기능을 검증 대상으로 포함하였다.

4.3 적용 범위

본 연구에서 개발한 시나리오는 HILS 시험을 위한 입력조건 및 기능검증 구조이며, 실제 HILS 장비를 이용한 PMS 성능시험 결과를 포함하지 않는다. Table 7의 검증항목은 각 시나리오에서 확인해야 할 PMS 기능과 전력공급 연속성에 대한 평가방향을 제시한 것이다. 전압·주파수 허용범위, 부하분담 오차, 대기 보조발전기 기동시간 및 부하인수시간 등의 정량적인 허용값은 대상 PMS 요구사항, 발전기 제어사양 및 적용 규칙에 따라 HILS 시험계획 단계에서 설정할 필요가 있다. 기능적 판정은 시나리오별 기대 명령·경보·보호 동작의 수행 여부와 전력공급 유지 또는 계획된 복구 여부를 확인하는 방향으로 설정하였다.

5. 결론

본 연구에서는 320K급 VLCC 1척에서 약 9일간 1시간 간격으로 수집된 실선 운항데이터를 분석하여 SG의 운전영역과 발전원 간 부하분담 특성을 정량화하고, 이를 PMS HILS 검증 시나리오의 입력조건 및 개발근거로 활용하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) SG 운전표본 185개의 주기관 회전수는 36.7~51.1 RPM으로, 모두 제어사양상 정상운전영역인 35~65 RPM 내에 위치하였다. SG 출력은 평균 692.3±135.0 kW, 부하율은 평균 47.7±9.3%로 나타났다. 전체 SG 운전표본에서 회전수와 SG 출력 간 뚜렷한 선형관계는 확인되지 않았다($r = -0.071$, $R^2 = 0.005$). 분석기간에는 최대 가용출력이 1,450 kW로 일정하였으며, 실제 출력은 회전수와 함께 선내 전력수요 및 발전원 운전조합을 고려하여 해석할 필요가 있었다.

(2) G1+SG와 G2+SG 조합이 전체 유효표본의 81.4%를 차지하였으며, G3+SG를 포함한 AG 1대-SG 병렬운전 166개 표본에서 SG 전력분담률은 49.8±0.8%로 나타났다. AG 1대-SG 병렬운전 표본에서 SG와 AG 출력은 높은 양의 상관관계($r = 0.95$)를 보였으며, 전력분담률과 함께 고려할 때 거의 균등한 부하분담 특성이 나타났다. SG 단독운전은 약 50 RPM, 총 발전전력 약 1,050 kW 조건에서 나타났다.

(3) 실선 대표 운전상태, 연속 1시간 총 발전전력 변화크기 및 SG 제어사양의 경계조건을 6단계 절차로 연계하여 7개 PMS HILS 검증 시나리오를 입력조건·작동조건·기대응답·판정항목 형태로 제시하였다.

본 연구는 검증 시나리오 개발까지를 범위로 하며 실제 HILS 시험결과는 포함하지 않는다. 또한 단일 선박의 약 9일간 1시간 간격 자료를 대상으로 하였으므로, 선종, 추진계통 구성, SG 제어방식, PMS 제어로직, 적재상태, 항로 및 기상조건이 다른 선박에 결과를 직접 일반화하

www.kci.go.kr

기에는 한계가 있다. 특히 1시간 자료는 대표 운전상태와 부하수준을 파악하는 데에는 유효하지만 발전원 투입·탈락 시 단시간 과도응답을 분석하기에는 충분하지 않다. 따라서 본 결과는 대상 선박 및 유사 계통 선박의 HILS 시험조건 설정을 위한 기준자료로 해석하는 것이 적절하다. 향후에는 장기간·다선박·고해상도 운항자료를 확보하고, 개발한 시나리오를 실제 PMS HILS 환경에 구현하여 정량 판정기준에 따른 성능검증을 수행할 필요가 있다.

REFERENCES

[1] International Maritime Organization, "2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships," Resolution MEPC.377(80), London, UK, 2023.

[2] R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman, "Design and Control of Hybrid Power and Propulsion Systems for Smart Ships: A Review of Developments," Applied Energy, Vol. 194, pp. 30-54, 2017.

[3] H. Hou, M. Gan, X. Wu, K. Xie, and Z. Fan, "Review of Hybrid Ship Energy Management," Chinese Journal of Ship Research, Vol. 16, No. 5, pp. 216-229, 2021.

[4] E. Nivolianiti, Y. L. Karnavas, and J. F. Charpentier, "Energy Management of Shipboard Microgrids Integrating Energy Storage Systems: A Review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 189, Art. no. 114012, 2024.

[5] X. Guo, X. Lang, Y. Yuan, L. Tong, B. Shen, T. Long, and W. Mao, "Energy Management System for Hybrid Ship: Status and Perspectives," Ocean Engineering, Vol. 310, Art. no. 118638, 2024.

[6] N. Planakis, G. Papalambrou, and N. Kyrtatos, "Predictive Power-Split System of Hybrid Ship Propulsion for Energy Management and Emissions Reduction," Control Engineering Practice, Vol. 111, Art. no. 104795, 2021.

[7] C. Xu, L. Fan, Z. Jiang, C. Shen, and H. Li, "Investigation on Energy Management Strategy of Gas-Electric Marine Hybrid Propulsion System with Improved Dynamic Programing Algorithm," International Journal of Engine Research, Vol. 25, No. 1, pp. 140-155, 2024.

[8] S. Wu, T. Li, H. L. Wang, R. Chen, S. Huang, and S. Y. Li, "Energy Management of Marine Hybrid Power System with Composite Energy Storage Devices for a Tugboat," SAE Technical Paper 2023-32-0176, 2023.

[9] C. Tsoumpris and G. Theotokatos, "A Decision-Making Approach for the Health-Aware Energy Management of Ship Hybrid Power Plants," Reliability Engineering & System Safety, Vol. 235, Art. no. 109263, 2023.

[10] S. J. Lee, S. K. Kwak, S. H. Kim, H. J. Jeon, and J. H. Jung, "Test Platform Development of Vessel's Power Management System Using Hardware-in-the-Loop Simulation Technique," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 12, No. 6, pp. 2298-2306, 2017.

[11] A. Genić, P. Gartner, M. Almeida, and D. Zuber, "Hardware-in-the-Loop Testing of Shipboard Power System's Management, Control and Protection," 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-6, 2017.

[12] X. Sun, Y. Gao, and C. Yao, "Development and Test Validation of Energy Management System for Marine Hybrid Power System," Journal of the Institution of Engineers (India): Series C, Vol. 105, No. 6, pp. 1457-1466, 2024.

[13] K. Yoon and J. Kim, "FMEA of Electric Power Management System for Digital Twin Technology Development of Electric Propulsion Vessels," Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 27, No. 7, pp. 1098-1105, 2021.

[14] M. G. Han, S. G. Lee, and D. H. Kim, "Risk Mitigation Strategy Based on FMEA for Integrated Power Management System: A Case Study Applying Fuzzy Service FMEA," Journal of Internet of Things and Convergence, Vol. 11, No. 5, pp. 181-187, 2025.

[15] International Electrotechnical Commission, IEC 60092-504:2026, Electrical Installations in Ships - Part 504: Automation, Control and Instrumentation, Geneva, Switzerland, 2026.

[16] International Electrotechnical Commission, IEC 60092-501:2025, Electrical Installations in Ships - Part 501: Special Features - Electric Propulsion Plant, Geneva, Switzerland, 2025.

[17] H. M. Kim, "Consideration on the Control Characteristics of Active Rectifier for Shaft Generator through Comparison with a Diode Rectifier," Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 47, No. 6, pp. 427-433, 2023.

[18] K. Gökbulut Belli, B. Esenboğa, A. Yavuzdeğer, and T. Demirdelen, "Design and Energy Efficiency Analysis of a Shaft Generator for Military Ships," Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 165-180, 2024.

www.kci.go.kr

한 명 관(Myeong-Gwan Han) [정회원]



- 2010년 8월 : 한국해양대학교 기계정보공학부 기계시스템 공학전공 (공학사)
- 2021년 8월 : 한국해양대학교 기계공학과 기계공학전공(공학석사)
- 2010년 6월 ~ 현재 : 한국조선해양기자재연구원 팀장

〈관심분야〉
하이브리드선박, 다종전력통합관리시스템, FMEA, 항해통신장비

이 석 구(Seok-Goo Lee) [정회원]



- 1999년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2001년 1월 ~ 2017년 8월 : 삼성중공업(주) 차장
- 2017년 9월 ~ 현재 : 에스엔시스(주) 이사

〈관심분야〉
선박운항 및 항해시스템, 친환경선박기술, 선박유지보수, 선박자율운항, 선박전력관리 및 운항효율화

김 동 현(Dong-Hyun Kim) [정회원]



- 2010년 2월 : 부경대학교 조선해양시스템공학과 (공학사)
- 2012년 8월 : 부경대학교 조선해양시스템공학과 (공학석사)
- 2019년 8월 : 부경대학교 조선해양시스템공학과 (공학박사)
- 2010년 10월 ~ 2023년 2월 : 한국조선해양기자재연구원 책임연구원
- 2023년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 부교수

〈관심분야〉
이상치 탐지, 탄소중립, 선박 최적운항

www.kci.go.kr