

## 직류기반 가변속 발전 시스템을 이용한 에너지 절감에 관한 연구

박기도\* · 노길태\*\* · 김경화\*\* · 문창재\*\* · 김종수\*\*\*\*†

\*, \*\* (사)한국선급 연구원, \*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

## A Study on Energy Savings of a DC-based Variable Speed Power Generation System

Kido Park\* · Gilttae Roh\*\* · Kyunghwa Kim\*\* · Changjae Moon\*\* · Jongsu Kim\*\*\*\*†

\*, \*\* Researcher, Alternative Fuel Technology Research Team, Korean Register, Busan 46762, Korea

\*\*\* Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime &amp; Ocean University, Busan 49112, Korea

**요 약** : 국제적인 선박 배출 가스에 대한 환경 규제가 점차 강화됨에 따라 전기추진 및 하이브리드 추진선박에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이러한 선박에 적용하기 위한 다양한 솔루션이 개발 및 적용되고 있는데 특히 전력계통의 안정화, 시스템의 효율성을 높이기 위한 방안으로 직류배전시스템이 적용되고 있다. 또한, 선박용 직류배전시스템에 대한 안전 및 성능에 대한 검증 및 시험의 중요성이 요구되고 있다. 본 연구는 직류배전 테스트베드 구축 및 직류배전(가변속 발전)시스템에 대한 성능을 검증하고 연료소모량 분석한 결과로서 선박용 직류배전에 적용되고 있는 가변속 발전시스템을 적용하였으며, 발전기에서 출력되는 전력을 정류기를 통해 직류전력으로 변환하여 시스템에 연계하고 이러한 장치들을 감시 및 제어하기 위한 시스템을 개발하였다. 이러한 직류배전 시스템을 적용한 시험을 통해 최대 전압은 751.5V이고 최소전압은 731.4V가 측정되어 전압변동률은 2.7%로 3% 이내에서 안정적으로 전압이 공급되는 것을 확인하였고 부하변동에 따라 가변속 발전시스템을 적용하였을 경우 연료소모량이 기존 정속발전시스템과 비교하여 구간에 따라 최대 20%이상 연료절감이 되는 것을 시험을 통해 확인하였다.

**핵심용어** : 직류배전시스템, 가변속 발전시스템, AFE 정류기, 연료소모량, 부하시나리오

**Abstract** : As international environmental regulations on ship emissions are gradually strengthened, interest in electric propulsion and hybrid propulsion ships is increasing, and various solutions are being developed and applied to these ships, especially stabilization of the power system and system efficiency. The direct current distribution system is being applied as a way to increase the power. In addition, verification and testing of safety and performance of marine DC distribution systems is required. As a result of establishing a DC distribution test bed, verifying the performance of the DC distribution (variable speed power generation) system, and analyzing fuel consumption, this study applied a variable speed power generation system that is applied to DC power distribution for ships, and converted the power output from the generator into a rectifier. A system was developed to convert direct current power to connect to the system and monitor and control these devices. Through tests using this DC distribution system, the maximum voltage was 751.5V and the minimum voltage was 731.4V, and the voltage fluctuation rate was 2.7%, confirming that the voltage is stably supplied within 3%, and a variable speed power generation system was installed according to load fluctuations. When applied, it was confirmed through testing that fuel consumption could be reduced by more than 20% depending on the section compared to the existing constant speed power generation system.

**Key Words** : DC-Distribution system, Variable Speed Generation, AFE Rectifier, Fuel Oil Consumption, Load Scenario

## 1. 서 론

최근 국제적인 선박 배출 가스에 대한 환경 규제가 점차 강화됨에 따라 선박용 직류배전시스템에 대한 관심이 증대

되고 있다. 선박용 직류배전시스템에 대한 안전 및 성능에 대한 검증 및 시험의 중요성이 요구되고 있으며 해외 선급에서는 직류배전 시스템을 탑재한 선박의 상업화를 위해 선사, 조선소 및 기자재 업체들과의 공동 연구를 통해 직류배전에 대한 선박탑재, 시험 인증규정 개발을 통해 향후 선박 시장 환경에 대응하고 있다.

\* First Author : [kdpark@krs.co.kr](mailto:kdpark@krs.co.kr), 070-8799-8749† Corresponding Author : [jongskim@kmou.ac.kr](mailto:jongskim@kmou.ac.kr), 051-410-4841

본 연구에서는 선행연구(Park, 2019)를 통해 개발된 가변속 발전기를 활용하여 정속발전기와 가변속발전기의 에너지 절감을 비교하기 위하여 선박에서 사용하는 부하를 기준으로 60~100% 부하에 따라 엔진속도를 가변하여 전력을 공급해 줌으로써 연료를 절감할 수 있는 시스템을 구현하여 시험 하였다. 가변속엔진(1100~1800rpm)을 적용한 발전기는 AC전력을 공급하게 되는데 가변속에 따른 전압변동(250~440V), 주파수 변동(34~60Hz)이 발생되어 이를 AFE정류기(AC/DC Converter)를 통해 DC전력(750VDC)으로 공급하도록 구성 하였으며, 가변속 발전기에 따른 부하변동 시험을 위해 직류배전시스템, 부하설비(추진드라이브 및 모터, 부하기), 발전 및 배전시스템을 제어하기 위한 DC-PMS(Power Management System) 적용하여 Fig. 1과 같이 테스트베드를 구성 하였다.

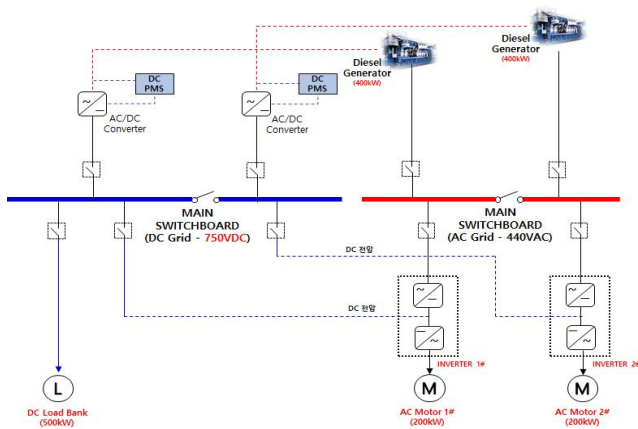


Fig. 1. DC distribution system test bed configuration diagram.

## 2. 직류배전 테스트베드 구성

### 2.1 직류배전 테스트베드 설계 및 제원

#### 가) 디젤발전기(Diesel Generator)

디젤엔진을 원동기로 사용한 발전기를 말하며, 영구자석을 이용한 회전자형 발전장치이며, 이러한 발전기의 엔진속도를 조절하여 가변속에 따른 전력을 공급하도록 구성된 발전기로 정격용량은 440VAC, 400kW, 60Hz로 Fig. 2와 같이 구성 하였다.

#### 나) 정류기(Rectifier, AC/DC Converter)

가변속 디젤발전기에서 공급되는 교류전압(245~440V)을 직류전압(750V)으로 변환하여 전력계통에 공급하는 전력변환장치로서 1차측 240~490VAC, 2차측 750VDC, 용량은 400kW이다.

#### 다) 직류배전반(DC Switch Board)

직류차단기, 직류전압/전류 계측기 등으로 구성된 직류배전반으로 가변속 발전용 정류기, 배터리시스템, 부하장치 등을 연결하도록 Fig. 2와 같이 구성된 배전반이다.



Fig. 2. DC distribution test bed composition equipment (Diesel generator & DC distribution system).

#### 라) 직류 전력관리시스템(DC Power Management System)

디젤발전기의 엔진속도를 제어하고 가변속에 따른 AC전력을 제어하고 이 AC전력을 정류기를 통해 DC전력을 계통에 안정적으로 공급하도록 각 장치들을 모니터링 하고 부하에 따라 직류배전시스템이 안정적으로 운영되도록 관리하는 시스템이다.



Fig. 3. Integrated Power Management System HMI (Human Machine Interface) composition.

#### 마) 통합 전력관리시스템(Integrated Power Management System)

Fig. 3은 발전원(발전기, 배터리시스템 등), 배전시스템 등 각 장치들의 상태 및 전력을 감시 제어하기 위한 시스템이며, 선박의 부하 환경을 모의하여 부하 장치를 운전하고 전력 데이터를 분석하기 위한 시스템이다.

바) 모터 드라이브(VFD : Variable Frequency Driver)

전원 공급의 주파수와 전압을 변환하여 전기모터를 구동하는 모터 제어기로서 1차측 750VDC, 2차측 440VAC, 정격용량 400kW로 구성되어 있다.

사) 유도 전동기(Induction Motor)

고정자가 만드는 회전 자계에 의해 전기 전도체의 회전자에 유도 전류가 발생해서 회전하도록 구성된 모터로 전기추진용 모터를 모의해서 시험하기 위해 구성된 장치이다.

아) 부하 저항기(DC Load Bank)

발전기, ESS 등 전력원들을 시험하기 위해 전기부하를 제공하도록 구성된 저항 성분의 부하장치이며, 440VAC, 1.1MW 용량으로 구성되어 있다.

자) 직류배전 테스트베드

Fig. 4는 테스트베드 구축에 따른 시스템 배치도이다. 동력실에는 발전기, 추진용 모터, 로드뱅크를 구성하였고 전력 시험실은 직류배전시스템을 설치하였고 별도의 제어실에서 시스템 제어 및 모니터링 하도록 구성하였다.

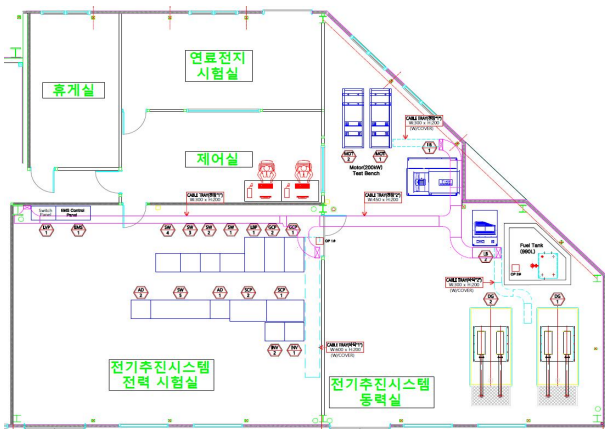


Fig. 4. Test bed layout for DC distribution performance test.

3. 직류배전 출력 모사/성능평가 시험

3.1 출력모사 시험을 위한 부하시나리오 개발

부하시나리오 개발을 위해 4개선종(Shuttle Tanker, LNG carrier, Container, LNG FSRU)을 검토하였고 부하변동이 큰 컨테이너 선박으로 선정하였다. 이 부하시나리오는 선박 운항 시 부하변동성을 분석하여 테스트베드 용량에 맞도록 스케일 조절을 통해 개발하였으며, 두 선종(13k TEU Container, 5,500 TEU Reefer Container)의 보조기기에 대한 부하를 분석

하여 시나리오를 개발하였다. 선박의 선종에 따라 사용되는 부하량이 다르기 때문에 부하 변동 구간의 소요시간과 지속 시간을 고려하여 개발을 진행하였으며 선박의 부하 변동이 심한 입·출항 및 하역 구간에 대해 개발된 Load case를 기반으로 하고, 부하 시나리오를 테스트 베드에 적용하기 위해 디젤발전기의 운전 특성을 파악하여 각 선종별 및 크기별 부하 시나리오를 개발하였다.

3.2 선종별 부하 시나리오

3.2.1 13k TEU Container

13k TEU Container의 Electric load를 분석한 결과, 13k TEU Container의 운항은 Normal seagoing, Port In/Out(w/o thruster), Port In/Out(w/ thruster), Load/Unload, Harboring 운전 모드로 구분할 수 있었다. 테스트 베드 실험 수행을 위해 각 운전 모드의 출력 Scale 조정하였으며 Fig. 5와 같이 13k TEU Container 부하시나리오를 직류배전시스템에 적용하여 정속 발전 & 가변속 발전에 대한 실험 진행을 위해 동력원의 출력모사 시험 조건을 통합 전력관리시스템에 적용하여 구성된 제어 로직에 따라 부하가 모사될 수 있도록 구성하였다.

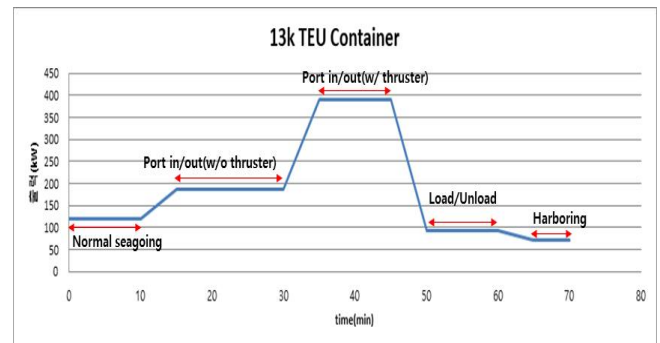


Fig. 5. 13k TEU Container Load Scenario.

3.2.2 5,500 TEU Reefer Container

5,500 TEU Reefer Container의 Electric load를 분석한 결과, 5,500 TEU Reefer Container의 운항은 Normal seagoing(w/o reefer), Normal seagoing(w/ reefer), Port In/Out(w/o thruster), Port In/Out(w/ thruster), Load/Unload의 운전 모드로 구분할 수 있었다. 테스트베드 실험수행을 위해 각 운전 모드의 출력 Scale 조정하였으며 Fig. 6과 같이 5,500 TEU Reefer Container 부하시나리오를 직류배전시스템에 적용하여 정속 발전 & 가변속 발전에 대한 실험 진행을 위해 동력원의 출력모사 시험 조건을 통합 전력관리시스템에 적용하여 구성된 제어 로직에 따라 부하가 모사될 수 있도록 구성하였다.

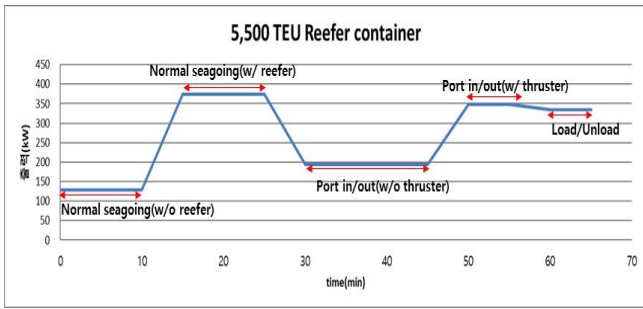


Fig. 6. 5,500 TEU Reefer Container Load Scenario.

### 3.3 가변속 발전기 단계별(100~400kW) 부하변동 시험

Fig. 7은 가변속 발전기가 부하변동에 따른 전압 변동을 확인하기 위해 100~400kW를 100kW 단위로 올리면서 전압 변동률을 확인한 그래프이다. 무부하시 정류기 2차측 전압은 750VDC임을 확인하였고 부하가 서서히 증가함에 따라 전압이 소폭으로 떨어지는 것을 확인하였다. 100kW 부하구간에서 전압은 평균 745V로 약 5V 정도 떨어지는 것을 확인하였으며 200kW 구간은 737V, 300kW 구간은 732V, 400kW 구간은 732V 정도 구간별 전압이 떨어지는 것을 확인하였다. 위 시험을 통해 부하가 증가할수록 전압이 서서히 떨어지는 것을 확인하였으며, 최대전압은 751.5V이고 최소전압은 731.4V가 측정되어 전압변동률은 2.7%로 3% 이내에서 안정적으로 전압이 공급되는 것을 확인하였다.

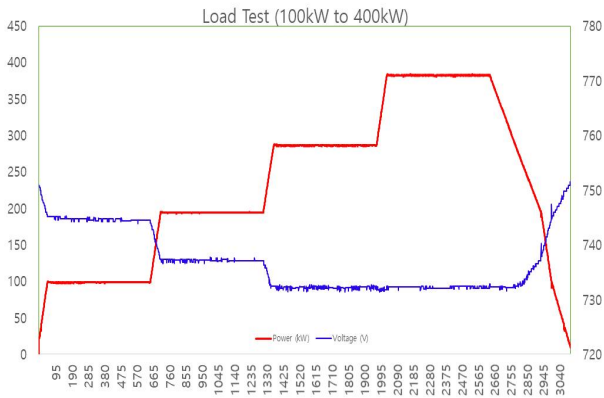


Fig. 7. Voltage variation due to load fluctuations (100~400kW).

Fig. 8은 부하변동시 디젤발전기의 연료소모량을 비교한 시험 결과이다. 발전기의 유량을 측정하기 위해 연료공급라인과 연료회수라인에 각각 유량계를 설치하여 유량값을 측정하였으며 부하는 100~400kW 범위 내에서 100kW씩 단계적으로 올려서 시험하였다. 녹색 부분은 정속발전(1800rpm, 440VAC, 60Hz)시 유량 데이터이며, 보라색 부분은 가변속발전(1200~1800rpm, 270~440VAC)시 유량 데이터를 나타낸다.

100kW 부하구간에서는 정속 발전 대비 가변속 발전이 약 23% 정도 유량이 절감되는 것을 확인하였으며, 300kW 구간에서는 약 9% 정도 절감되는 것을 확인하였다. 이 시험을 통해 부하가 낮을수록 발전기 엔진 속도가 낮아짐에 따라 유량 감소폭이 높게 나타나고 엔진속도가 증가할수록 정속 발전과 비슷해지는 것을 확인하였다.

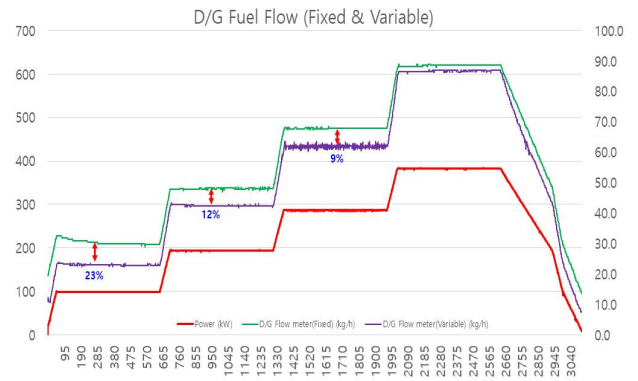


Fig. 8. Comparison of fuel consumption of generators (constant speed & variable speed) load changes.

### 3.4 13k TEU Container 부하변동 시험

Table 1은 앞서 개발된 Load Scenario를 바탕으로 부하를 설정하였으며 기존 선박의 전력소모량 대비 약 5.6%의 비율로 scale 조정을 진행하였다.

Table 1. Load Data (13k TEU Container)

| Time min | Power Load (kW) | Ratio % | Scale down | Pattern Load (kW) | Load Sharing Device |
|----------|-----------------|---------|------------|-------------------|---------------------|
| 0        | 2145.7          | 5.6%    | 120        | 120               | DG                  |
| 10       | 2145.7          | 5.6%    | 120        | 120               | DG                  |
| 15       | 3349.9          | 5.6%    | 188        | 188               | DG                  |
| 30       | 3349.9          | 5.6%    | 188        | 188               | DG                  |
| 35       | 6970.7          | 5.6%    | 390        | 390               | DG                  |
| 45       | 6970.7          | 5.6%    | 390        | 390               | DG                  |
| 50       | 1646.2          | 5.6%    | 92         | 92                | DG                  |
| 60       | 1646.2          | 5.6%    | 92         | 92                | DG                  |
| 65       | 1263.7          | 5.6%    | 71         | 71                | DG                  |
| 70       | 1263.7          | 5.6%    | 71         | 71                | DG                  |

Fig. 9는 13k TEU Container 선박의 Load Scenario를 이용하여 부하변동 시험을 진행한 그래프이다. 부하변동시 디젤발전기의 연료소모량을 비교한 시험 결과를 나타낸다. 부하는 최소 120kW에서 최대 390kW로 부하 가변 범위에 따라 발전



기의 출력이 제어되도록 설정되었다. 녹색 부분은 정속발전(1800rpm, 440VAC, 60Hz)시 유량 데이터이며, 보라색 부분은 가변속발전(1200~1800rpm, 270~440VAC)시 유량 데이터이다. 100kW 부하구간에서는 정속발전 대비 가변속 발전이 약 23%정도 유량이 절감되는 것을 확인하였으며, 300kW 구간에서는 약 9%정도 절감 되는 것을 확인 하였다. 이 시험을 통해 부하가 낮을수록 발전기 엔진속도가 낮아짐에 따라 유량 감소폭이 높게 나타나고 엔진속도가 증가할수록 정속발전과 비슷해지는 것을 확인 하였다.

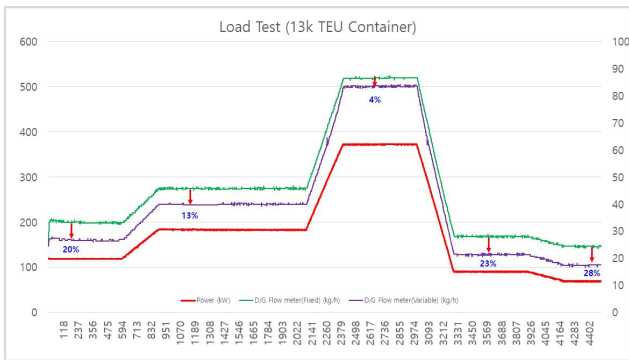


Fig. 9. Comparison of generator fuel consumption according to load change (13k TEU Container).

정속 발전의 경우 약 57.6kg, 가변속 발전의 경우 50.4kg으로 약 7kg의 연료 절감을 확인하였으며, 정속발전 대비 가변속 발전의 연료소모량이 12.5% 절감되는 것을 확인하였다.

### 3.5 5,500 TEU Reefer Container 부하변동 시험

Table 2는 앞서 개발된 Load Scenario를 바탕으로 부하를 설정하였으며, 기존 선박의 전력소모량 대비 약 9%의 비율로 scale 조정을 진행하였다.

Table 2. Load Data (5500 TEU Reefer Container)

| Time min | Power Load (kW) | Ratio % | Scale down | Pattern Load (kW) | Load Sharing Device |
|----------|-----------------|---------|------------|-------------------|---------------------|
| 0        | 1423.7          | 9.0%    | 128        | 128               | DG                  |
| 10       | 1423.7          | 9.0%    | 128        | 128               | DG                  |
| 15       | 4153.7          | 9.0%    | 374        | 374               | DG                  |
| 25       | 4153.7          | 9.0%    | 374        | 374               | DG                  |
| 30       | 2148.1          | 9.0%    | 193        | 193               | DG                  |
| 45       | 2148.1          | 9.0%    | 193        | 193               | DG                  |
| 50       | 3860.4          | 9.0%    | 347        | 347               | DG                  |
| 55       | 3860.4          | 9.0%    | 347        | 347               | DG                  |
| 60       | 3714.6          | 9.0%    | 334        | 334               | DG                  |
| 65       | 3714.6          | 9.0%    | 334        | 334               | DG                  |

Fig. 10은 5500 TEU Reefer Container 선박의 Load Scenario를 이용하여 부하변동 시험을 진행한 그래프이다. 부하변동시 디젤발전기의 연료소모량을 비교한 시험 결과를 나타낸다. 부하는 최소 128kW에서 최대 374kW로 부하 가변 범위에 따라 발전기의 출력이 제어되도록 설정 되었다. 보라색 부분은 정속발전(1800rpm, 440VAC, 60Hz)시 유량 데이터이며, 녹색 부분은 가변속발전(1200~1800rpm, 270~440VAC)시 유량 데이터이다. 128kW 부하 구간에서는 정속 발전 대비 가변속 발전이 약 20% 정도 유량이 절감되는 것을 확인하였으며, 374kW 구간에서는 약 5%, 193kW 구간에서는 13%, 347kW 구간에서는 7%, 334kW 구간에서는 8% 정도 절감 되는 것을 확인하였다. 이 시험을 통해 부하가 낮을수록 발전기 엔진속도가 낮아짐에 따라 유량 감소폭이 높게 나타나고 엔진속도가 증가할수록 정속발전과 비슷해지는 것을 확인하였다.

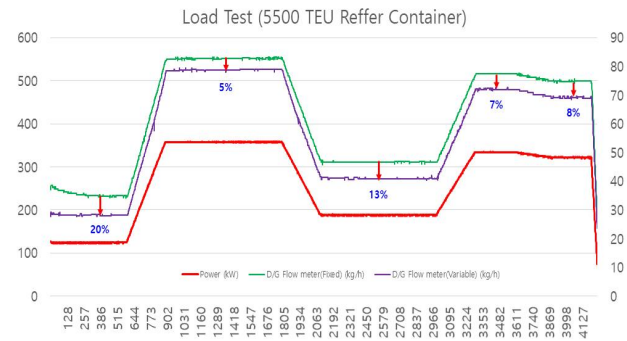


Fig. 10. Comparison of generator fuel consumption according to load change (5500 TEU Reefer Container).

정속 발전의 경우 약 73.4kg, 가변속 발전의 경우 66.8kg으로 약 6.5kg의 연료 절감을 확인하였으며, 정속 발전 대비 가변속 발전의 연료소모량이 8.9% 절감되는 것을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서 구축하여 시험을 진행한 직류배전시스템 테스트베드는 기존 선박에서 사용하고 있는 교류전력계통의 발전시스템(정속발전, 440VAC/60Hz 고정)을 직류배전용 발전시스템(가변속 발전, 245~440VAC/34~60Hz 가변)으로 구성 하였으며, 직류배전시스템은 가변속발전기, 정류기(AC/DC Converter)를 이용하여 교류전력을 직류전력으로 변환후 전력계통에 공급해 주도록 구성하여 부하변동에 따른 특성을 시험 하였고 아래와 같은 결과를 도출하였다.

1) 가변속 발전시스템을 이용한 부하변동 시험시 부하에 따른 전압변동률을 확인한 결과 부하가 증가할수록 출력 전

압(DC)이 낮아지는 것을 확인하였으며, 최대 전압은 751.5V 이고 최소전압은 731.4V가 측정되어 전압변동률은 2.7%로 3% 이내에서 안정적으로 전압이 공급되는 것을 확인하였다.

2) 동일 시험을 통해 부하변동에 따른 발전기의 연료소모량을 측정하였으며, 부하변동 구간별로 100kW 미만에서는 23% 이상의 높은 연료 절감률을 보였지만 300kW 구간에서는 9%, 400kW 미만 구간에서는 4% 정도의 연료절감률을 확인하였다. 부하량이 증가할수록 정속발전 기준인 1800rpm에 가까워짐에 따라 연료절감률은 낮아질 수밖에 없어 발전기의 엔진속도가 낮고 부하량이 적을수록 연료절감률은 높게 나타나는 것을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서는 구간별로 연료절감률은 다르지만 최대 23% 이상 연료절감이 가능하고, 한 사이클을 운전 하였을 때 정속발전기를 활용할 때 보다 가변속 발전기를 적용 하였을 때 약 5%정도 에너지 절감이 가능한 것으로 확인하였다. 이러한 결과를 통해 부하변동성이 큰 선박의 추진이나 보기류에 적용되는 발전원에 이러한 가변속발전시스템을 적용하게 되면 연료절감 및 선박의 배기가스 배출물질도 낮출 수 있을거라 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20210369, 전기복합추진어선 핵심 기자재 기술개발)

## References

- [1] Park, K. D.(2019), A Study on Variable Speed Generation System for Application to DC Distribution Ship.

---

Received : 2023. 08. 23.

Revised : 2023. 09. 14.

Accepted : 2023. 10. 27.