



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

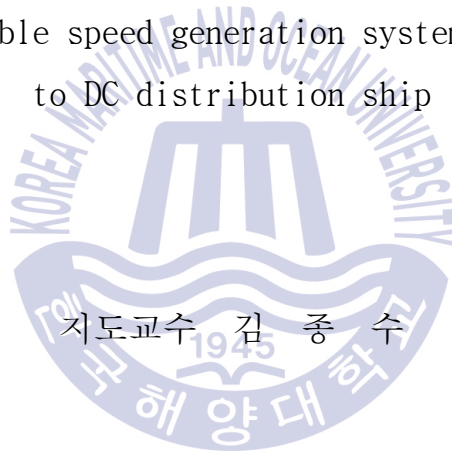
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

직류배전 선박 적용을 위한 가변속
발전시스템에 관한 연구

A Study on variable speed generation system for application
to DC distribution ship



2019年 2月

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

박 기 도

본 논문을 박기도의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 김 성 환 (인)

위 원 : 김 종 수 (인)

위 원 : 오 세 진 (인)



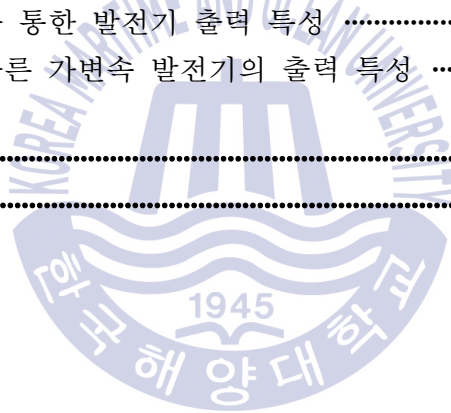
2018년 12월 26일

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
용어설명	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	2
1.3 논문의 구성	3
제 2 장 선박용 발전 시스템	4
2.1 선박용 디젤발전기	4
2.2 동기발전기의 구조 및 원리	4
2.3 동기발전기의 종류	8
2.4 동기발전기의 특성	12
제 3 장 선박의 직류배전시스템	14
3.1 직류배전시스템	14
3.2 선박용 직류배전시스템의 구성	15
3.2.1 가변속 디젤 발전기	17
3.2.2 전력변환장치	18
제 4 장 가변속 발전시스템	20
4.1 가변속 엔진	20
4.1.1 가변속 엔진의 운전 특성	20
4.1.2 가변속 엔진 발전기 교류 여자시스템	20
4.2 가변속 발전기	22

제 5 장 가변속 엔진발전기 실험 결과	23
5.1 실험장비 구성	23
5.1.1 가변속 엔진	24
5.1.2 발전기	25
5.1.3 발전기 제어기	25
5.1.4 가버너	26
5.1.5 AVR	27
5.1.6 전력관리장치(PMS)	29
5.1.7 부하 인가장치(Load Bank)	30
5.1.8 전력 분석계(Power Analyzer)	31
5.2 실험 및 실험 결과	32
5.2.1 가변속 엔진속도에 따른 전압변동 특성	32
5.2.2 엔진 가변속을 통한 발전기 출력 특성	33
5.2.3 부하변동에 따른 가변속 발전기의 출력 특성	40
제 6 장 결론	45
참고문헌	47



List of Tables

- Table 3.1** Comparison of AC grid system and DC grid systems
- Table 5.1** List of experimental equipment
- Table 5.2** Alternator Specifications
- Table 5.3** Generator Controller Specifications
- Table 5.4** Governor Specifications
- Table 5.5** AVR Specifications
- Table 5.6** Output voltage according to generator speed
- Table 5.7** Load Bank Specifications
- Table 5.8** Voltage and frequency variations (Source: KR Rule)



List of Figures

- Fig 2.1 Electric steel plate punched with armature core
- Fig 2.2 Stator type rotor
- Fig 2.3 Cylinder type rotor
- Fig 2.4 Principle of alternator and Generation of AC electromotive force
- Fig 2.5 Rotating electrical type(a), Rotary type alternator(b), Waveform of electromotive force(c)
- Fig 2.6 3Phase alternator
- Fig 2.7 Rotor type of alternator
- Fig 2.8 Alternator excitation method
- Fig 2.9 Self excited AC generator
- Fig 2.10 No-load saturation curve of synchronous generator and three-phase short-circuit curve
- Fig 3.1 DC grid system of the ship
- Fig 3.2 Comparison of AC grid system and DC grid systems
- Fig 3.3 Diesel Generator Speed and Power Consumption (Source: E-MS)
- Fig 3.4 Alternator & Variable speed engine
- Fig 3.5 Fuel consumption rate by load(AC and DC system), (Source: ABB)
- Fig 3.6 Block diagram of DFE topology
- Fig 3.7 Block diagram of AFE topology
- Fig 4.1 Principle of fixed speed generator and Principle of variable speed generator
- Fig 4.1 Power system diagram of DC distribution system
- Fig 5.1 Configuration diagram of adjustable variable speed generator
- Fig 5.2 Variable speed engine
- Fig 5.3 Generator Controller
- Fig 5.4 Governor
- Fig 5.5 AVR

- Fig 5.6 PMS & Potentiometer(Left), AVR of Diesel generator(Right)
- Fig 5.7 PMS(Left) & Schematic Diagram of Potentiometer(Right)
- Fig 5.8 Load Bank
- Fig 5.9 Power Quality Analyzer(FLUKE 430- II)
- Fig 5.10 Characteristics of voltage and frequency fluctuation according to engine speed
- Fig 5.11 Generator output voltage & current) (1100rpm)
- Fig 5.12 Generator output voltage & current (1300rpm)
- Fig 5.13 Generator output voltage & current (1500rpm)
- Fig 5.14 Generator output voltage & current (1700rpm)
- Fig 5.15 Generator output voltage & current (1800rpm)
- Fig 5.16 Generator output voltage, current characteristics at load change
- Fig 5.17 Generator output frequency characteristics at load change
- Fig 5.18 Generator output voltage, current, frequency(1100rpm)
- Fig 5.19 Generator output voltage, current, frequency(1300rpm)
- Fig 5.20 Generator output voltage, current, frequency(1500rpm)
- Fig 5.21 Generator output voltage, current, frequency(1700rpm)
- Fig 5.22 Generator output voltage, current, frequency(1800rpm)

A Study on variable speed generation system for application to DC distribution ship

Ki-do, Park

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Environmental problems and energy saving measures are required at internal and external, and studies are being conducted to apply a DC distribution system to ships.

In this paper, to demonstrate the effectiveness of the DC power generator, we have developed a DC power generator system using a diesel engine generator, a generator controller, a governor, and an AVR.

The output range of the variable-speed generator for the experiment is set to 60 ~ 100% of the rated value based on the load power consumption for general generator output in the ship. Accordingly, the operation speed range of the generator engine is from 1,100 to 1,800 [rpm], and the voltage and frequency fluctuation ranges from 250 to 440 [V] and 34 to 60 [Hz].

It was confirmed that the output voltage, current, frequency and power of the generator follow the target value stably by varying the engine speed of the generator according to the load variation of the variable-speed generator.

KEY WORDS: Variable speed generator, AFE Rectifier, DC distribution, Digital governor, PMS(Power Management System)

직류배전 선박 적용을 위한 가변속 발전시스템에 관한 연구

박 기 도

한국해양대학교 대학원
기관시스템공학과

요 약

국내외적으로 부각되고 있는 환경문제 및 에너지 절감 대책의 일환으로 직류 배전시스템을 선박에 적용하려는 연구 및 실증이 활발히 수행되고 있다. 직류 배전시스템에서는 가변속 엔진 발전기를 이용하여 선박에서 필요한 부하에 따라 발전기의 엔진 속도를 가변하므로써 연료 소모량을 절감할 수 있는 방안이 연구되고 있다.

본 논문에서는 직류배전용 가변속 발전기의 유효성을 입증하기 위하여, 디젤 엔진 발전기와 발전기 제어기, 가버너, AVR을 이용하여 직류배전용 가변속 발전기 시스템을 제작 하였으며, 발전기의 시스템 구성 방법과 부하변동에 따른 가변속 발전기의 전압, 주파수, 전력변동 특성을 실험하고 그 결과를 분석하였다.

실험을 위한 가변속 발전기의 출력 범위는 선박에서의 일반적인 발전기 출력에 대한 부하전력 사용량을 기준으로 하여 정격의 60~100%로 설정하였으며, 그에 따른 발전기 엔진의 운전속도 범위를 1,100~1,800[rpm]이며, 전압 및 주파수의 변동 범위는 250~440[V]과 34~60[Hz]이 된다. 가변속 엔진 발전기의 부하변동에 따라 발전기의 엔진속도를 가변함으로써 발전기의 출력 전압, 전류, 주파수 및 전력이 안정적으로 목표값에 추종되는 것을 확인하였다.

KEY WORDS: 가변속 발전기, AFE 정류기, 직류배전, 디지털 가버너, 전력관리장치

용어설명

가변속 발전기	발전기 엔진의 속도를 조절해서 전압과 주파수가 엔진속도에 따라 변동되는 발전기
가버너	엔진에 공급되는 연료를 조절해주는 장치로서, 발전기 속도를 일정하게 제어하는 장치
PMS	선박의 전력시스템을 제어 및 감시하는 장치
AVR	발전기의 전압을 일정하게 유지해 주는 장치
Load Bank	발전기 및 동력장치들의 부하시험을 위한 장치



제 1 장 서론

1.1 연구배경

유류비의 상승과 선박 대기오염 규제로 인해 선주사 및 조선소에서는 선박의 에너지 사용 및 비용절감을 위한 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 전문위원회 중 하나인 해양환경보전위원회(Marine Environmental Protection Committee, MEPC) 57차 회의(2008)를 시작으로 선박의 탄소가스 규제 방안을 본격적으로 논의 하였으며, 그 결과 2013년부터 에너지효율 설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI) 규제가 시행이 되고 2015년부터 현행 대비 10% 감축, 2020년 20% 감축, 2025년 30% 감축 등 5년 간격으로 강화될 예정이다.

2015년부터 강화되고 있는 EEDI 규제 및 시장기반규제(Market Based Mechanism, MBM)의 실행이 결정된다면 선주들은 EEDI 규제 기준을 넘어서는 더욱 고효율화 된 선박을 요구할 것으로 예상된다. 이는 결과적으로 고연비 선박을 개발하는 조선소는 비싼 가격에 다량의 선박을 판매할 수 있겠지만 이에 대한 대비가 부족하면 기존 시장에서의 평판이나 입지와 무관하게 도태될 가능성이 크기 때문에 세계 조선업계에서는 Green Ship 개발에 대한 관심이 크게 증가 하였으며, 본 연구를 통해 제안하고자 하는 선박용 DC(Direct Current) Micro Grid 개발은 일부 선진기업의 사례 및 해외연구결과에 따라 고연비의 선박을 실현하는 매우 혁신적인 기술로 분석 되고 있다.

이러한 기술은 ABB, Siemens 등의 다국적 기업과 미국, 유럽, 일본을 중심으로 전기추진 시스템관련 기술의 개발과 사업화가 활발히 진행되고 있으며, 특히 ABB社에서는 Onboard DC Grid 시스템을 적용하여, Single DC circuit 배전 방식을 적용하여 기존 AC 전력시스템 대비 안전성 및 신뢰성이 우수할 뿐만 아니라 선박 연료소비량 27% 감소, 30%이상의 소음감소, 연료효율성 및 배출가스 저감등 에너지 효율 및 친환경 효과도 큰 것으로 발표하였고, Siemens社는 DC Grid 시스템인 Blue Drive PlusC를 적용하여, 장치의 부피 및 무게 절감, 에

너지의 저장 및 효율 향상, 설치의 용이성, 추진기 이중화를 실현하는등 다양한 형태로 실증이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 기존 선박 및 발전원으로 많이 사용되고 있는 디젤발전기를 이용하여 직류배전시스템에 전력을 공급하는 가변속 발전기로 개발하고자 하며, 발전기의 엔진속도를 제어해줌으로써 엔진에 공급되는 연료소모량을 줄이고자 한다.

개발하고자 하는 가변속 발전기는 부하 변동에 따라 엔진의 속도를 가변하여 전압, 전류, 주파수 및 출력이 안정적으로 목표값을 추종할 수 있는지를 확인하기 위하여 시스템 구축 및 실험(제어 및 전기적 출력특성)을 진행 하였다.

1.2 연구내용

현재 대부분의 선박 전력계통시스템은 교류 기반으로 구성되어 있으며, 발전기에서 생산되는 교류전력을 배전시스템을 거쳐 교류측 부하전원에 전력이 공급되는 구조를 가지고 있다. 기존 교류의 배전계통에서는 발전기의 전압과 주파수를 일정하게 하기 위하여 엔진을 정속으로 운전하기 때문에 저부하 운전시에는 연료소모량이 많아지는 단점이 있다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서 가변속 발전시스템의 적용을 통한 유효성을 입증해 보고자 하였다. 이 시스템을 적용하기 위해서는 엔진의 가변속 범위에 따라 전압이 변동되기 때문에 교류배전계통에서의 사용이 곤란하므로 가변속 발전기의 출력 전압을 직류로 변환하여, 선박의 부하에 공급하는 직류배전계통으로 구축 한다.

본 논문에서는 가변속 발전기의 전력특성을 시험하기 위해 테스트베드를 구축 하였으며, 가변속 엔진, 발전기, 가버너, AVR, PMS 등을 제작하여 구성하였다. 가변속 발전시스템의 성능 테스트를 위한 운전환경 설정에 있어서는 선박에서 일반적으로 운전하는 부하상태인 발전기 정격의 60~100[%]로 설정하여 엔진속도, 발전기 출력전압, 전류, 주파수 및 전력 특성에 대하여 실험을 통해 분석 한다.

성능 실험은 부하에 따라 발전기의 엔진속도를 1100~1800[rpm] 구간에서 100[rpm] 간격으로 단계적으로 조정 하면서 전압 및 주파수 변동 특성을 확인 하였고, 부하변동시 전압, 주파수가 일정한 범위내에서 안정적으로 운전되는 것을 확인 하였다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다

1장 서론에서는 연구배경, 내용 및 논문의 구성에 대해 기술하고,

2장에서는 선박의 직류배전시스템의 개념 및 각 부 구성에 대해 설명하였다.

3장에서는 직류배전을 위한 선박용 발전 시스템(즉, 가변속 발전기 및 정류기)의 원리 및 구조, 특징 등을 상술하였으며,

4장에서는 본 논문에서 제안하는 직류배전용 가변속 발전시스템의 시스템 구성에 대하여 제시하였다.

5장에서는 제안하는 가변속 발전시스템의 엔진, 발전기, 발전기 제어기, 가버너, AVR 및 PMS(전력관리장치)에 대한 특성과 제작 및 시스템 구성에 대하여 기술 하였으며, 부하변화에 따라 엔진속도를 가변함으로서 발전기의 출력 전압, 전류, 주파수 및 전력 추종 성능 결과를 제시하였다.

6장에서는 가변속 발전시스템의 개발 내용과 직류배전 선박에 적용하기 위한 연구결과를 분석 및 평가 하였으며, 향후 과제의 방향에 대하여 언급하였다.

제 2 장 선박용 발전 시스템

2.1 선박용 디젤발전기

발전기는 기계 에너지를 전기 에너지로 변환하는 장치로써 현재 설치되어 있는 대부분의 선박용 디젤엔진 발전기는 부하 환경과 무관하게 일정 속도로 운전한다. 발전기의 디젤 엔진을 제어하는 조속기는 선내 부하의 변동이 발생하여도 여기에 대응하는 연료유 양만을 가감하여 기관의 회전속도를 일정한 속도로 유지하는 장치이며, AC 부하에 대응하여 고정 주파수와 정전압 교류 전원을 발전하기 위해서 일정 속도로 운전한다.

2.2 동기발전기의 구조 및 원리

1) 동기발전기의 구조

(가) 고정자

고정자 프레임은 전기자 철심을 지지하고 기계 전체를 보호하며 자로를 형성하기 때문에 투자율이 높고 강한 재료를 사용할 필요가 있다. 그러므로 주철이나 연강판을 용접하여 조립하고, 그 프레임의 내주에 고정자 철심을 끼운다. 고정자 철심은 와전류 손실을 감소시키기 위해서 0.35 ~ 0.5[mm]의 규소강판을 Fig 2.1과 같이 부채모양으로 편칭한 것을 적층하여 조립한다.

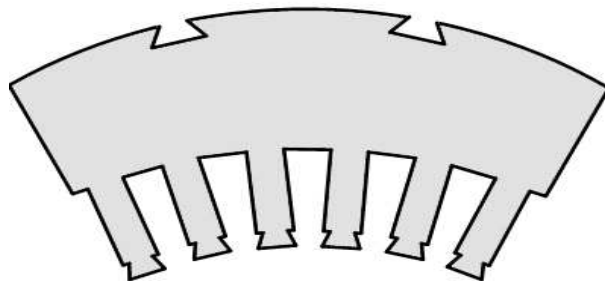


Fig 2.1 Electric steel plate punched with armature core

(나) 회전자

회전자는 돌극형과 원통형으로 대별되는데 돌극형은 디젤 발전기, 수차 발전기 등의 저속 발전기에 사용되고 원통형은 고속으로 원심력이 큰 터빈 발전기 및 고속 디젤 발전기에 사용된다.

(다) 돌극형 회전자

저속 발전기의 회전자는 단강으로 만든 축에 플라이 휠 모양의 단강 또는 주강제의 스파이더를 키로 고정시키고 스파이더에 계자환을 끼운다. 계철은 주강으로 만들고 그 외주에 계자철심이 더브테일 또는 볼트에 의해서 견고하게 부착된다.

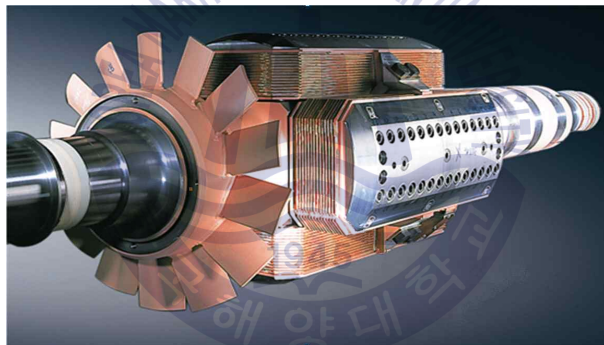


Fig 2.2 Stator type rotor

(라) 원통형 회전자

고속 터빈 발전기는 원심력과 풍손이 크기 때문에 원통형 회전자가 사용된다. 원통형 회전자의 일반적인 구조는 니켈, 크롬을 단조하여 주축과 계자철심을 단일체로 만들고 그 주위에 방사상으로 홈을 가공하며 이 홈에 계자권선을 설치한다. 홈의 입구에는 계자권선이 원심력에 의해 이탈되는 것을 방지하기 위하여 비자성체 금속으로 만든 썸을 끼운다.

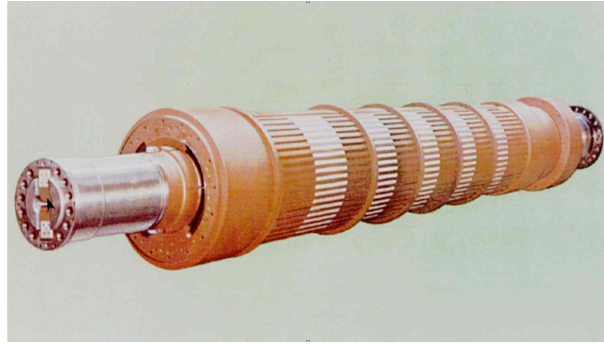


Fig 2.3 Cylinder type rotor

2) 동기발전기의 원리

전압의 주파수와 회전기계의 극수만으로 결정되는 회전속도를 동기속도라 하고 동기속도로 회전하는 발전기를 동기발전기라고 한다. Fig 2.4 (a)와 같이 일정 자계 내에서 코일 $abcd$ 가 화살표 방향으로 회전하고 있다고 가정하면 코일변 ab 및 cd 에는 코일이 반회전할 때마다 그 방향과 크기가 주기적으로 변화하는 기전력 e 가 유도되고 코일의 양단 a 와 c 사이에는 이 기전력의 합이 전압으로 나타난다. 따라서 코일 a 와 c 를 슬립링 s 및 이것에 접촉하고 있는 브러시 b 에 의해서 외부부하 R 에 연결하면 R 에는 크기와 방향이 주기적으로 변화하는 교류전압이 연속적으로 공급되고 이 전압에 의해 R 에는 교류전류가 흐르게 된다.

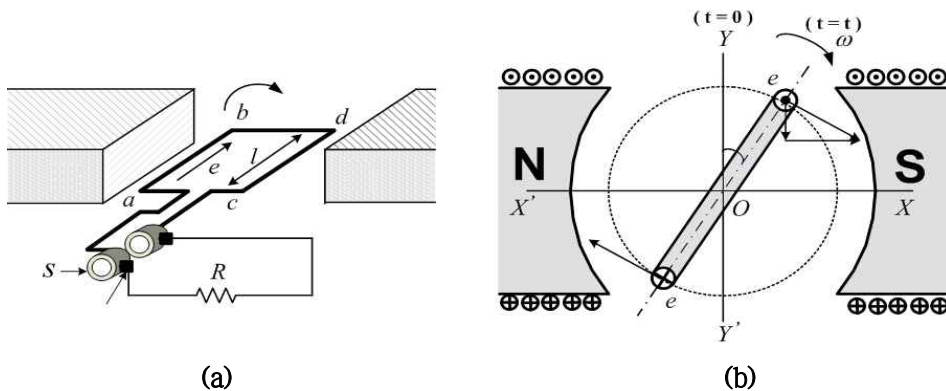


Fig 2.4 Principle of alternator and Generation of AC electromotive force

Fig 2.4 (a)와 같은 교류발전기를 단면도로 나타내면 Fig 2.4 (b)와 같게 되는데 이 그림에서 N, S 자극 사이의 자속밀도를 $B[T]$, 코일 반경을 $r[m]$, 코일변의 유효길이를 $l[m]$ 라 하고 코일이 YOY' 축을 기점($t=0$)으로 하여 일정각속도 $\omega[\text{rad/s}]$ 로 회전하고 있다고 하면 코일이 기점을 지난 t 초 후에 있어서의 코일변의 선속도를 $v[m/s]$ 라 할 때 자속과 직각방향의 속도 성분 $v' = v \sin\omega t$ 가 되고 또 $v = r\omega$ 이므로 각 도체에 유도되는 기전력 e 는 다음 식과 같다.

$$e = Blv' = Blv \sin\omega t = Blr\omega \sin\omega t [V] \quad (2.1.1)$$

코일의 권수가 N 일 경우 그림 (a)의 브러시 사이에는 다음과 같은 전압 e_t 가 발생한다.

$$e_t = 2Ne = 2NBlr\omega \sin\omega t = \omega N\Phi_m \sin\omega t = E_m \sin\omega t \quad (2.1.2)$$

단, $\Phi_m = 2Blr$ 은 코일이 기점 YOY' 축에 있을 때 코일을 관통하는 자속수이고 $E_m = \omega N\Phi_m$ 은 코일에 유도되는 기전력의 최대치이다.

식 2.1.2에서 알 수 있듯이 교류발전기가 발생하는 기전력은 E_m 을 최대값으로 하는 정현파 기전력이고 시간에 따라서 그 크기와 방향이 주기적으로 변화하며 이 기전력은 자속과 도체와의 상대운동에 의해 유도되므로 Fig 2.5 (a)와 같이 전기자 코일이 회전하여 자속을 절단하거나 Fig 2.5 (b)와 같이 전기자 코일은 고정되어 있고 그 내부를 자속이 회전하여도 도체가 자속을 절단하는 것에는 하등의 차이가 없다. 전자와 같은 형식의 발전기를 회전전자형 교류발전기라 하고 후자와 같은 형식의 발전기를 회전계자형 교류발전기라고 하는데 그 유도기전력의 파형은 Fig 2.5 (c)와 같이 모두 정현파가 된다.

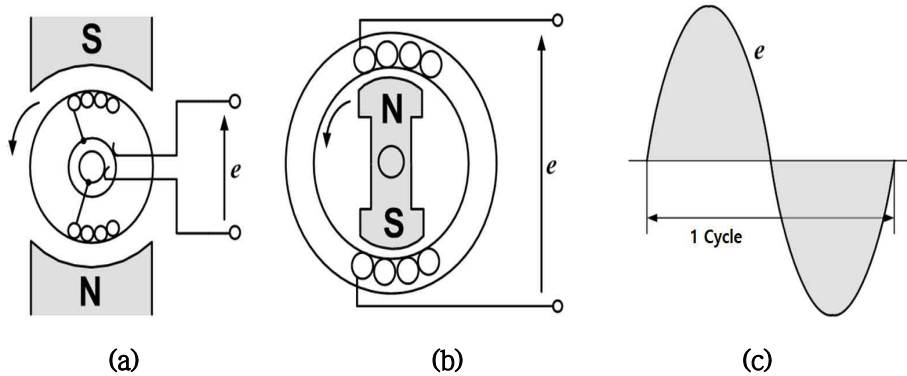


Fig 2.5 Rotating electrical type(a), Rotary type alternator(b), Waveform of electromotive force(c)

3상 교류를 얻기 위해서는 Fig 2.6 (a)와 같이 고정자에 공간적으로 120° 의 간격을 두고 3개의 코일 a, b, c 를 결선하면 되는데 3상의 각 코일에 유도되는 기전력 e_a, e_b, e_c 는 Fig 2.6 (b)와 같이 된다.

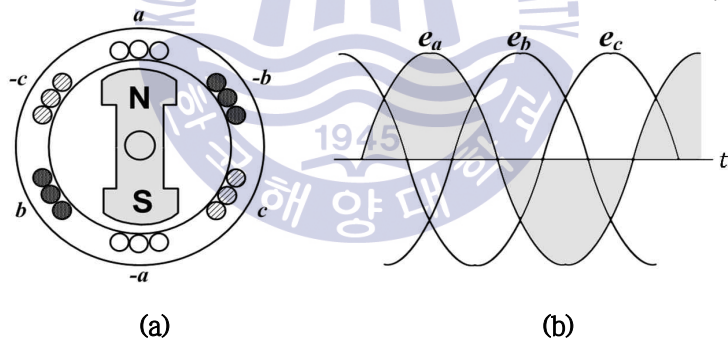


Fig 2.6 Three Phase alternator

2.3 동기발전기의 종류

1) 회전자의 형식에 의한 분류

(가) 회전계자형 교류발전기

이 형식의 교류발전기는 Fig 2.7 (a)와 같이 고정 전기자의 안쪽을 계자가

회전하는 형식이며 계자권선의 각 단자는 각각 슬립링에 연결되고 그 위에 접촉되어 있는 브러시를 거쳐서 바깥의 직류전원으로부터 계자권선에 여자 전류를 공급하도록 되어 있다. 전기자는 고정되어 있으므로 전기자 권선은 원심력을 받지 않고 충분한 절연을 할 수 있으며 기계적인 손상을 받지 않으므로 고전압용으로 적합하다. 또한, 전기자 전류는 슬립링을 거치지 않고 정지하고 있는 전기자 단자로부터 직접 외부회로에 의해 공급할 수 있으므로 대전류용으로도 적합하다. 회전자(계자)는 전기자보다 구조가 간단하므로 고속용으로도 충분히 견고하게 제작할 수 있고 여자전류를 공급하기 위해서 슬립링이 필요하나 이것은 교류 출력전압에 관계없이 여자전압이 직류 440[V] 이하이므로 절연문제도 생기지 않는다. 그러므로 회전계자형 발전기는 고전압 대용량의 발전기에 널리 사용된다.

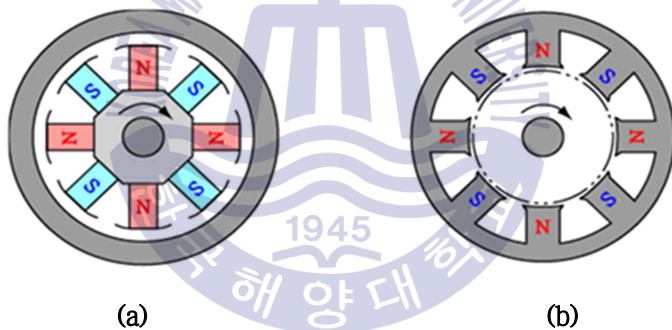


Fig 2.7 Rotor type of alternator

(나) 회전전기자형 교류발전기

이 형식의 발전기는 Fig 2.7 (b)와 같이 고정계자의 안쪽을 전기자가 회전하는 형식으로서 그 구조가 직류발전기와 거의 같으며 다른 것은 정류자 대신에 슬립링이 있다는 것이다. 이 형식은 10[kVA] 이하의 저압, 소용량 발전기에 사용되며 대용량의 발전기에는 사용되지 않는다. 그 이유는 발생전력을 외부로 공급하기 위해 상수와 같은 수의 슬립링을 필요로 하는데 이것은 어느 정도 이상의 고전압, 대전류에는 적합하지 않기 때문이다.

또한, 회전자는 고속에서 회전자에 가해지는 원심력을 충분히 견디도록

설계되어야 하는데 계자보다 전기자를 견고하게 제작하는 것이 어렵다.

2) 원동기의 종류에 의한 분류

(가) 디젤 발전기

내연기관을 원동기로 사용하며 보통 150~900[rpm] 정도의 저속이므로 발전기는 48~8극의 다극발전기가 된다.

(나) 터빈 발전기

증기터빈이 원동기로 운전되는 것으로서 1800~3600[rpm]의 고속이므로 발전기는 4~2극의 고속발전기가 된다.

(다) 수차 발전기

수차에 의해서 운전되는 수력 발전기로서 회전속도는 보통 200~1000[rpm] 정도인데 매분 수회전하는 것도 있다.

3) 여자방식에 의한 분류

(가) 직류여자기 부착 교류발전기

교류발전기에 여자전류를 공급하기 위해 사용되는 소용량의 직류발전기나 교류발전기를 여자기라고 한다. Fig 2.8 (a)는 여자기로서 소용량의 직류발전기를 주발전기 축과 직결한 것으로 이것을 직류여자기 부착 교류발전기라고 하는데 이 발전기와 같이 자체 발전 전력과 별개의 전원에서 여자전류의 공급을 받고 있는 발전기를 타력발전기라고 한다. 직류여자기 부착 발전기는 발전기의 부하변화에 따라 원동기의 속도변동의 영향을 직접 받게 되므로 여자전압의 변화로 인해 발전기의 전압변동이 커지며, 또 저속 발전기의 경우에는 여자기도 저속이 되어 필요한 여자전압을 얻기 위해서는 한 극당 자속과 자극수를 증가해야 하므로 여자기의 부피가 커져서 철손증가 등에 의한 효율저하를 초래하게 되는 등의 결점이 있다. 또한, 정류자와 브러시로 인한 수리가 번거롭고 부하변화로 인한 전압변동이 심하며 AVR을 병용하여도 전압조정에 대한 응답속도가 늦는 등 여러 가지 단점 때문에 현재 이 발전기는 거의 사용되지 않고 있다.

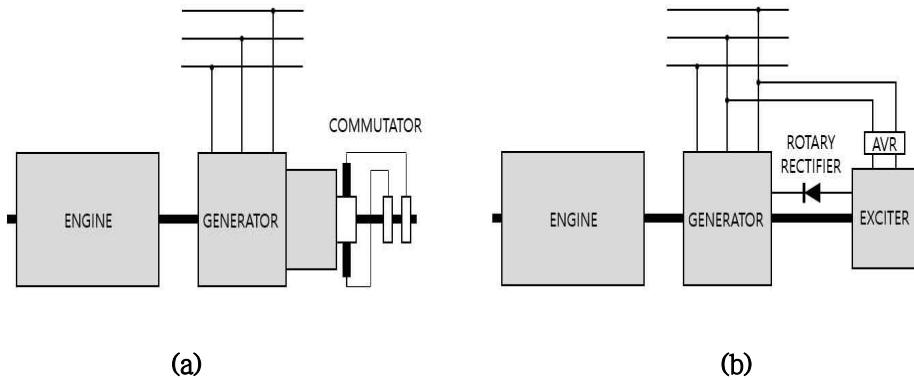


Fig 2.8 Alternator excitation method

(나) 브러시리스 교류발전기

Fig 2.8 (b)와 같이 회전전기자형 교류발전기를 여자기로서 주발전기의 축에 직결하고 여자기의 회전자에 발생한 교류전력을 회전축에 설치한 정류기에 의해 직류를 주발전기의 계자에 공급해주는 발전기로서 슬립링이나 브러시가 없으므로 브러시리스 교류발전기라고 한다. 이 발전기는 정류자와 슬립링으로 인해 발생하는 기계적, 전기적 사고가 없고 브러시의 마찰 분말에 의해 발전기가 오손되는 일이 없으므로 운전에 대한 신뢰성이 향상되며 정류자, 브러시, 슬립링 및 부속장치가 불필요하기 때문에 경제적이고 유지보수가 용이한 장점이 있다. 이 발전기는 수리가 거의 불필요한 장점이 있기 때문에 현재 널리 사용된다.

(다) 자려 교류발전기

동기발전기 발생전력의 일부를 Fig 2.9와 같이 반도체 정류기에 의해서 정류하여 이것을 동기발전기의 계자권선에 공급해 주는 발전기를 자려 교류발전기라고 한다. 이 발전기는 타려 교류발전기에 있어서의 회전 여자기를 정지 여자장치로 대체한 것으로 전압 변동률이 작은 장점이 있다.

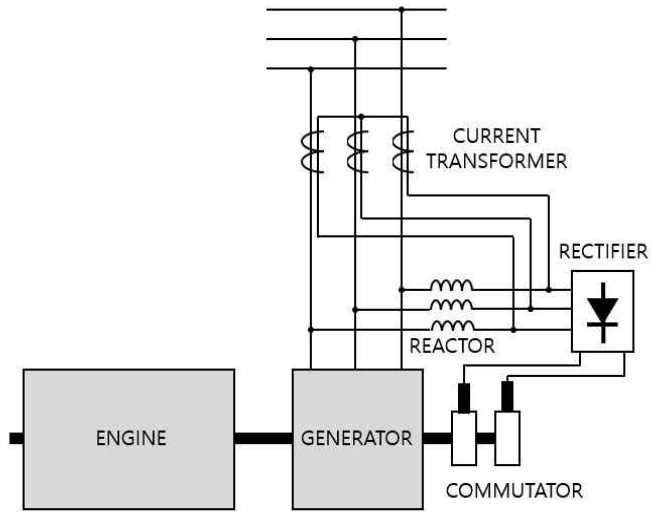


Fig 2.9 Self excited AC generator

2.4 동기발전기의 특성

1) 무부하 포화곡선

동기발전기를 정격속도로 운전하고 무부하 상태에서 계자전류를 증가시키면서 단자전압을 측정하여 양자의 관계를 Fig 2.10의 OA와 같은 곡선으로 나타낸 것을 무부하 포화곡선 또는 개로 특성곡선이라고 한다.

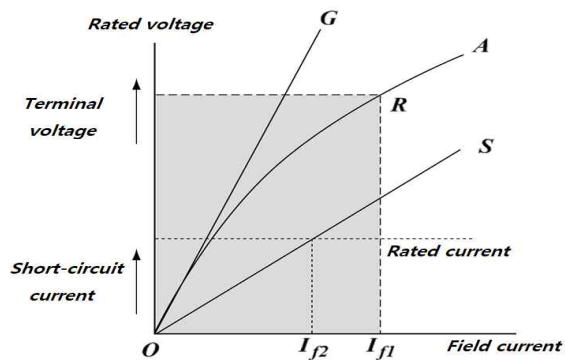


Fig 2.10 No-load saturation curve of synchronous generator and three-phase short-circuit curve

무부하 포화곡선의 직선부분을 연장한 선 OG 를 공극선이라 하고 좌표축의 종축, 공극선 및 무부하 포화곡선상의 정격전압에 해당하는 점을 각각 P, Q, R 로 할 때 식 2.3은 포화의 정도를 나타내는 것으로 이것을 포화율이라고 한다.

$$\sigma = \frac{QR}{PQ} \quad (2.3)$$

2) 단락특성곡선

정격속도로 운전되고 있는 동기발전기의 단자 사이를 전류계를 거쳐서 단락시키고 계자전류를 증가시키면서 단락전류를 측정하여 단락전류 I 와 계자전류 I_f 와의 관계를 Fig 2.10의 OS 와 같은 곡선으로 표시한 것을 단락 특성곡선이라 하고 특히 3상 단락시의 곡선을 3상 단락 특성곡선이라고 한다.

3) 단락비

무부하 상태에서 정격전압을 발생시키기 위한 계자전류 I_{f1} 과 3상 단락상태에서 정격전류가 통하기 위한 계자전류 I_{f2} 와의 비를 단락비라고 한다. 단락비가 크다는 것은 자속수가 크다는 것, 즉 동기발전기가 철성분이 많은 철기계라는 것을 의미하고 반대로 단락비가 작다는 것은 전기자 기자력이 크며, 동기발전기가 동성분이 많은 동기계라는 것을 의미한다.

제 3 장 선박의 직류배전시스템

3.1 직류배전시스템

세계 조선업계에서는 그린쉽 개발에 대한 관심이 크게 증가 하였으며 전기추진시스템을 활용한 선박이 확대되고 있는 추세이며 전기추진시스템의 전력계통에 있어서도 직류배전 방식이 제안되고 있다. 선박용 직류 배전시스템은 Fig 3.1과 같은 시스템으로 구성되며, 일부 선진기업의 사례와 해외 연구결과에 의해 배기가스 및 연료비 저감의 선박을 실현하는 매우 혁신적인 기술로 분석되고 있다.

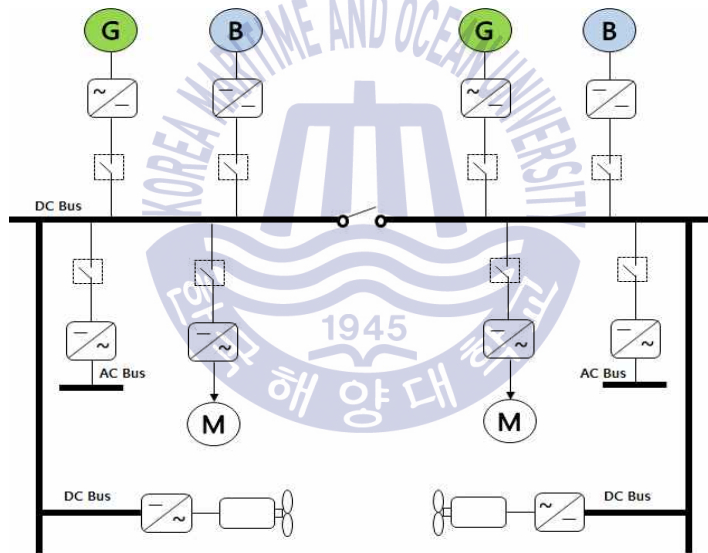


Fig 3.1 DC grid system of the ship

현재 대부분의 선박 및 해양플랜트 전력계통은 교류 배전을 기반으로 구성되어 있으며 발전기에서 교류를 변압기와 배전설비를 거쳐 교류 부하에 전력을 공급하는 구조로 되어 있다.

기존의 교류 기반 계통에서는 발전기를 고정 주파수로 운전 하므로, 저부하 운전시 연료소모량이 많아지는 문제점을 가지고 있으며, 셔틀탱커, 드릴십, 해양작업선, 일부 LNG선 및 LNG FSRU(부유식 액화천연가스 저장 · 재기화 설

비)에 주로 적용되는 전기추진시스템에서는 추진전동기 제어를 위하여 AC-DC 변환과 DC-AC 변환의 전력 변환과정이 필요하다.

3.2 선박용 직류배전시스템의 구성

직류기반 전력계통은 교류 발전기 후단에 AC/DC 변환기를 사용하여 직류로 변환하여 배전하는 구조이며 AC 기반 전력계통에 비하여 아래와 같은 장점을 가진다. Fig 3.2와 같이 교류배전시스템은 발전기간 계통연계가 어렵고 전기추진시스템의 고조파를 줄이기 위해 상천이변압기를 사용함으로써 시스템이 복잡해 진다.

Table 3.1 Comparison of AC grid system and DC grid systems

	AC Power system	DC Power system
① Generator operation range	60Hz fixed frequency operation	Variable frequency operation (reduced fuel consumption)
② Generator synchronization condition	The phase, frequency, magnitude, and direction of rotation must be synchronized	Synchronize voltage only
③ Power quality when connecting motor load	2 step power conversion (AC/DC & DC/AC)	1 step power conversion (DC/AC)
④ DC power (ESS, fuel cell) connection	Grid connection complexity	Ease of system connection
⑤ (In case of electric propulsion ship) Applicability of 3 winding transformer	3-winding transformer required for harmonic reduction	No 3-winding transformer required

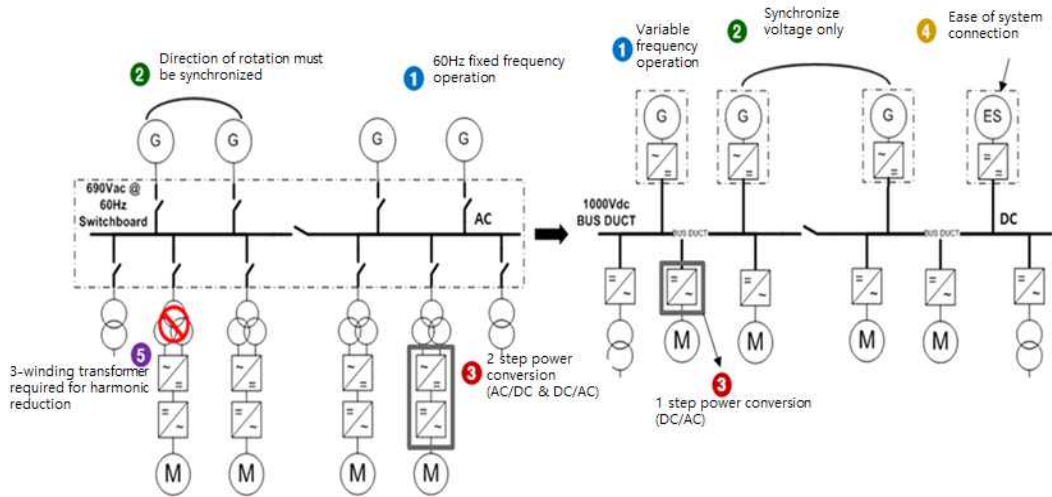


Fig 3.2 Comparison of AC grid system and DC grid systems

반면에 직류배전시스템은 교류배전시스템 보다 시스템이 간단해지고 계통연계가 용이 하며, 부하에 따라 발전기 엔진 속도를 조정함으로써 Fig 3.3과 같이 발전기 엔진의 특성에 따라서 최적 연료소모 구간을 도출하여 연료소모량을 줄일수 있다.

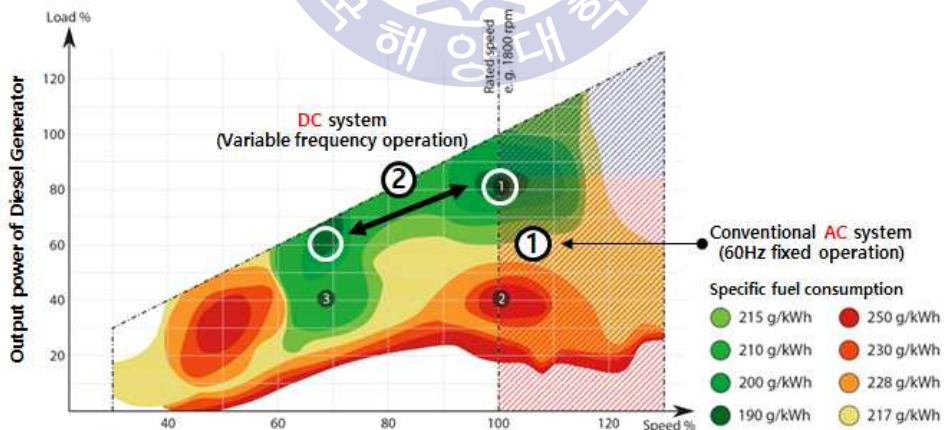


Fig 3.3 Diesel Generator Speed and Power Consumption (Source: E-MS)

3.2.1 가변속 발전기

기존 선박의 AC 전력계통 시스템에 구성된 디젤발전기는 고정주파수(50/60Hz)를 유지하기 위해 일정한 속도로 발전기 엔진을 운전하였다.



Fig 3.4 Alternator & Variable speed engine

교류 전력계통에서는 일정한 주파수를 얻기 위해서 연료 소모가 동일하지만, 직류 전력계통에서는 직류 배전 방식이기 때문에 발전기의 회전속도를 부하에 따라 조절할 수 있어서 Fig 3.5와 같이 교류기반에 비해 직류기반 발전시스템보다 높은 연료절감 효과를 가진다.

그러나 Fig 3.4와 같이 가변속발전기는 가버너를 통해 엔진의 속도를 제어하도록 구성하였으며, 계자는 영구자석을 이용한다.

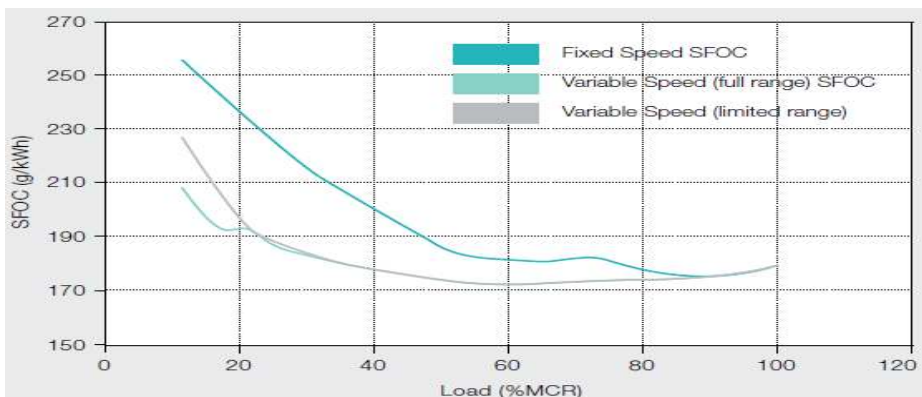


Fig 3.5 Fuel consumption rate by load(AC and DC system), (Source: ABB)

3.2.2 전력변환장치

전력변환장치는 교류를 직류로 변환하는 정류기와 직류를 교류로 변환하는 인버터로 나눌 수 있으며, 인버터는 크게 DC link단에 커패시터를 사용하여 전압의 크기를 일정하게 유지하는 전압형인버터와 DC link단에 인덕터를 사용하여 전류의 크기를 일정하게 하는 전류형인버터로 구분할 수 있다. 전압형인버터는 전류형인버터에 비해 작은 크기로 부하변동에 따른 동특성이 우수하며, 제어가 용이하다는 장점 때문에 최근 건조되는 전기추진선박에 주로 사용되고 있으며 정류기는 전력변환 방식에 따라 구조가 비교적 간단하고 별도의 제어장치가 필요 없는 다이오드를 이용한 DFE 방식과 교류전력을 능동적으로 제어하여 직류로 변환하는 AFE 방식이 있다.

1) DFE 방식 정류기

Fig 3.6은 DFE 방식을 사용한 전기추진시스템의 블록도이며 발전기에서 생산된 교류전력을 다이오드 정류기를 통해 직류로 변환하는 것을 말한다. ON/OFF 제어가 불가능한 다이오드를 정류기의 스위치로 사용하기 때문에 회로구성이 간단한 장점이 있지만 전원 입력단에 사용함으로써 입력 전류의 총고조파왜형률이 커지는 단점이 있다. 총고조파왜형률이 커지면 발생된 고조파로 인해 선박의 전체 전력시스템에 악영향을 미치게 되고, 추진전동기나 항해 및 기타 장비에 장애를 발생시킬 수 있으므로 Fig 3.7과 같이 정류기 앞단에 상천이변압기를 설치하거나 수동필터를 설치하여 고조파를 감소시킨다.

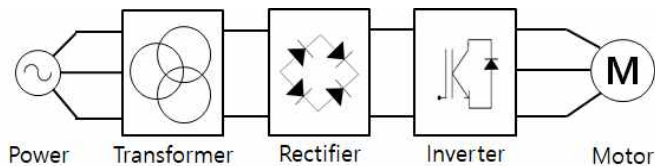


Fig 3.6 Block diagram of DFE topology

2) AFE 방식 정류기

AFE 방식은 발전기에서 생산된 교류전력을 능동적으로 제어하여 직류로 변환하며, 정류기의 제어를 위해 IGBT, MOSFET, GTO 등의 ON/OFF 제어가 가능한 전력용 스위치를 사용한다. 전원 측 입력전류를 정현파에 가깝게 유지할 수 있으므로 DFE 방식에 비해 총고조파왜형율이 크게 감소되는 장점이 있다. Fig 3.7은 AFE 방식 전기추진시스템의 블록도이며, DFE 방식에서 저차고조파 제거의 방법으로 설치한 상천이변압기가 필요 없기 때문에 전체 시스템의 전력효율이 개선되고 부피 또한 줄일 수 있다.

하지만 AFE 방식은 전력변환과정에서 전력용 스위치의 ON/OFF에 의해 DFE 방식에 비해 스위칭 손실이 증가된다.

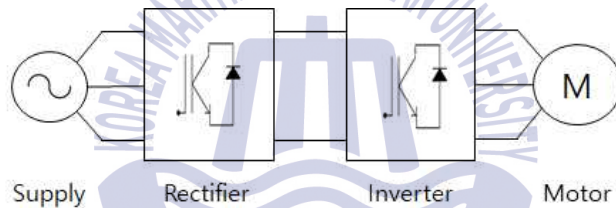


Fig 3.7 Block diagram of AFE topology

3) 인버터

인버터는 직류배전시스템에서 공급되는 직류전력을 ON/OFF 제어가 가능한 전력용 스위치를 이용하여 가변 주파수, 가변전압의 교류를 출력하며 전압파형을 펄스폭변조(PWM: Pulse Width Modulation)함으로서 출력전압파형을 정현파로 만든다. 이렇게 변환된 전압과 주파수를 이용하여 전동기의 회전속도를 제어하는 시스템을 구성한다. Fig 3.7에서 볼 수 있듯이 직류 전력을 교류로 변환하여 추진전동기의 속도와 토크를 제어하게 된다.

제 4 장 가변속 발전시스템

가변속 엔진 발전 시스템은 직류배전방식을 적용하여 발전기 운전 시 각 발전기의 동기화를 필요로 하지 않고, 연료 소비 및 배기량 감소, 주 엔진의 동적 반응을 향상 시키는 것이 가능하다. 그리고 직류배전시스템에 배터리, 연료전지 및 에너지 저장장치를 추가적으로 적용할 수 있어 에너지 효율 및 친환경 효과도 기대할 수 있는 장점이 있다.

또한, 가변속 엔진 발전시스템은 출력 전력에 대응하여 엔진 속도를 가변함으로써, 경부하시 엔진의 연료저감이 가능하다. 또한, 부하 전압, 주파수는 인버터에 의해 제어되므로, 그 응답 속도가 빨라서 고품질의 전력을 전원에 공급할 수 있다. 특히, 급격한 부하 증가시 엔진 출력이 늘어나는 시간 동안 부족한 전력을 배터리로부터 공급받음으로써, 안정된 전력을 공급할 수 있는 시스템의 구성이 가능하다. 또한, 정격 출력 상태에서 부하에 연결된 전동기의 기동으로 인해 야기되는 순간적인 과부하에 대하여 배터리의 에너지를 이용함으로써 엔진 발전기의 용량을 정격 부하에 대해 과도하게 설정하지 않아도 과부하에 대해 충분한 내량을 가질 수 있다.

4.1 가변속 엔진

4.1.1 가변속 엔진의 운전 특성

일반적인 디젤 엔진은 속도에 따른 기계적 출력에 대하여 같은 출력을 발생시켜도 엔진의 운전 속도에 따라 연료 소비가 다르다. 따라서 같은 기계적 출력을 연비가 최소가 되는 점에서 운전하는 것이 주어진 출력 조건에서 단위 연료당 최대의 출력을 낼 수 있다. 엔진 속도를 가변하여 운전 영역내의 최대 효율 점에서 운전하는 것은 엔진의 연료 소비 및 오염 물질 배출을 줄일 수 있는 좋은 방법이다.

4.1.2 가변속 엔진 발전기 교류 여자시스템

전기기기의 회전은 회전자와 고정자가 자석이 되어 N극과 S극이 서로 끌어당김으로써 실현된다. Fig 4.1(a)는 가변속의 원리를 나타내며, 고정 속도기에서

는 회전자에 직류가 흐르기 때문에 회전자가 발생하는 자계는 회전자와 함께 회전한다. 이것이 동기속도로 회전하기 때문에 고정자 권선에 의해 발생하는 동기 회전자계와의 사이에 인력이 서로 작용하여 안정된 회전이 실현된다. Fig 4.1(b)는 회전자 권선에 저주파 교류 전원을 연결하여 유도발전기와 동일한 전류를 흘린 상태이며 점선(동기 회전자계)과 실선(회전자 자계)의 관계는 고정 속도기의 경우와 같으나 회전자가 양자의 회전속도보다 빨리 회전하고 있다는 점만 다르다. 여기에서는 [회전자 속도]±[회전자 여자 주파수]=[동기속도]라는 관계가 성립하여 회전자 교류전류의 주파수를 변화시킴으로서 회전속도를 조정한다.

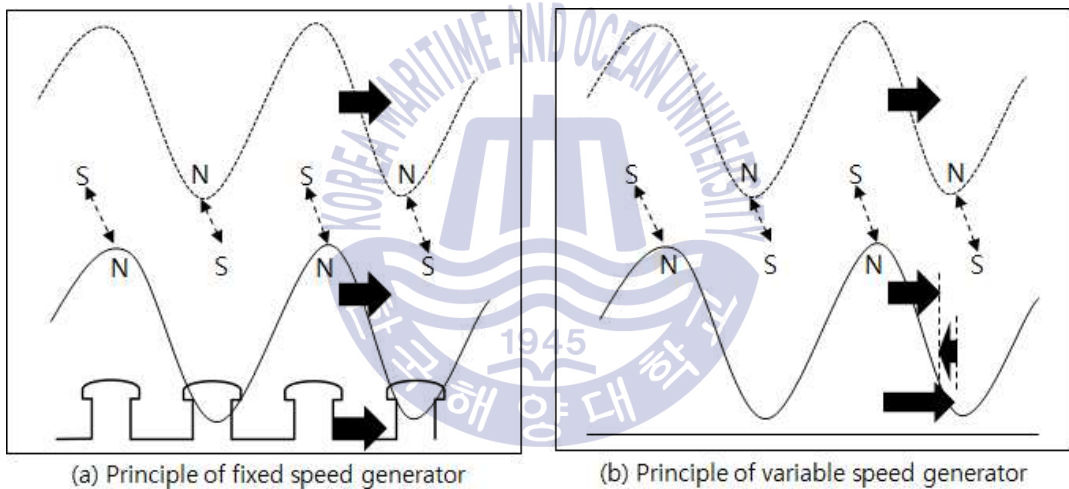


Fig 4.1 Principle of fixed speed generator and Principle of variable speed generator

4.2 가변속 발전기

본 연구를 통해 구성하고자 하는 직류 기반의 발전시스템은 가변속 디젤발전기, 정류기, DC전력 제어용 PMS(Power Management System), DC 배전시스템, 전동기 구동용 인버터(Variable Frequency Drive)로 구성되며 선박용 직류 전기 추진선박을 모의하여 전력계통(발전계통, 배전계통, 추진계통)의 전력품질 및 특성을 시험하기 위하여 시스템을 Fig 4.2와 같이 구성하였다.

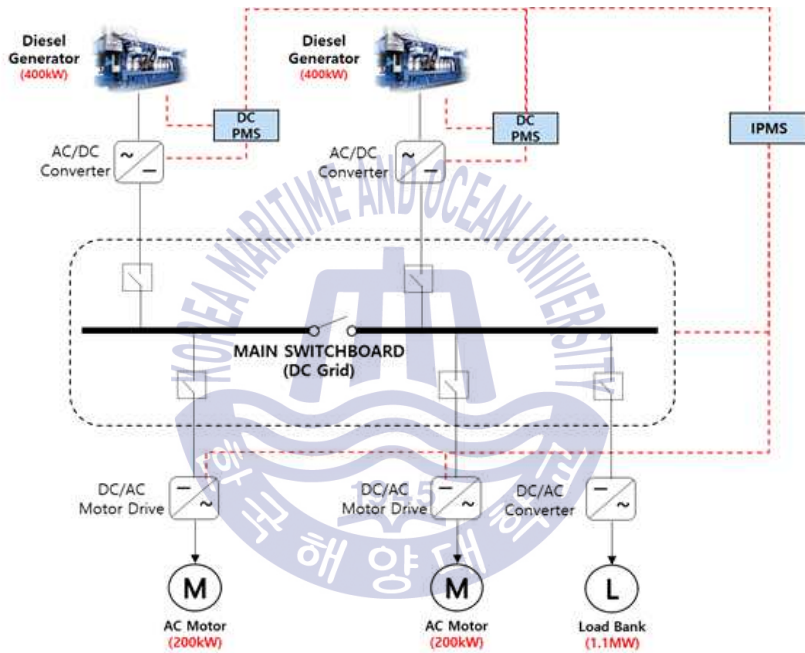


Fig 4.2 Power system diagram of DC distribution system

가변속 발전시스템 개발을 위한 실험장비는 Table 5.1에 정리하였다.

Table 5.1 List of experimental equipment

Item	Model	Description
Diesel Engine	P158LE-III	400kW
Alternator	MJB355SB4	440VAC, 60Hz, 400KVA
Generator Controller	GNGC-100	Generator control
Digital Governor	GNDC-1000	Engine control
AVR	M31FA600A MEC-20	Voltage control
PMS(Power Management System)	Developing(KTE)	Power management
Potentiometer	CVR1	Potentiometer resistance

5.1.1 가변속 엔진

가변속 발전기용 엔진은 기존의 선박 발전기용으로 많이 사용되는 디젤엔진을 사용하였으며, 정격출력 400[kW], 전압 440[V], 최대속도 1,800[rpm] 이고 사용연료는 경유를 사용한다.

본 연구에서 구축한 엔진은 Fig 5.2와 같으며 디젤발전기용으로 주로 사용되고 있는 P158LE-III 일반 발전기용 엔진을 사용하였으며, 발전기 컨트롤러 및 가변속을 위한 디지털 가버너를 이용하여 시스템을 구성 하였다.

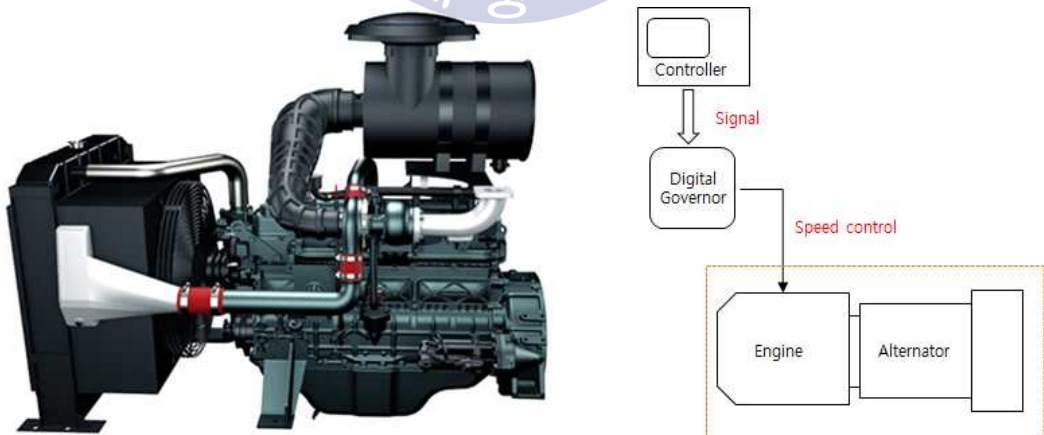


Fig 5.2 Variable speed engine

가변속 엔진의 운전범위는 60~100%(1100 ~ 1800[rpm])로 설정하였으며, 발전기 컨트롤러에서 보내주는 지령값에 따라 엔진속도가 제어되도록 설계되었고 가버너를 통해 엔진속도가 변화되는 것을 확인 하였다.

5.1.2 발전기

발전기는 브러시리스 동기 발전기를 사용하였으며 주요 사양은 Table 5.2와 같다.

Table 5.2 Alternator Specifications

General Data	
Prime kVA	570 kVA
Prime kW	456 kW
Standby kVA	625 KVA
Standby kW	500 kW
Connection	Stella Series
Phases	Three Phases (with Neutral)

5.1.3 발전기 제어기

발전기 제어기는 엔진 발전 시스템에서 사용하는 디지털 발전기 제어기로서 전압, 전류, 주파수, 전력량 등을 모니터링하고 제어하는 장치이다.



Fig 5.3 Generator Controller

Fig 5.3은 본 연구에서 사용된 발전기 제어기이며 주요 시스템 사양은 Table 5.3과 같다.

Table 5.3 Generator Controller Specifications

Output Spec.	
Relay Output	2Port(AC240V/10A, DC12V/15A), 3port(AC240V/5A, DC30V/2A)
FET Output	6port(DC24V/2A)
Isolated Analog Output	625 KVA
Standby kW	2Port(DC 0V~10V or -5V~5V), (DC500V isolated)
Input Spec.	
Power(E-F)	DC 24V ~ 32V
3-phase voltage input	AC 380V/ 3Phase
3-phase current input	CT Output Max 5A
Sensor Input	4Port, Register(0 ~1kohm) or 4-20mA or DC 0 ~ 10V
Analog Input	2Port, Register(0 ~1kohm) or 4-20mA or DC 0 ~ 10V
Digital Input	8Port, Relay contact or DC 5~24V

5.1.4 가버너

디지털 가버너는 가변속 발전기 엔진의 속도를 제어하기 위한 장치로 발전기 제어기에서 보내주는 엔진속도 지령값에 따라서 엔진속도를 1100~1800[rpm]으로 제어할 수 있도록 구성 하였다.



Fig 5.4 Governor

Fig 5.4는 본 연구에서 구성한 가버너로서 외부 저항 및 전압에 따라 속도조절이 가능하고, 통신을 통해 발전기 제어기 및 PMS에서 제어할 수 있도록 구성되어 있다. 주요 시스템 사양은 Table 5.4와 같다.

Table 5.4 Governor Specifications

Function		GNDC-1000
Input spec	Input power	DC 12~40V
	Pick-up	AC 3V (RMS)
	Speed control register(ADJ)	0~5k Ω
	Speed control voltage(AUX)	-2.5V~2.5V
Output spec	Actuator	120W(DC24/5A)
	Relay	AC250V/5A, DC50V/3A
Control spec	Speed control range	0~3000 RPM
	PID Gain	0~100%
	Droop	0~10%
	Speed ramping	0~1000 RPM/SEC
	Starting fuel	0~100%
	Speed control register(ADJ)	± 1000 RPM/(0~5k Ω)
	Speed control voltage(AUX)	± 1000 RPM/(-2.5V~2.5V)
	Speed control precision	$\pm 0.2\%$

5.1.5 AVR

AVR은 발전기에서 출력되는 교류전압 및 주파수를 일정하게 유지시켜주는 장치로서 Fig 5.5와 같이 구성되어 있다.

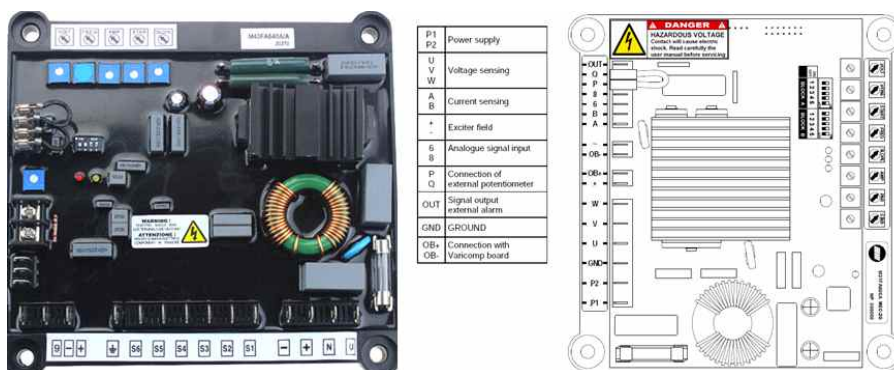


Fig 5.5 AVR

AVR의 주요기능 및 정확도는 Table 5.5와 같다.

Table 5.5 AVR Specifications

Functions	
Soft start	Ramp time adjustable from 0 to 60s
Parallel between generators	<ul style="list-style-type: none"> Type: Reactive droop compensation Droop: from 0 to 15%
Overexcitation limiting device	<ul style="list-style-type: none"> Type: Inverse time characteristic 1 maximum fixed threshold of 15A, above which de-energizing occurs (after about 10s) 1 minimum settable threshold, above which the limiting device operate according to the characteristic 1 open collector output per signal
Under frequency limiting device	<ul style="list-style-type: none"> Corner frequency adjustable from 40 to 60 Hz Zero Volt frequency adjustable from 0 to 40 Hz
Accuracy	
From 0 to 100% load	$\pm 0.5\%$ @ PF 0.8 - balanced and non deforming load and constant frequency
With $\pm 4\%$ engine governing	$\pm 1\%$ @ steady state conditions for load and speed
Steady state	$\pm 0.1\%$ @ constant load and frequency
Thermal drift	$\pm 0.5\%$ for a change of 30°C at TAMB in 10 minutes
V/Hz	$\pm 2\%$

가변속에 따른 발전기측 전압을 조정하기 위해 AVR의 EX 입력측에 저항을 이용하여 전압을 보상해 주기 위해서 전위차계(Potentiometer)를 구성하였으며 발전기 전압에 따라 AVR 전압을 보상하기 위해 엔진속도(1100~1800[rpm])에 따른 기준 전압을 측정하고 전압변동에 따른 저항값을 Table 5.6과 같이 설정 하였다.

Table 5.6 Output voltage according to generator speed

Generator engine speed (rpm)	Generator voltage (VAC)	Generator frequency (Hz)	AVR resistance value (k Ω)	PMS output %/ Variable resistance (k Ω)
1100	251	36.7	4	90/9.03
1200	279	40	11	68/6.82
1300	306	43.3	19.2	54/5.38
1400	331	46.7	28.7	41/4.11
1500	360	50	40.9	29/2.84
1600	387	53.3	53.2	20/1.90
1700	414	56.7	68.7	12/1.11
1800	443	60	89.9	6/0.475

이 저항값을 개발하고자 하는 가변속 발전기에서 구현하기 위해서 상위 제어기인 PMS를 통해 부하변동에 따라 저항값을 가변하여 입력하기 위한 전위차계(Potentiometer)를 Fig 5.6과 같이 구성하였다.



Fig 5.6 PMS & Potentiometer(Left), AVR of Diesel generator(Right)

5.1.6 전력관리장치

전력관리장치는 전력계통(발전, 배전, 추진부하)의 전력데이터(전압, 전류, 전력량 등)를 감시 및 제어하기 위해 개발된 장치이며 부하측 전압, 전류 및 전력

량등을 모니터링 하면서 가버너에 속도지령을 전달함으로써 발전기 엔진속도를 제어하는 장치이다.

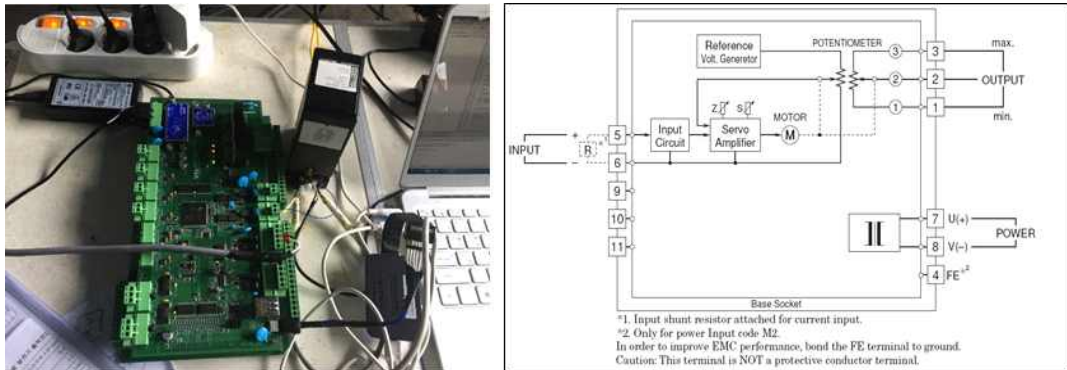


Fig 5.7 PMS & Schematic Diagram of Potentiometer

전력변환장치는 Fig 5.7과 같이 엔진의 속도를 가변적으로 제어하기 위해 별도의 전위차계를 이용하여 AVR의 저항값을 변경시킴으로써 부하변동에 따른 발전기측 전압이 일정하게 유지될 수 있도록 보상 해주도록 구현 하였다.

5.1.7 부하 인가장치(Load Bank)

부하 인가장치는 가변속 디젤발전기에서 출력되는 전력을 소모하기 위한 부하장치이며, 저항(Helical Type)소자로 구성하였다.



Fig 5.8 Load Bank

가변속 발전기의 출력전압이 낮아질수록 전류도 낮아지기 때문에 정격용량 400[kW]보다 높은 840[kW]의 부하장치를 사용 하였다. 주요 시스템 사양은 Table 5.7과 같다.

Table 5.7 Load Bank Specifications

General Spec.	
Capacity	840kW
Power	440VAC, 3-Phase, 60Hz
Cooling Type	Air Cooling

5.1.8 전력 분석계(전압, 전류, 주파수 전력 측정용)

시험에 사용된 가변속 발전기용 컨트롤러의 정확도를 확인하기 위하여 Fig 5.9와 같이 별도의 전력분석장비를 사용하여 가변속으로 발전되는 전압을 실시간으로 계측하여 컨트롤러의 전력데이터와 비교하여 신뢰성을 확보하였다.



Fig 5.9 Power Quality Analyzer(FLUKE 430-II)

5.3 실험 및 실험 결과

5.2.1 가변속 엔진속도에 따른 전압변동 특성

Fig 5.10은 가변속 발전시스템의 엔진속도별 전압, 주파수 변동특성을 확인한 것이다. 직류배전 시스템에서 구성하고자 하는 정류기의 경우에는 1차측 전압 범위가 245[V] ~ 500[V] 이내에서 2차측 전압 750[V]DC로 유지할 수 있기 때문에 최초 1100rpm의 구간에서 251V를 확인 하였으며, 100rpm 단위로 엔진속도를 가변하였을 경우에는 Fig 5.10과 같이 전압(251~443[V]) 및 주파수(36.7~60[Hz])가 가변되는 것을 확인 하였다.

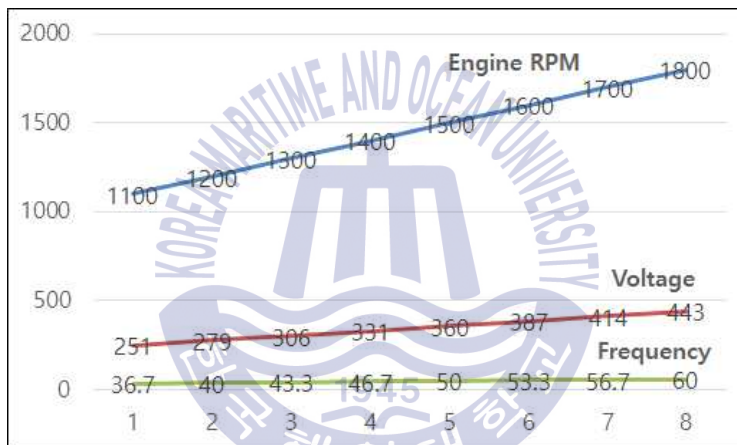


Fig 5.10 Characteristics of voltage and frequency fluctuation according to engine speed

엔진속도에 따라서 전압 및 주파수가 일정한 간격으로 가변되는 것을 확인 하였지만, 로드뱅크를 이용한 부하변동 시험에서는 엔진속도 1100rpm 구간에서 부하가 증가할수록 전압과 주파수가 급격하게 떨어지는 것이 확인되어 자동전압 조정기를 이용하여 전압을 안정적으로 공급할 수 있는 방안이 검토되었고, 5.1장의 실험장비 구성에서 설명한 것과 같이 전력관리장치를 이용하여 자동전압조정장치의 전압을 보상해줌으로써 실험 결과를 도출 하였다.

5.2.2 엔진 가변속을 통한 발전기 출력 특성

부하 변동에 따른 가변속 발전기의 출력 특성을 실험하기에 앞서 엔진 속도의 가변에 의한 발전기의 출력 전압, 전류 특성을 분석 하였다.

Table 5.8은 선박에서 요구되는 전압 및 주파수 변동 특성에 관한 조건이며, 본 연구를 통해 시험된 전압 및 주파수 변동 특성을 Table 5.8 기준으로 분석 하였다.

Table 5.8 Voltage and frequency variations (Source: KR Rule)

(a) Voltage and frequency variations for a.c. distribution systems		
Type of variations	Variations	
	Permanent	Transient
Frequency	± 5 %	± 10 % (5 sec)
Voltage	+ 6 %, -10 %	± 20 % (1.5 sec)

(b) Voltage variations for d.c. distribution systems		
Parameters	Variations	
Voltage tolerance (continuous)	± 10 %	
Voltage cyclic variation deviation	5 %	
Voltage ripple(a.c. r.m.s. over steady d.c. voltage)	10 %	

(c) Voltage variations for battery systems		
Systems	Variations	
Components connected to the battery during charging (see Note)	+30 %, -25 %	
Components not connected to the battery during charging	+20 %, -25 %	

(Note)
Different voltage variations as determined by the charging/discharging characteristics, including ripple voltage from the charging device, may be considered.

발전기의 엔진속도를 1100~1800[rpm]으로 설정하였으며 100[rpm] 단위로 증가시킴으로서, 발전기에서 출력되는 전압 및 전류를 측정하였고 부하변동은 로드뱅크를 사용하였다.

1) 엔진속도 1100[rpm] 시 출력 전압, 전류 분석

Fig 5.11 에서와 같이 1100[rpm] 에서는 전압이 251~258[V], 전류는 0~536[A] 가 측정되었다.

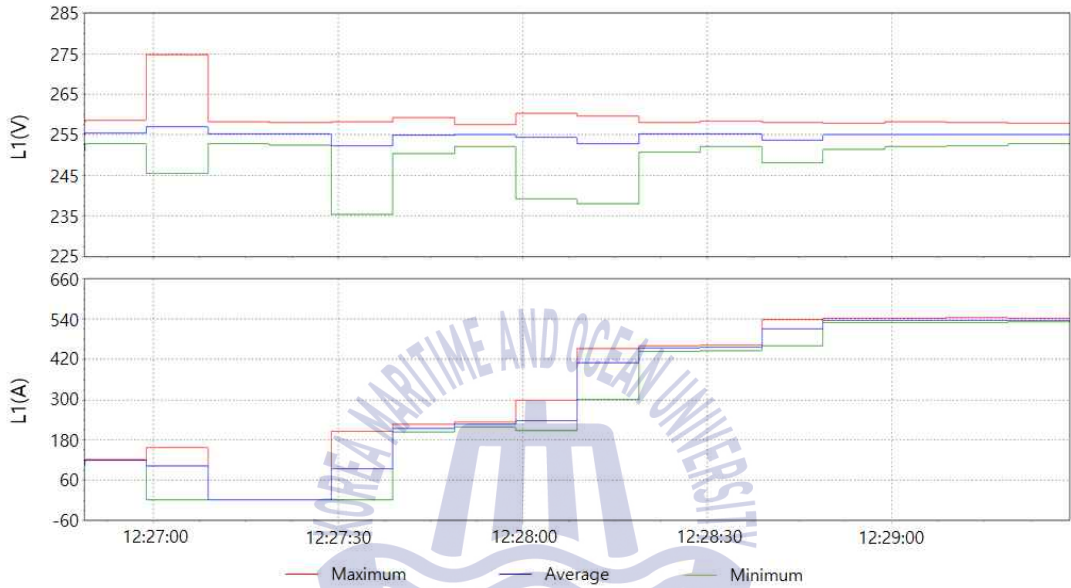


Fig 5.11 Generator output voltage & current (1100rpm)

정격부하 400[kW]의 60%(240[kW])를 서서히 인가하였을 경우 최대전압은 275[V] 였으며, 전류는 536[A]가 측정 되었다. Fig 5.11의 전압, 전류 파형은 부하 인가를 0~60[%]로 서서히 증가시킴으로 인한 결과이다.

2) 엔진속도 1300rpm 구간 전력데이터 분석

Fig 5.12 에서와 같이 1300[rpm] 에서는 전압이 303~314[V], 전류는 0~536[A] 가 측정되었다.

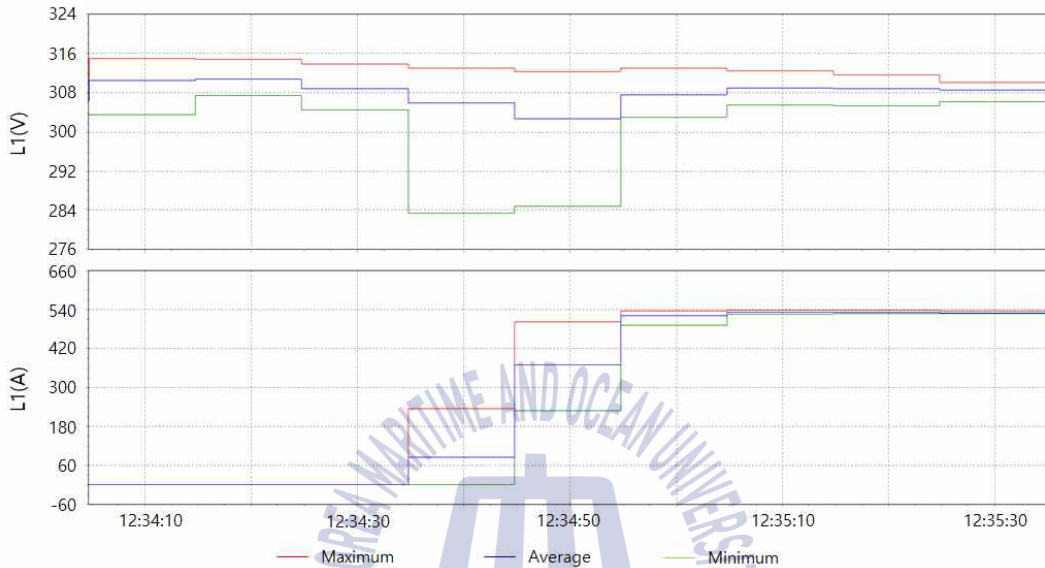


Fig 5.12 Generator output voltage & current (1300rpm)

정격부하 400[kW]의 70%(280[kW])를 서서히 인가하였을 경우 전압은 314[V] 였으며, 전류는 536[A]가 측정 되었다. Fig 5.12의 전압, 전류 파형은 부하 인가를 0~70[%]로 서서히 증가시킴으로 인한 결과이다.

3) 엔진속도 1500rpm 구간 전력데이터 분석

Fig 5.13 에서와 같이 1500[rpm] 에서는 전압이 360~370[V], 전류는 0~536[A] 가 측정되었다.

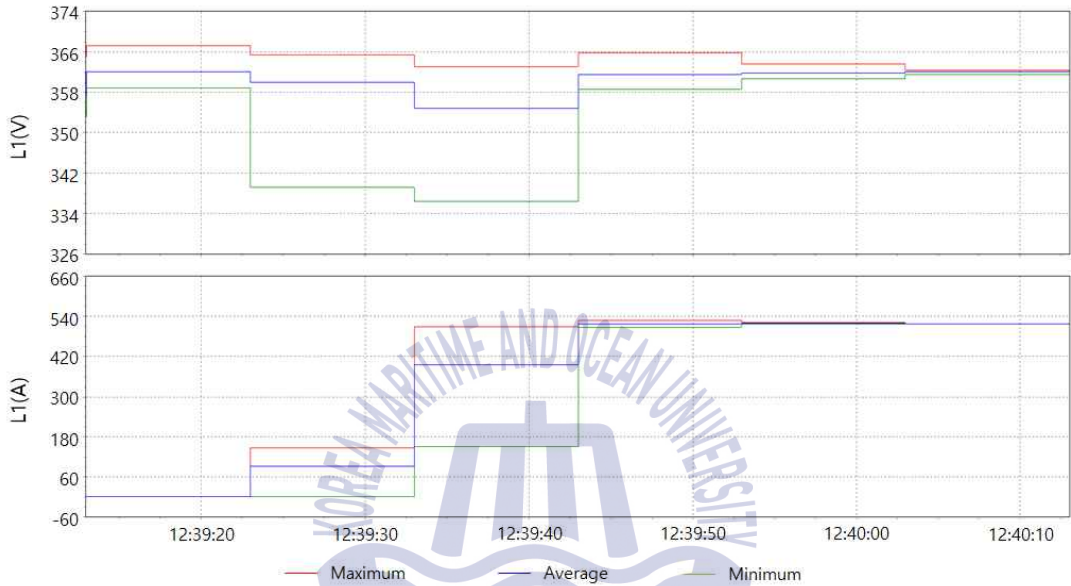


Fig 5.13 Generator output voltage & current (1500rpm)

정격부하 400[kW]의 80%(320[kW])를 서서히 인가하였을 경우 전압은 368[V] 였으며, 전류는 536[A]가 측정 되었다. Fig 5.13의 전압, 전류 파형은 부하 인가를 0~80[%]로 서서히 증가시킴으로 인한 결과이다.

4) 엔진속도 1700rpm 구간 전력데이터 분석

Fig 5.14 에서와 같이 1700[rpm] 에서는 전압이 410~420[V], 전류는 0~536[A] 가 측정되었다.

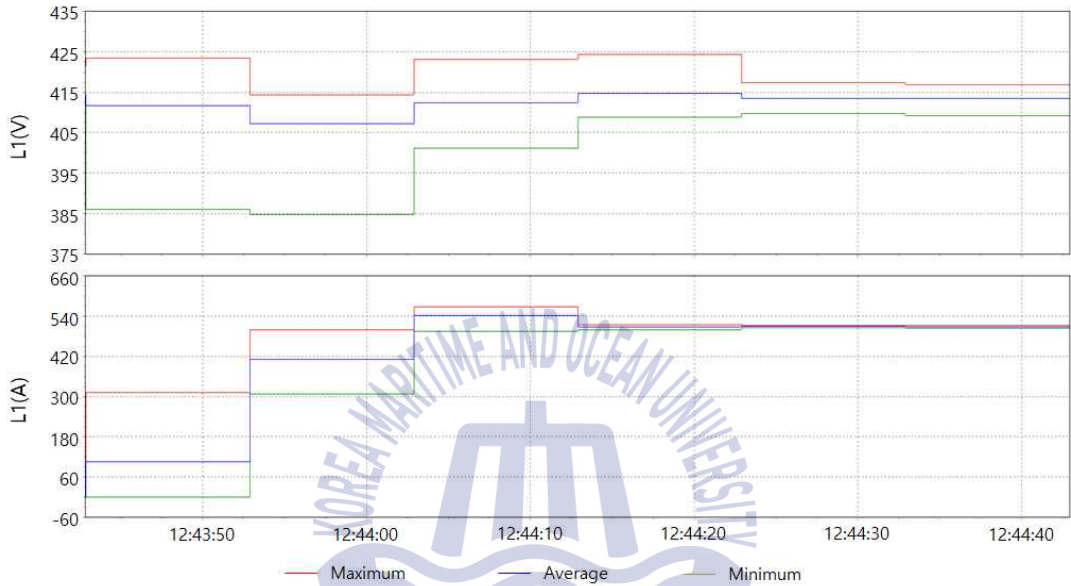


Fig 5.14 Generator output voltage & current (1700rpm)

정격부하 400[kW]의 90%(360[kW])를 서서히 인가하였을 경우 전압은 420[V]였으며, 전류는 536[A]가 측정 되었다. Fig 5.14의 전압, 전류 파형은 부하 인가를 0~90[%]로 서서히 증가시킴으로 인한 결과이다.

5) 엔진속도 1800rpm 구간 전력데이터 분석

Fig 5.15 에서와 같이 1800[rpm] 에서는 전압이 436~440[V], 전류는 0~536[A] 가 측정되었다.

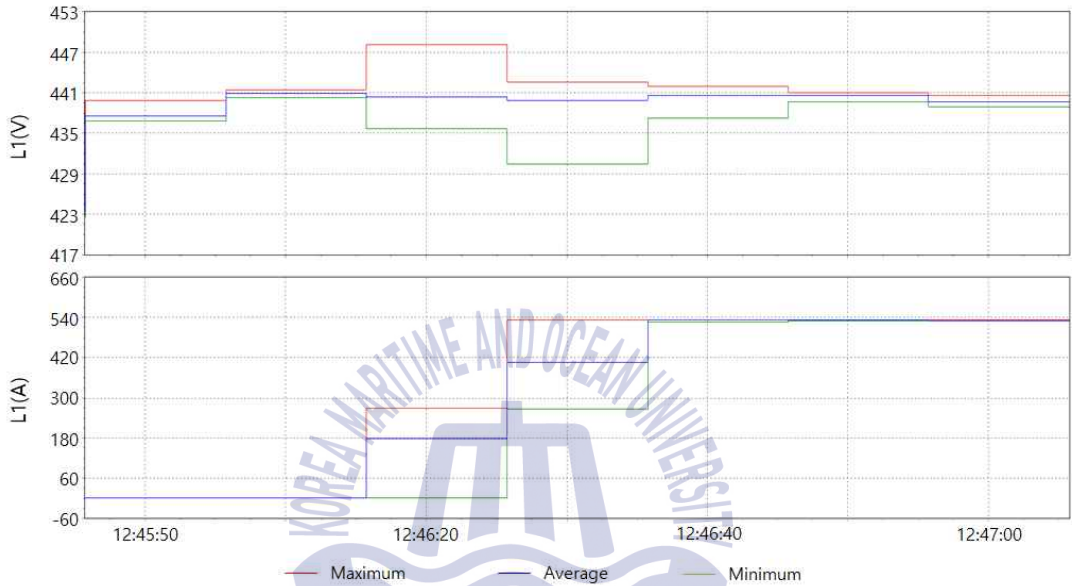


Fig 5.15 Generator output voltage & current (1800rpm)

정격부하 400[kW]의 100%(400[kW])를 서서히 인가하였을 경우 전압은 449[V]였으며, 전류는 536[A]가 측정 되었다. Fig 5.15의 전압, 전류 파형은 부하 인가를 0~100[%]로 서서히 증가시킴으로 인한 결과이다.

6) 부하변동에 따른 전압, 전류, 주파수 변동특성 분석

Fig 5.16와 Fig 5.17은 로드뱅크를 이용하여 부하를 0~400[kW]까지 변동 시켰을 때 가변속 발전기의 엔진속도(1100~1800[rpm])에 따른 전압, 전류, 주파수 변동특성을 분석한 그래프 이다.

부하는 일정하게 증가 시켰으며, 1300[rpm] 이상에서는 전류값은 거의 고정인 상태에서 AVR을 이용하여 전압을 증가 시켰다. 이 결과 전압과 주파수가 정상적으로 증가하는 것을 확인하였으며, 안정적으로 전력량이 증가 하는 것을 확인 하였다.

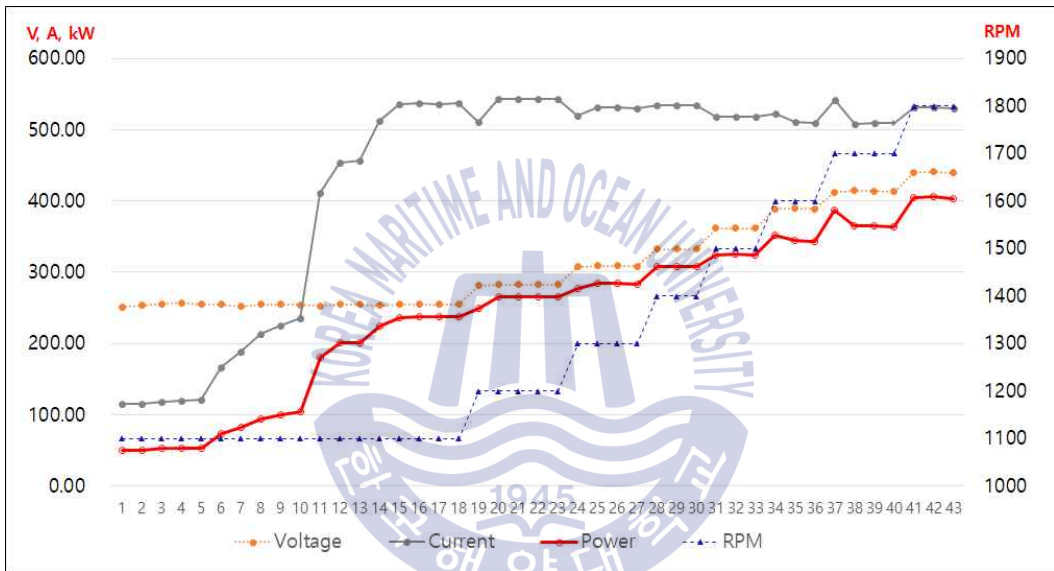


Fig 5.16 Generator output voltage, current characteristics at load change

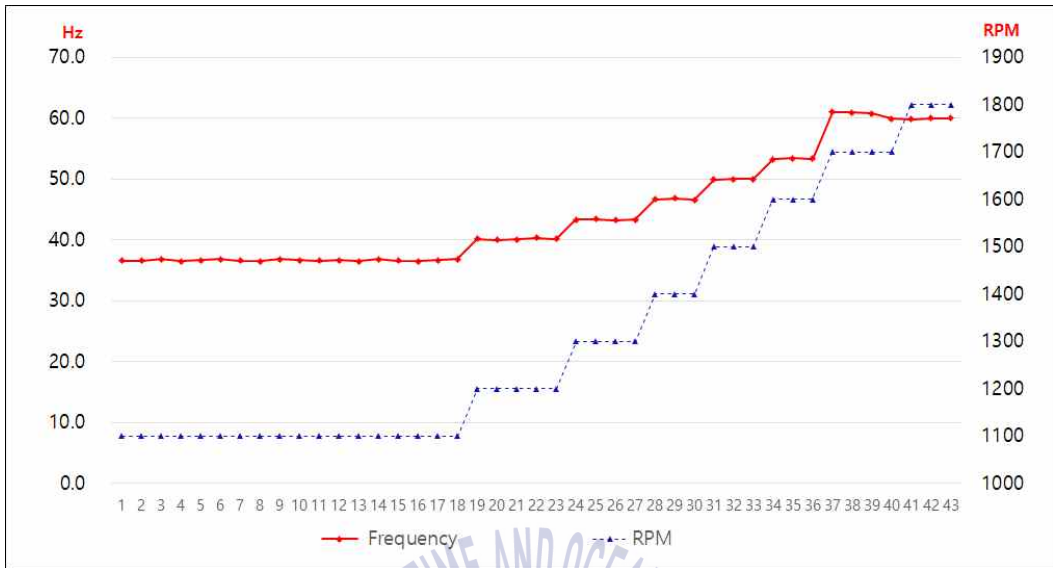


Fig 5.17 Generator output frequency characteristics at load change

전압은 251~440[V], 전류는 115~543[A], 주파수는 36~60[Hz]까지 변동되는 것을 확인 하였고 부하변동시 발전기엔진의 응답특성이 약간 늦기 때문에 전류가 먼저 올라가고 전압이 따라가면서 안정화 되는 것을 확인 하였다.

기존의 상용화 되어 있는 발전기를 이용하여 부하변동시 엔진속도 변화에 따른 발전기 출력 특성을 분석한 결과 그 유효성을 입증할 수 있었으며, 기존의 선박에 설치되어 있는 발전시스템을 개조할 수 있어서 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단되어 향후 이와같은 가변속 발전시스템을 사용하는 배전시스템이 선박에 많이 적용될 것으로 사료 된다.

5.2.3 부하변동에 따른 가변속 발전기의 출력 특성

본 실험에서는 선박에서 사용하고 있는 디젤 엔진의 기계적 특성을 고려하여 부하 환경을 부하인가장치를 활용하여 60~100% 구간에서 설정 하였으며, 각 부하에 따른 발전기 엔진의 가변속 특성을 분석 하였다. 세부 부하 인가는 정격의 60%, 70%, 80%, 90%, 100%로 설정하였다.

1) 정격의 60[%] 부하 인가시 발전기 엔진의 가변속 특성

정격 부하 400[kW]의 60%를 부하인가장치를 통하여 설정하여 가변속 발전기의 엔진속도가 디지털 가버너를 통해 1100[rpm]으로 운전되는 경우에 발전기 컨트롤러로 측정된 데이터는 Fig 5.18과 같이 전압 250.6[V], 전류 536.6[A], 주파수 36.6[Hz], 전력 232.9[kW] 였다. 또한 전력분석기를 통해서 출력 전압이 253.02[V]임을 확인하였다. 실시간으로 변화되는 전압과 측정기기의 측정오차등을 감안하였을 경우 계측 정확도는 높음을 확인할 수 있었다.



Fig 5.18 Generator output voltage, current, frequency(1100[rpm])

위와 같은 시험을 진행한 결과 약 60%(400[kW] 기준)의 부하에서 전압과 주파수가 안정적으로 유지되는 것을 확인 하였다.

2) 정격의 70% 부하 인가시 발전기 엔진의 가변속 특성

정격 부하 400[kW]의 70%를 부하인가장치를 통하여 설정하여 가변속 발전기의 엔진속도가 디지털 가버너를 통해 1300[rpm]으로 운전되는 경우에 발전기 컨트롤러로 측정된 데이터는 Fig 5.19와 같이 전압 305.7[V], 전류 522.8[A], 주파수 43.3[Hz], 전력 276.8[kW] 였다. 또한 전력분석기를 통해서 출력 전압이 307.77[V]임을 확인하였다. 실시간으로 변화되는 전압과 측정기기의 측정오차등을 감안하였을 경우 계측 정확도는 높음을 확인할 수 있었다.



Fig 5.19 Generator output voltage, current, frequency(1300rpm)

3) 정격의 80% 부하 인가시 발전기 엔진의 가변속 특성

정격 부하 400[kW]의 80%를 부하인가장치를 통하여 설정하여 가변속 발전기의 엔진속도가 디지털 가버너를 통해 1500[rpm]으로 운전되는 경우에 발전기 컨트롤러로 측정된 데이터는 Fig 5.20과 같이 전압 362.4[V], 전류 510.5[A], 주파수 50[Hz], 전력 320.4[kW] 였다. 또한 전력분석기를 통해서 출력 전압이 359.91[V]임을 확인하였다. 실시간으로 변화되는 전압과 측정기기의 측정오차등을 감안하였을 경우 계측 정확도는 높음을 확인할 수 있었다.



Fig 5.20 Generator output voltage, current, frequency(1500rpm)

4) 정격의 90% 부하 인가시 발전기 엔진의 가변속 특성

정격 부하 400[kW]의 90%를 부하인가장치를 통하여 설정하여 가변속 발전기의 엔진속도가 디지털 가버너를 통해 1700[rpm]으로 운전되는 경우에 발전기 컨트롤러로 측정된 데이터는 Fig 5.21과 같이 전압 413.7[V], 전류 507.3[A], 주파수 56.9[Hz], 전력 363.5[kW] 였다. 또한 전력분석기를 통해서 출력 전압이 411.77[V]임을 확인하였다. 실시간으로 변화되는 전압과 측정기기의 측정오차등을 감안하였을 경우 계측 정확도는 높음을 확인할 수 있었다.



Fig 5.21 Generator output voltage, current, frequency(1700rpm)

5) 정격의 100% 부하 인가시 발전기 엔진의 가변속 특성

정격 부하 400[kW]의 100%를 부하인가장치를 통하여 설정하여 가변속 발전기의 엔진속도가 디지털 가버너를 통해 1800[rpm]으로 운전되는 경우에 발전기 컨트롤러로 측정된 데이터는 Fig 5.22와 같이 전압 441.3[V], 전류 529.6[A], 주파수 60[Hz], 전력 404.8[kW] 였다. 또한 전력분석기를 통해서 출력 전압이 441.05[V]임을 확인하였다. 실시간으로 변화되는 전압과 측정기기의 측정오차등을 감안하였을 경우 계측 정확도는 높음을 확인할 수 있었다.



Fig 5.22 Generator output voltage, current, frequency(1800rpm)



제 6 장 결론

선박에 직류배전시스템 적용을 통해서 배전계통의 단순화, 배전 효율의 증대, 손실감소의 장점뿐만 아니라 발전기의 엔진을 부하에 따라 가변속 제어함으로써 연료 소모량을 현저히 줄일수 있다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 발전기의 엔진속도를 1100~1800[rpm]으로 설정하였으며, 100[rpm] 단위로 단계적으로 증가시켜서 엔진속도에 따른 전압변동값을 확인 하였으며, 로드뱅크를 이용하여 부하변동시 발전기에서 전압 및 전류가 정상적으로 출력되는지에 대한 실험을 진행하였다.

2) 엔진 속도에 따라 전압이 250~441VAC 범위내에서 안정적으로 변동되는 것을 확인하였으며, 과도상태에서 $\pm 20\%$ 이내에 안정화되고 부하가 일정할 때 전압도 안정적으로 유지되는 것을 확인 하였다. 주파수는 36~60Hz 범위내에서 일정하게 변동 및 유지되는 것을 확인하였다.

3) 전류는 부하변동량(0~404kW)에따라 변경되지만, 본 논문을 통해 수행된 실험 결과 전압변동 특성에 따라 0~536A 전류를 흘려주어 가변속 발전시스템의 출력특성을 분석 하였고, 부하변동에 따라 전압 및 주파수가 안정적 출력되는 것을 확인 하였다.

본 논문에서 제안하는 가변속 엔진을 사용하는 발전시스템의 가변속 제어에 의한 발전기 출력 특성과 부하변동에 따라 엔진속도의 가변을 통해 전압, 주파수 추종 및 안정성을 테스트 베드를 구축하여 실험 하였다.

이러한 가변속 발전을 실선에 적용하기 위해서는 발전기와 정류기의 연계특성 및 디젤발전기의 구간별 연료소모량을 계측하여 정확한 제어 포인트를 도출

해내야 하며, 실시간으로 부하량을 검출해서 전압 및 주파수를 제어해야 한다.

본 연구에서는 전력량의 증가에 따른 전압, 주파수 특성을 관찰하였으며, 향후 연구를 통해 직류배전시스템(정류기, DC배전반, VFD 인버터, 추진용 모터)을 구축하여 부하변동에 따른 전력품질(전압, 주파수)을 확인할 예정이며, 발전기측 연료 공급 및 회수부에 질량 유량계(Coriolis mass flow meter)를 이용하여 연료소모량에 따른 가변속 발전기 구간을 도출하여 발전기의 에너지 절감효과를 확인할 예정이다. 따라서, 정류부측 출력특성과 엔진의 속도제어를 통해 가변속 발전기의 최적제어 조건을 개발 하고자 한다.



참고문헌

- [1] Stephan J. Chapman, 2012. *Electric Machinery Fundamentals*. Mc Graw Hill.
- [2] Adrian Ioinovici, 2012. *Power Electronics and Energy Conversion Systems*. Wiley.
- [3] A, Fitzgerald . Charles, Kingsley. & Stephen, Umans., 2017. *Electric Machinery*. Mc Graw Hill.
- [4] H.M, Jeon, 2018. A Study on the Performance Improvement for AFE Rectifier. Degree of Master. Busan: Department of Marine System Engineering.
- [5] 손영광, 최세화, 이승용, 김소연, 설승기, 2017. 10톤급 어선에의 DC 배전 전 기추진선박 적용. *한국전력전자학회*, 22(4), pp. 353-359.
- [6] W, Bin. 2006. *High-Power Converters and AC Drives*. Wiley IEEE.
- [7] I, Boldea. 2015. *Variable Speed Generator*. CRC Press.
- [8] Henry Shu-hung Chung, Huai Wang, Frede Blaabjerg and Michael Pecht, 2015. *Reliability of Power Electronic Converter Systems*. IET.
- [9] 이승환, 2008. 전기식 조속기를 이용한 디젤엔진 발전기의 효율 개선을 위한 속도제어기 설계