

직류배전용 가변속 디젤발전기 개발에 관한 연구

박기도* · 김종수**†

* 한국선급, ** 한국해양대학교

A Study on the Development of a Variable Speed Diesel Generator for DC Distribution

Kido Park* · Jongsu Kim**†

* Korean Register Busan, Korea

** Korea Maritime University, Busan 49112, Korea

요약 : 본 연구에서는 국내외적으로 환경문제 및 에너지절감의 일환으로 직류배전시스템을 선박에 적용하려는 연구 및 실증이 활발히 수행되고 있으며, 발전기를 직류배전시스템에 적용하기 위해서는 가변속 엔진을 적용하여 저부하 영역에서 발전기의 엔진 회전수를 줄여 연료소모량을 절감할 수 있는 방안이 제시되고 있다. 본 논문에서는 기존의 디젤발전기를 이용하여 발전기 컨트롤러, 가버너, AVR을 이용하여 직류배전용 가변속발전기를 구성하였으며, 발전기의 시스템 구성 방법, 가변속 발전에 따른 전력품질 시험(전압 및 주파수 변동특성, 부하변동 특성)을 통해 가변속 발전기의 전력특성을 분석 하였다. 가변속 발전기의 전압(250~440 VAC) 및 주파수(34~60 Hz)는 정격의 60~100%로 구성하였으며, 엔진은 1100~1800 rpm 범위에서 운전되도록 설정 하였다. 부하변동에 따라 발전기의 엔진속도를 변경시켜서 발전기 출력의 전압, 전류, 주파수가 전력량에 따라 안정적으로 변동되는 것을 확인하였다.

핵심어 : 가변속 발전기, AFE 정류기, 직류배전, 디지털 가버너, 전력관리장치

Abstract : In this study, research and a demonstration for applying DC distribution systems to ships as an environmental and energy conservation solution in domestic and foreign countries were actively carried out. In order to apply a generator to a DC distribution system, a variable speed engine was used. Both engine speed and fuel consumption were reduced. In this paper, a DC generator for DC distribution was constructed using a diesel generator, a generator controller, a governor, and an AVR. A system configuration method for a generator, power quality test, and the power characteristics of a variable speed generator were analyzed. The voltage (250 - 440 VAC) and frequency (34 - 60 Hz) of the variable speed generator were set to 60 - 100 % of the rated value, and the engine was set to operate from 1100 - 1800 rpm. It was confirmed that the voltage, current, and frequency of the generator output fluctuated in a stable manner according to the power amount when changing the engine speed of the generator according to the load variation.

Key Words : Variable speed generator, AFE Rectifier, DC Distribution, Digital governor, Power management system

1. 서론

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 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, 그결과 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 선주들

* First Author : kdpark@krs.co.kr, 070-8799-8749

† Corresponding Author : jongsukim@kmou.ac.kr, 051-410-4831

은 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 증가하였으며, 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 ABB에서는 Onboard DC Grid 시스템을 적용하여, Single DC circuit 배전방식을 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, Siemens는 DC Grid 시스템인 Blue Drive Plus를 적용하여, 장치의 부피 및 무게 절감, 에너지의 저장 및 효율 향상, 설치의 용이성, 추진기 이중화를 실현하는등 다양한 형태로 실증이 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 선박용 직류 전력계통시스템에 적용하기 위해 기존 디젤발전기를 개선한 가변속 발전시스템을 제안하고자 한다.

2. 가변속 디젤발전기 실험 결과

2.1 실험장비 구성

가변속 발전기 시스템의 부하변동에 따른 특성 시험을 위하여 실험장치를 구성하였으며, 세부 구성요소는 가변속 엔진, 동기 발전기, 디지털 가버너, 발전기 제어기, AVR, 전력관리장치, 부하인가장치(Load Bank)로 구성된다. 발전기 엔진의 속도를 제어하기 위해 별도의 컨트롤러를 구성하였으며, 가버너는 디지털 가버너를 선정하였고, 엔진속도를 제어하기 위한 알고리즘은 별도로 개발하여 활용 하였다. 또한, 가버너는 발전기 제어기, 전력관리시스템(PMS) 등과 같은 상위제어기에서 보내는 속도지령에 따라 엔진속도를 가변 제어하도록 설계 되었다. 부하변동에 따라 발전기의 엔진속도를 최적으로 변화시켜 연료소모량을 감소시킬 수 있도록 Fig. 1과 같이 제어 시스템을 구성하였다.

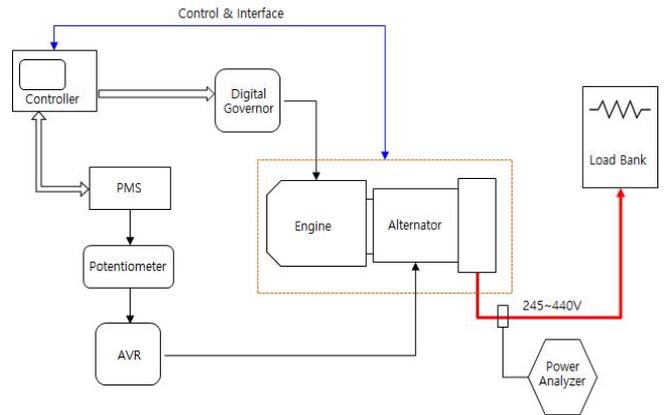


Fig. 1. Configuration diagram of adjustable variable speed generator.

가변속 발전시스템 개발을 위한 실험장비는 Table 1과 같다.

Table 1. List of experimental equipment

Item	Model	Spec.
Diesel Engine	P158LE-III	440VAC, 400kW, 1800rpm
Alternator	MJB355SB4	440VAC, 60Hz, 625KVA
Generator Controller	GNGC-100	2Port (DC 0V~10V or -5V~5V)
Digital Governor	GNDC-1000	Engine control: 0~3000rpm
AVR	M31FA600A MEC-20	±0.5% @ PF 0.8
PMS (Power Management System)	Developing	Digital&Analog In/Out
Potentiometer	CVR1	0~20kΩ

2.2 가변속 엔진속도에 따른 전압변동 특성

Fig. 2와 같이 가변속 발전시스템을 구성한후 엔진속도별 전압, 주파수 변동특성을 확인해 보았다. 직류배전 시스템에 구성하고자 하는 정류기(AC/DC Converter)의 경우 1차측 전압범위가 245VAC~500VAC 이내에서 2차측 전압 750VDC 유지할 수 있기 때문에 최초 1100 rpm에 구간에서 251 V를 확인하였으며, 100 rpm 단위로 엔진속도를 가변하였을 때 Fig. 3에서와 같이 전압 및 주파수가 가변되는 것을 확인하였다.

직류배전용 가변속 디젤발전기 개발에 관한 연구

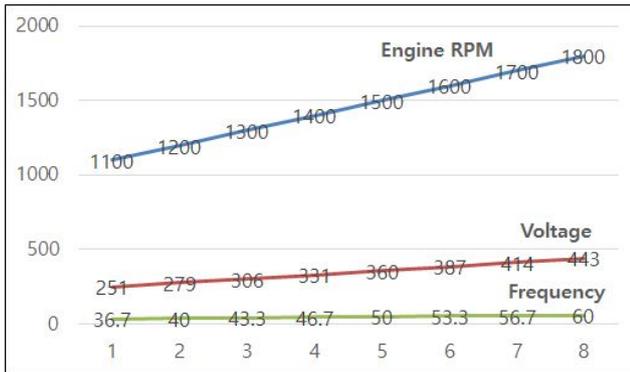


Fig. 2. Characteristics of voltage and frequency fluctuation according to engine speed.

엔진속도에 따른 전압 및 주파수 일정한 간격으로 가변되는 것을 확인하였지만, 로드뱅크를 이용한 부하변동 시험에서는 엔진속도 1100 rpm 구간에서 부하가 증가할수록 전압과 주파수가 급격하게 떨어지는 것이 확인되어 자동전압 조정기(AVR)을 이용하여 전압을 안정적으로 공급할 수 있는 방안이 검토되었고, Fig. 3과 같이 타여자 회로를 구성하여 시험을 진행 하였다.

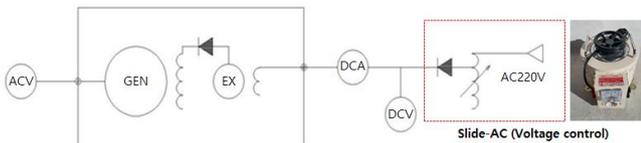


Fig. 3. Schematic diagram of separate excitation.

가변속에 따른 발전기측 전압을 조정하기 위해 AVR의 EX 입력부측에 저항을 이용하여 전압을 보상해 주기위해 전위차계(Potentiometer)를 구성하였으며, 발전기 전압에 따라 AVR 전압을 보상하기 위해 엔진속도(1100~1800[rpm])에 따른 기준 전압을 측정하고 전압변동에 따른 저항값을 Table 2와 같이 도출 하였다.

Table 2. 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 위해 상위 제어기인 PMS를 통해 부하변동에 따라 저항값을 가변시켜 입력하기 위한 전위차계(Potentiometer)를 구성하였으며, Fig. 4와 같이 가변속발전기 시험을 위해 시스템을 구축하고 엔진 가변속에 따른 전력특성을 분석하기 위한 실험을 진행 하였다.



Fig. 4. Test bed for Variable speed generator test.

2.3 부하변동에 따른 전압, 전류, 주파수 변동특성 분석

Fig. 5와 Fig. 6은 로드뱅크를 이용하여 부하를 0~400 kW까지 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 확인하였다.

전압은 251~440 VAC, 전류는 115~543 A, 주파수는 36~60 Hz까지 변동되는 것을 확인하였고 부하변동시 발전기엔진의 응답특성이 약간 늦기 때문에 전류가 먼저 올라가고 전압이 따라가면서 안정화 되는 것을 확인하였다.

기존의 상용화 되어 있는 발전기를 이용하여 부하변동시 엔진속도 가변속에 따른 발전기 출력 특성을 분석한 결과 그 유효성을 입증할 수 있었으며, 기존의 선박에 설치되어 있는 발전시스템의 경우 엔진가변속용 가버너와 기존 AVR에 전압보상 회로만 추가하여 개조하게 되면 가변속 발전기를 별도로 제작하는 방식에 비해 개조 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단되어 향후 이와 같은 가변속 발전시스템을 사용하는 배전시스템이 선박에 많이 적용될 것으로 사료된다.

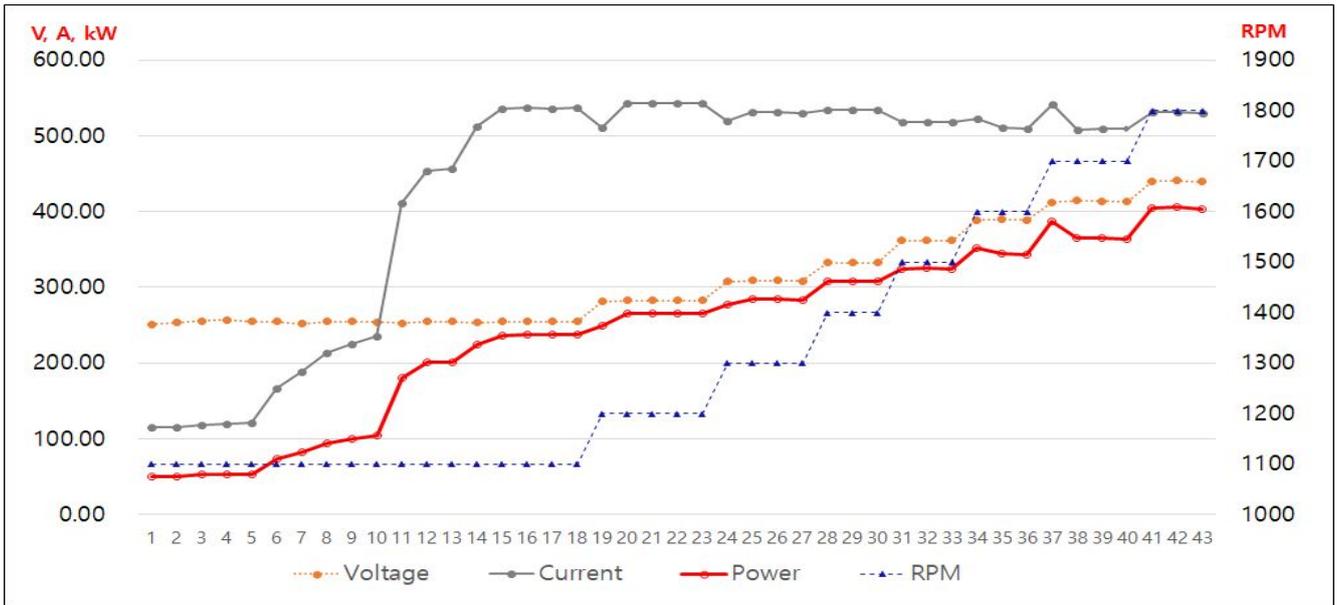


Fig. 5. Voltage, current characteristics at load change.

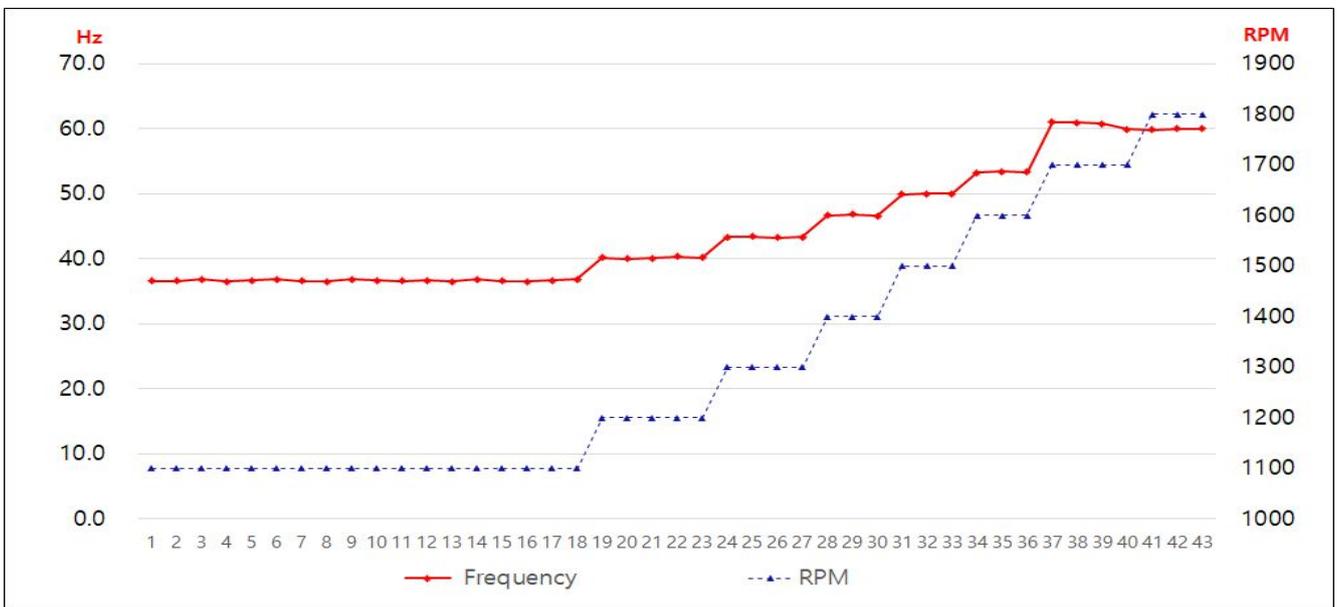


Fig. 6. Frequency characteristics at load change.

Fig 7은 총 부하량이 400[kW]의 70%인 0~280[kW]까지 부하를 서서히 증가시켰으며, 부하변동시 순간적으로 전류가 약 100[A] 정도 변동되는 것이 관찰되었지만, 시험환경 특성상 부하를 100[kW] 단위로 증가시키다 보니 이러한 특성이 관찰되었으며, 이후 부하가 일정하게 흐를 때는 전류가 안정적으로 유지되는 것을 확인하였기 때문에 부하를 서서히 증가 및 감소 시켰을 경우 이러한 과도특성이 나타나지 않을 것으로 판단된다.

3. 결론

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

직류배전용 가변속 디젤발전기 개발에 관한 연구

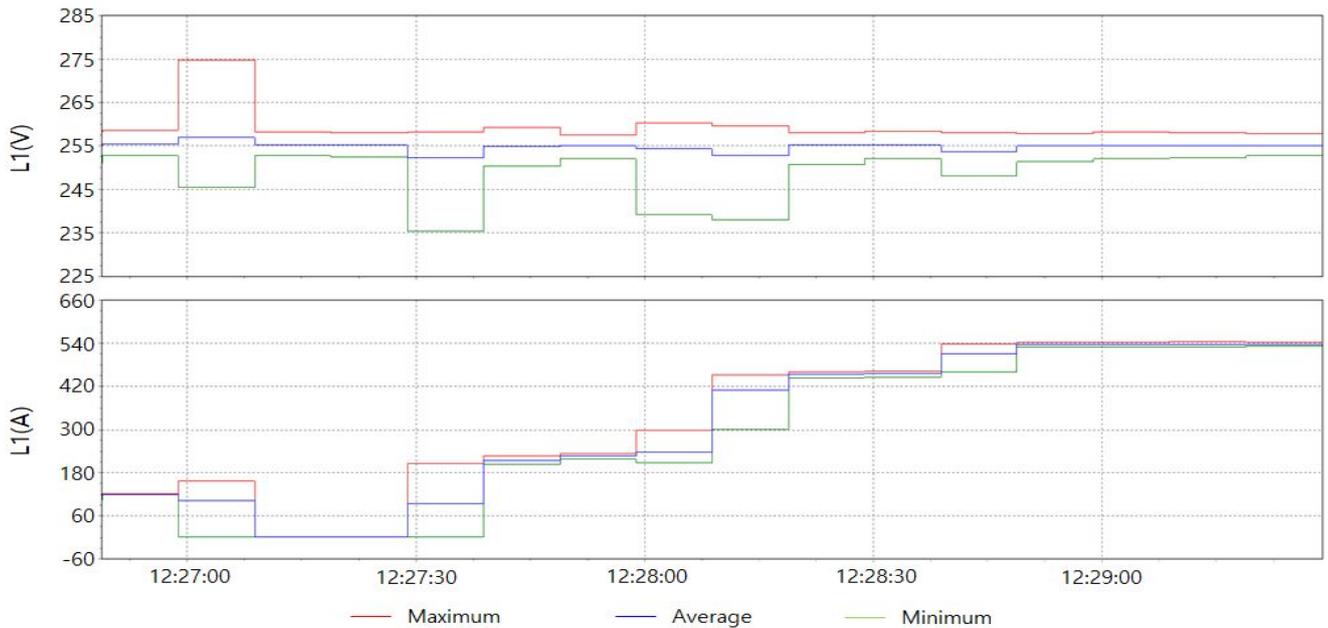


Fig. 7. Generator output voltage & current (1100 rpm).

엔진 속도에 따라 전압이 250~441VAC 범위내에서 안정적으로 변동되는 것을 확인하였으며, Fig. 7과 같이 과도상태에서 $\pm 20\%$ 이내에 안정화되고 부하가 일정할 때 전압도 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다. 주파수는 36~60 Hz 범위내에서 일정하게 변동 및 유지되는 것을 확인하였다.

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

이러한 가변속 발전을 선박에 적용하기 위해서는 발전기와 정류기의 연계특성 및 디젤발전기의 구간별 연료소모량을 계측하여 정확한 제어 포인트를 도출해내야 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.

사 사

본 논문은 산업통상자원부 산하 한국산업기술평가관리원 소관의 "20 MW급 선박용 직류기반 최적 전력계통시스템 개발" 과제 지원으로 작성된 논문임.

References

- [1] ABB(2015), Tests confirm up to 27% fuel savings on ships from Onboard ships from Onboard DC Grid report.
- [2] IMO(2014), IMO 2nd GHG Study Report.
- [3] Research report(2017), Development of a 20MW shipboard DC optimal power system.

Received : 2018. 12. 17.

Revised : 2019. 02. 20.

Accepted : 2019. 02. 25.