

선박용 복합동력 시스템 개발을 위한 실험적 연구

박기도¹ · 노길태² · 김경화³ · 안중우[†]

(Received December 2, 2016 ; Revised May 12, 2017 ; Accepted July 20, 2017)

Experimental study on development of a marine hybrid power system

Ki-Do Park¹ · Gill-Tae Roh² · Kyung-Hwa Kim³ · Jong-Woo Ahn[†]

요약: 본 연구에서는 선박용 복합동력 시스템 내 디젤발전기와 에너지저장장치인 배터리가 계통 연계 시 시스템의 전력 품질과 안정성을 확보하기 위한 계통연계 실험을 수행하였다. 이를 위하여 디젤발전기와 배터리 시뮬레이터로 구성된 복합동력 시스템 테스트베드를 구축하였고, 화물선의 실운항 데이터를 기반으로 하는 부하 시나리오와 5,500 TEU 컨테이너선의 운항 패턴을 기반으로 하는 부하 시나리오를 개발하였다. 모든 실험은 100분 이상 진행되었으며, 시스템의 전력 품질 및 안정성은 부하시나리오에 따른 각 동력원별 안정적인 부하분담 여부와 배터리의 계통 연결 시 전압 및 주파수 변동률의 선급 규정 만족 여부로 판단하였다. 그리고 본 논문은 디젤발전기와 배터리의 계통 연계 시 돌입 전류로 인한 시스템의 불안정성을 줄이기 위한 방안을 제시하였다.

주제어: 선박, 복합동력 시스템, 테스트베드, 계통 연계 실험, 안정성

Abstract: In this study, system interconnect tests were conducted to secure power quality and stability of the a hybrid power system when a diesel generator and a battery as an electric energy storage were connected to the system. For tests, a testbed of the hybrid power system consisting of the diesel generator and the battery simulator was established and two load scenarios based on real sailing data for a cargo ship and sailing modes for a 5,500 TEU containership were developed. Every experiment proceeded for over 100 minutes, and power quality and stability of the system were determined on whether each power source stably shares loads according to load scenario and whether variations of voltage and frequency when the battery connects to the system are satisfied with the classification society's rules. And this paper suggests the method to reduce the instability of the system due to inrush current generated when the diesel generator and the battery are connected to the system.

Keywords: Ship, Hybrid power system, Testbed, System interconnect test, stability

1. 서론

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 선박으로부터 배출되는 이산화탄소 배출량 감축을 위한 논의는 2008년 제57차 해양환경보호위원회(MEPC, Marine Environmental Protection Committee)에서 본격적으로 시작되었으며, 2012년 제62차 총회에서 2013년부터 건조되는 선박에 대하여 EEDI(Energy Efficiency Design Index) 규제를 단계적으로 적용하여 2030년까지 선박에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 기존보다 30% 줄이는 것을 목표로 MARPOL(International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships) ANNEX VI를 수정하였다[1][2].

이러한 국제해사기구(IMO)의 이산화탄소 배출량 규제에 대응하기 위해 조선 및 해운업계는 고효율 친환경 선박 기

술 개발에 커다란 노력을 기울이고 있다. 친환경 선박 기술 중 복합동력 시스템은 내연기관, 신재생에너지, 에너지저장장치 등 복수의 동력원으로 구성되어 운전 조건에 따라 단독 또는 동시에 선박의 추진용 혹은 선내용 전기를 공급하는 시스템을 말한다. 선박용 복합동력 시스템은 에너지 효율 증가, 대기오염물질 배출량 저감 등의 장점으로 인해 선박 적용에 대한 연구가 전세계적으로 진행되고 있다[3]-[5].

해외에서는 주로 운하가 발달한 유럽에서 이웃국가 간의 기술 교류 및 지속적인 정부 지원을 통해 복합동력 시스템 기반 전기추진선박 개발 및 실증 사업을 추진하고 있다 [6]-[8]. 대표적인 복합동력 시스템의 선박 적용 프로젝트는 노르웨이에서 진행된 FellowSHIP 프로젝트로 선박용 연료 전지 파워팩을 개발하여 해양지원선인 Viking Lady호에 탑

[†]Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7030-9087>): Machinery Rule Development Team, Korean Register, 36, Myeongji Ocean City 9-ro, Busan, 46762, Korea, E-mail: ahnjwoo@krs.co.kr, Tel: 070-8799-8796

1 Future Technology Research Team, Korean Register, E-mail: kdpark@krs.co.kr, Tel: 070-8799-8749

2 Future Technology Research Team, Korean Register, E-mail: gtroh@krs.co.kr, Tel: 070-8799-8761

3 Future Technology Research Team, Korean Register, E-mail: kimkh@krs.co.kr, Tel: 070-8799-8759

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.

제한 후 선박용 복합동력 시스템의 성능과 안전성을 실증하였다[7]. 이러한 실증 사업들을 바탕으로 해외에서는 대형 요트, 페리선, 예인선, 해양지원선 위주로 복합동력 시스템이 탑재되어 상업화되고 있다. 그러나 현재 디젤기관을 사용하는 일반 상선에 배터리를 적용하는 복합동력 시스템에 대한 연구는 아직 개발 초기 단계에 있다. 선박의 안전하고 효율적인 운항을 위하여 배터리 선박 적용 시 배터리의 화재 및 폭발에 대한 안전성 확보도 중요하지만 기존 디젤기관과 배터리의 계통연계 안정성 역시 필수적으로 확보해야 할 중요한 항목이다.

따라서 본 논문에서는 디젤발전기와 배터리로 구성된 복합동력 시스템의 계통연계 안정성을 실험적으로 고찰해 보고자 한다.

2. 복합동력 시스템 테스트베드 구축

2.1 테스트베드

복합동력 시스템 테스트베드는 선박의 발전시스템을 모사하여 현재 주로 선박의 주 발전원으로 사용되는 디젤발전기와 연료소모를 줄이기 위해 설치되는 배터리 간 계통연계 실험을 진행하기 위한 시스템이다. 테스트베드의 주요 구성품은 디젤발전기, 배터리 모사 시뮬레이터, 로드뱅크, 배전반, 제어 및 모니터링 시스템이다.

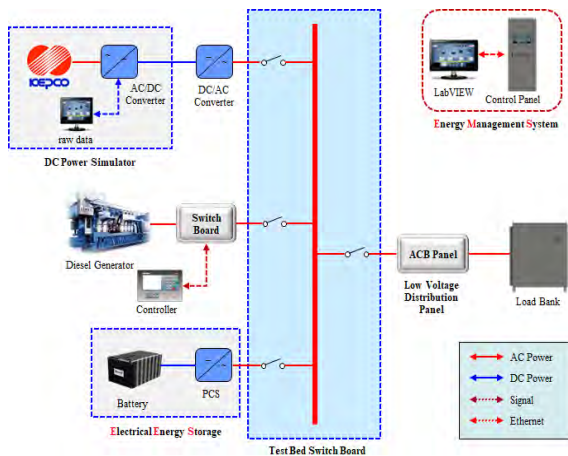


Figure 1: Testbed configuration of a hybrid power system

2.1.1 디젤발전기

디젤발전기는 선박에서 필요로 하는 전기를 공급하는 보편적인 발전원이다. 배터리 시스템과의 계통연계 특성 실험을 위하여 계통연계형 상시출력 3상 3선식 400kW급 영구자석을 이용한 회전계자형 디젤발전기가 제작되었다. 또한 선박 사용 환경을 모사하기 위하여 디젤발전기가 440VAC, 60Hz로 배전반에 출력을 공급하도록 설정하였다.

2.1.2 배터리 모사 시뮬레이터

배터리 종류에 따라 충전전 및 전력 특성이 다르기 때문에

여러 종류의 배터리의 특성을 모사할 수 있는 시뮬레이터를 제작하였다. 제작된 250kW급 배터리 모사 시뮬레이터는 한 전계통 전원을 이용하여 교류전력을 직류전력으로 변환시켜 리튬배터리에서 공급하는 직류전력을 모사하고, 이러한 직류전력을 별도의 제어장치를 통해 전압, 전류, 출력 특성을 가변하여 출력량을 제어하도록 구성되는 AC/DC Converter의 형태로 구성하였다. 그리고 시뮬레이터를 통해 출력되는 직류전력은 전력변환장치(Power Conditioning System)를 이용하여 선박 계통 전압에 맞도록 교류전력으로 변환된다.

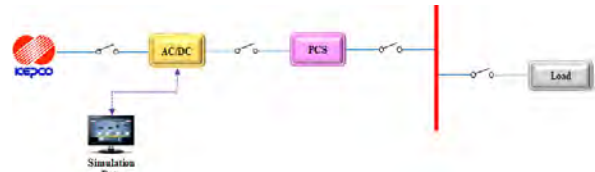


Figure 2: Configuration of a battery simulator

2.1.3 로드뱅크

로드뱅크는 복합동력원 테스트베드에 구축된 발전기와 배터리 모사 시뮬레이터에서 발생하는 전력을 시험하기 위해 전기부하를 제공하도록 고안된 장치이다. 이 실험에 사용된 로드뱅크는 선박의 부하 특성(440V, 60Hz)과 같은 부하를 1100kW까지 발생시킬 수 있다. 로드뱅크의 저장부는 Helical Type 소자를 이용한 구조로 되어 있으며, 저항소자는 내부식성에 강하고, 고유저항이 높으며, 온도상승에 대해 저항 변화가 적은 재질(FCHW-2, NCHW-1, NCA-CO, 4L)을 사용하여 설계/제작되었다. 또한 별도의 제어기(PLC)에 의해 시스템의 상태 감시 및 제어되도록 설계되어 있으며 부하 프로파일에 따라 부하시험을 할 수 있도록 구성되었다.

2.1.4 배전반

배전반은 디젤발전기와 배터리 모사 시뮬레이터를 연결하는 시스템으로 Magnetic switch를 통해 동력원들의 전력 공급을 on/off 하고, 과전압/과전류를 계측하여 차단하거나 전력 정보를 테스트베드의 제어 시스템으로 관련 정보를 전달하는 역할을 한다.

로드뱅크용 저압배전반은 기중 차단기로 구성되어 있으며, 로드뱅크의 전력 용량이 1MW가 넘기 때문에 대용량 차단기를 사용 하였다.

2.1.5 제어 및 모니터링 시스템

Figure 3과 같이 제어 및 모니터링 시스템은 테스트베드에 구축되는 동력원들의 전력데이터를 모니터링하며, 각각의 동력원들을 비롯한 전력장치들이 안정적으로 운영될 수 있도록 제어와 모니터링이 가능한 시스템이다.

제어 및 모니터링 시스템은 계통연계 시험 시 적용할 부하 패턴을 작성하고 이러한 부하 패턴에 따라 동력원들을 제어할 수 있도록 구성되어 있다. LabVIEW 기반 시스템은 다양

한 동력원들로 구성된 시스템으로, 계통연계 시험과 동력원 구성에 따라 시스템 환경설정을 할 수 있도록 구성되었다.

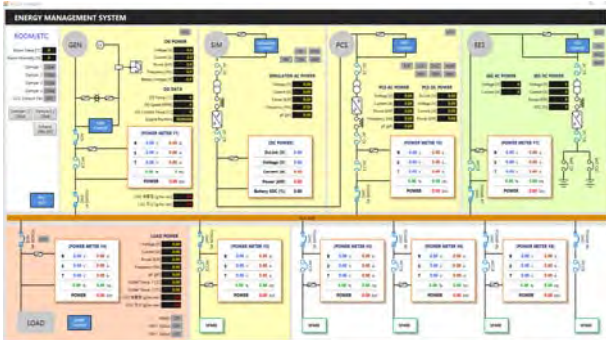


Figure 3: Configuration of a control and monitoring system

Figure 4와 같이 제어시스템에 사용된 제어 로직은 주어지는 부하량, 디젤발전기의 설정부하, 배터리의 잔존용량에 따라 개발되었다. 예를 들어 현재 출력량이 370kW 일 때, 400kW의 발전기는 최대용량 대비 80%인 320kW로 발전이 되고, 배터리는 SOC 30%를 기준으로 30%이상이면 디젤발전기의 발전량을 제외한 부하량에 해당하는 50kW를 방전한다 반대로 배터리의 SOC가 30% 이하일 경우 ESS는 충전모드로 전환되고 디젤발전기의 발전량은 370kW로 늘어나게 되고 발전 허용량인 400kW를 초과할 때는 부하량을 조절하도록 구성되어 있다.

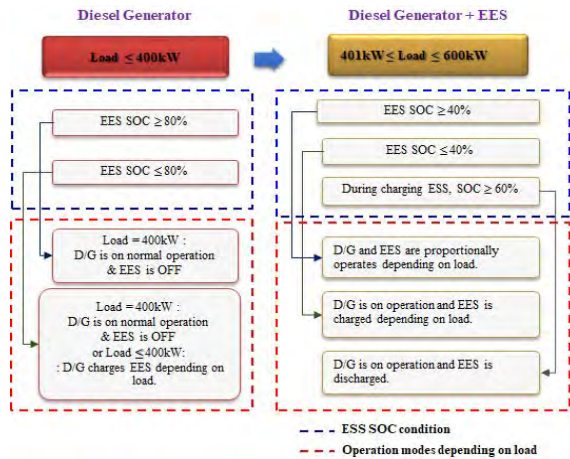


Figure 4: Control logic

3. 계통 연계 실험

복합동력원 계통연계 시험은 디젤발전기가 기저동력원으로 사용되고 있는 도중에 배터리가 계통에 연결될 경우 배전계통의 전력품질 요소에 대한 영향을 측정하고 분석하기 위해 수행되었다.

3.1 부하시나리오 개발

실제 선박의 운항데이터의 부하량을 구현하기가 실험실에서는 불가능하기 때문에 부하량을 축소된 부하시나리오를 개발하였다. 실험에 사용된 부하시나리오는 Figure 5 (a)

와 같이 실제 선박의 실시간 운항데이터를 분석하여 Normal seagoing 구간에서 부하변동폭이 심한구간을 선정하여 실시간 운항 부하 시나리오를 Figure 5 (a)와 같이 개발하였고, Figure 5 (b)와 같이 입·출항 및 하역구간에 대한 내용이 포함된 선박의 전체 운항패턴(Normal seagoing(with/without thruster), Port loading/unloading, Port in/out(with/without thruster))을 개발하였다. 이렇게 개발된 Load Scenario를 바탕으로 복합동력설비(발전기, 배터리시스템)를 선박에 적용하기 위한 부하변동 특성 분석, 동력원간 계통연계 특성을 분석하고자 하였다.

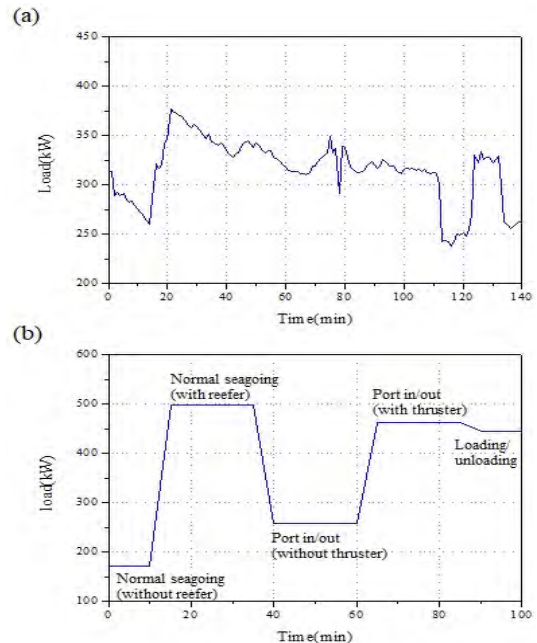


Figure 5: (a) Real sailing based load scenario, (b) 5,500 TEU Container's sailing pattern based load scenario

3.2 계통연계 실험

복합동력원 시스템은 디젤발전기를 기저동력원으로 사용하고 부하가 디젤발전기의 운전 용량(320kW)을 초과할 경우 배터리가 계통에 연결되어 필요로 하는 전력을 공급한다. 반대로 부하가 디젤발전기의 운전 용량보다 낮아 디젤발전기에서 잉여 전력이 발생하고 배터리의 잔존용량(SOC)이 80% 미만일 경우 잉여전력을 통해 배터리를 충전한다. 개발된 부하시나리오들을 복합동력원 시스템에 적용하여 각각 140분, 100분 동안 계통연계 실험을 수행하였다.

Table 1과 같이 5,500 TEU Reefer Container의 운항부하를 테스트베드 전력용량에 맞도록 일정 비율로 축소하여 도출하였으며, 부하값에 따라 디젤발전기와 배터리시스템이 연동되어 부하량에 따라 배터리시스템이 디젤발전기에서 공급되는 전력계통에 동기화되고 계통에서 이탈을 통해 기존 전력계통의 전력품질을 분석하고 디젤발전기와 배터리시스템이 선내 전체부하 변동에 따른 부하분담이 적절하게 이루어지는지에 대한 시험을 진행하였다.

Table 1: Driving time, output of each power source, and battery modes for each section according to the load

5,500 TEU Reefer Container			
Operation mode	kW	Time(min)	Note
Normal seagoing (without reefer)	171	10	D/G 171kW(Output)
Holding	498	5	D/G 170~320kW(Output), EES 0~178kW(Discharging)
Normal seagoing (with reefer)	498	20	D/G 320kW(Output), EES 178kW(Discharging)
Holding	258	5	D/G 320kW(Output), EES 178~62kW(Discharging to charging)
Port in/out (without thruster)	258	20	D/G 320kW(Output), EES 62kW(Charging)
Holding	463	5	D/G 320kW(Output), EES -62~143kW(Charging to discharging)
Port in/out (with thruster)	463	20	D/G 320kW(Output), EES 50kW(Discharging)
Holding	446	5	D/G 320kW(Output), EES 50~30kW(Discharging)
Load/unload	446	10	D/G 320kW(Output), EES 50~30kW(Discharging)
Total		100	

4. 실험 결과

4.1 실시간 운항 부하시나리오

실시간 운항 부하를 분석하여 부하변동폭이 심한 특정구간에 대한 부하시나리오를 테스트베드의 용량에 맞도록 스케일 조정을 하였다. 부하가 320kW 미만일 경우 디젤발전기가 모든 부하를 감당하였으며 320kW 초과 시 배터리 모사 시뮬레이터(PCS)가 해당하는 전력을 공급하였다.

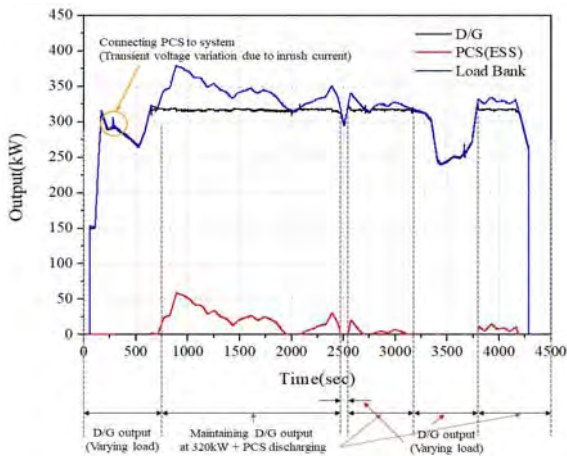


Figure 6: Output changes of diesel generator and PCS (ESS) on real sailing based load scenario

실시간 운항 부하시나리오에 대한 시험결과는 **Figure 6**에서와 같이 최초 부하상승 구간에서는 시뮬레이터와 연결된 전력변환장치(PCS)의 응답특성으로 인해 출력이 약간씩 지연되었지만 디젤발전기의 출력은 최대 322kW까지 상승하였고 안정적인 부하를 유지할 경우 316~317kW의 전력을 발전기가 공급하였다. 전체적으로 실시간 운항 부하시나리오의 부하변동에 따른 디젤발전기와 PCS 간 부하분담이 안정적으로 이루어졌다. 230초에서 디젤발전기와 PCS가 계통연계(전압 및 주파수 동기화)시 돌입전류로 인한 전압, 주파수, 전류 등이 순간적으로 올라가는 현상이 나타났다.

4.2 운항패턴 부하시나리오

Figure 8과 같이 5500 TEU 컨테이너선의 운항패턴 부하시나리오는 디젤발전기는 0~320kW 구간에서 출력을 내며, 321~380kW 구간에서는 배터리가 출력을 내었다. 전체 부하가 320kW를 초과하면 시뮬레이터와 연결된 전력변환장치(PCS)에서 방전 전력이 점차적으로 상승하고 전체 부하가 320kW 미만으로 감소하면 반대로 디젤발전기가 배터리의 잔존용량에 따라 잉여전력을 PCS로 공급하여 배터리를 충전한다.

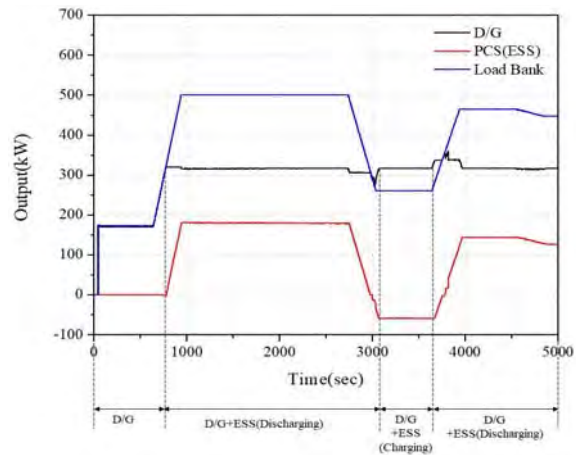


Figure 7: Output changes of diesel generator and PCS (ESS) on 5,500 TEU container's sailing pattern based load scenario

Figure 7는 부하상승 구간에서 PCS의 응답특성으로 인해 출력이 약간씩 지연되었지만 발전기의 출력은 최대 320kW까지 상승하였고 안정적인 부하를 유지할 때는 315~316kW를 발전기가 감당하였음을 보여준다. 반대로 5분 동안 전체 부하가 488kW에서 258kW로 서서히 감소하는 구간에서는 PCS가 320kW를 초과하는 부하에 대응하여 방전하다가 충전으로 모드변경이 이루어졌다.

이때 **Figure 8**과 같이 방전에서 충전으로 변경되는 지점에서 PCS에서는 에너지관리시스템(EMS)에서 설정된 대기시간과 PCS의 충/방전 모드변경을 통한 지연시간이 발생하였지만 안정적으로 충전되었다.

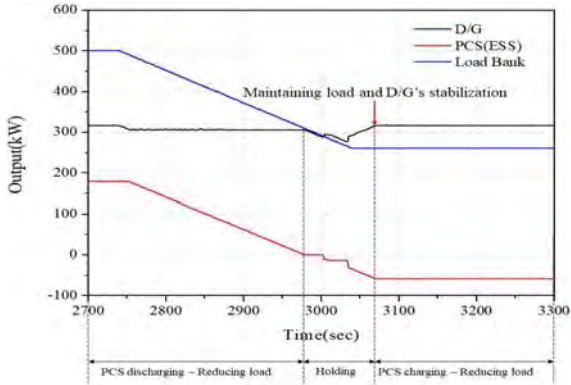


Figure 8: PCS mode changes (Discharging to charging) during load decrease

4.3 계통 연계 시 전압 및 주파수 변동

한국선급의 선급 및 강선규칙 제6편 전기설비 및 제어시스템[9]에서는 주전원으로부터 전기를 공급받는 모든 전기기기는 통상 그리고 순간적으로 발생하는 교류 전압 및 주파수 변화에 지장 없이 작동하여야 한다고 Table 2와 같이 규정하였다.

Figure 9은 부하가 디젤발전기의 출력을 초과하여 에너지 저장장치와 연결된 전력변환장치의 모드가 충전에서 방전으로 전환될 경우의 디젤발전기와 에너지저장장치의 동기화 현상을 보여준다. Figure 9 (a)와 같이 진동하는 에너지 저장장치의 주파수가 1.25초 이내에 디젤발전기의 주파수와 동기화됨을 확인하였다. 또한 Figure 9 (b)에서는 에너지 저장장치의 전압이 동기화 시 최대 18% 전압변동률을 보여주었고 1.25초 후 완전히 동기화되었다.

Table 2: Voltage and frequency variations for a.c. systems

Type of variations	Variations	
	Permanent	Transient
Frequency	± 5%	± 10% (5 sec)
Voltage	+ 6%, - 10%	± 20% (1.5 sec)

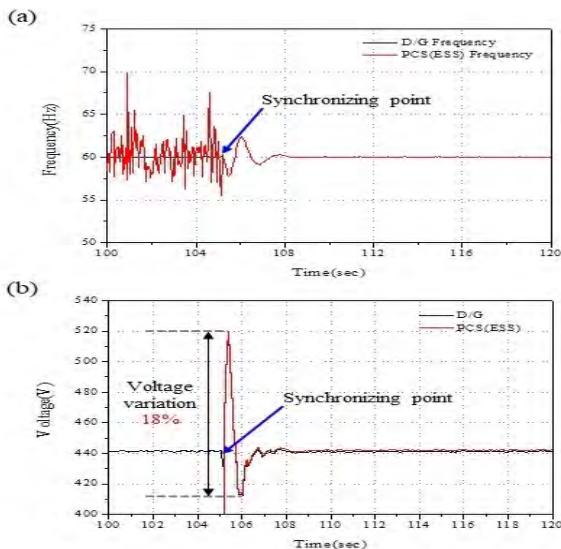


Figure 9: PCS mode change (Charging to discharging) during load increase

4.4 디젤발전기 & PCS 계통연계 시 돌입전류 문제

본 연구에서는 디젤발전기를 기저 동력원으로 구성하고 배터리 시스템의 PCS의 입력 측에 동기화하는 과정에서 IGBT소자 전단에 구성되어 있는 필터회로(리액터, 콘덴서)에 전원이 인가되는 과정에서 디젤발전기 기중 차단기가 트립이 발생하면서 시스템 전체가 정지가 되는 문제가 발생하였다.

오실로스코프를 이용하여 관련 사항에 대한 원인을 분석하던 중 Figure 10과 같이 초기돌입전류가 발생이 되면서 과전압 트립이 발생하였고, 초기 돌입전류 발생과 동시에 발전기 자동전압 조정기에서 순간적으로 전압을 상승시키는 과정에서 문제점이 발생 되는 것을 확인 하였다.

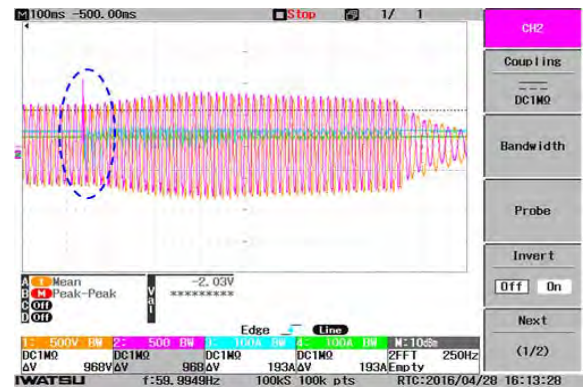


Figure 10: Overvoltage trip due to inrush current

이러한 문제점을 해결하기 위해 발전기의 자동전압 조정기의 파라미터값과 PCS 필터 부분의 수정을 통해 과전압 지속 시간을 줄여 문제점을 해결하였다. 계통전력이 한전 전력계통망과 같이 무한대의 전력망에서는 이러한 문제가 발생되지 않지만, 발전기를 사용하는 선박전력망에 PCS를 동기화 하는 과정에서 이러한 문제점이 발생할 수 있기 때문에 전력제어 및 컨버터 필터 설계 시 고려하여 전력계통망의 안정성을 확보해야 한다.

5. 결 론

본 연구는 선박 배출 대기오염물질 배출량을 줄이기 위하여 개발되는 디젤발전기와 배터리로 구성된 복합동력원의 계통연계 특성을 고찰하기 위하여 테스트베드를 구축하였고 계통 연계 시험을 수행하였다.

이 시험에서 디젤발전기와 배터리가 계통연계(전압 및 주파수 동기화)시 돌입전류로 인한 전압, 주파수, 전류 등이 순간적으로 급격히 증가하는 현상이 나타났다. 이러한 현상을 에너지관리시스템 및 전력품질분석시스템을 이용하여 분석한 결과, 최초 전력변환장치 입력단 고조파필터인 리액터와 콘덴서에 의해 이러한 현상이 발생하는 것으로 판단하였다. 발전기와 전력변환장치 간 계통연계 시 돌입 전류로 발생하는 현상은 한국선급에서 규정한 배전계통 전압 및 주파수 변동 기준을 만족하였지만, 계통 전력의 품

질에 영향을 줄 수 있어 발전기의 자동전압 조정기 설정값과 전력변환장치 입력단 필터 설계 시 이러한 부분이 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

복합동력원 계통연계 시험 결과를 통해 선박에서 발생하는 피크부하를 빠른 응답 특성을 가지고 있는 에너지저장장치를 활용하게 되면 기존 발전기 2대를 이용한 동력시스템을 사용하는 것보다 효율적이었다. 또한 에너지저장장치 활용을 통해 에너지를 효과적으로 절약할 수 있으며, 디젤발전기를 설계할 때 다운사이징으로 비용절감 효과도 있을 것으로 판단된다. 향후 구축된 테스트베드를 활용하여 복합동력원 구성 방식, 부하 시나리오 등 여러 가지 조건에서의 선박 에너지 효율 및 이산화탄소 감소 효과에 대한 성능 비교를 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 해양안전 및 해양교통시설기술 개발 사업의 친환경 TCS 시스템 구축 개발 과제로 수행된 연구 결과를 포함하고 있음을 밝힌다.

References

- [1] MARPOL Convention 73/78, ANNEX VI, IMO, London, 2013.
- [2] J. Herdzyk, "Emissions from Marine Engines Versus IMO Certification and Requirements of Tier 3," *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 18, no. 2, pp. 161-168, 2011.
- [3] J. L. Yang, D. Zhang, O. Caglayan, I. D. Jenkinson, S. BonSall, J. Wang, M. Huang, and X. P. Yan, "Selection of techniques for reducing shipping NOx and SOx emissions," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, no. 6, pp. 478-486, 2012.
- [4] G. Sattler, "Fuel cells on-board," *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1-2, pp. 61-67, 2000.
- [5] B. Zahedi, L. E. Norum, and K. B. Ludvigsen, "Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power system," *Journal of Power Sources*, vol. 255, no. 1, pp. 341-354, 2014.
- [6] S. K. Park, Y. J. Roh, and M. E. Kim, "A study on performance of solid oxide fuel cell stack for ship applications," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 406-413, 2011 (in Korean).
- [7] T. Tronstad and Ø. Endresen, "FellowSHIP - Fuel cells for low emission ships," *RISØ International Energy Conference*, pp. 23-25, 2005.
- [8] J. Schneider, S. Dirk, D. Stolten and T. Grube, "ZEMSHIP," *18th World Hydrogen Energy Conference*, pp. 16-21, 2010.
- [9] Rules and Guidance for the Classification of Steel Ships, Part 6, Ch. 1, page 13, Korean Register, 2017.