Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 8 pp. 962~968, 2013 ISSN 2234-7925 Print
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.8.962 ISSN 2234-8352 Online

펄스부하에 적합한 이차전지 연동형 선박 전력시스템에 관한 연구

오진석† · 이헌석[1]

(원고접수일 : 2013년 8월 6일, 원고수정일 : 2013년 10월 8일, 심사완료일 : 2013년 10월 29일)

A study on appropriate ship power system for pulse load combine with secondary battery

Jin-seok Oh† · Hun-seok Lee[1]

요약: 화석연료의 고갈에 따른 연료유의 가격상승과 세계온난화에 따른 그린하우스가스(Green House Gas, GHG)등의 문제가 주목받고 있다. 이러한 이유로 해상운송사업은 연료의 소비를 줄이고 환경보호를 위해 온실가스를 줄이기 위한 친환경선박(Green ship) 기술에 대하여 관심을 보이고 있다. 선박의 전력시스템은 안전한 운항을 위한 가장 주요한 요소 중 하나이다. 이러한 이유로 선박 설계에 있어 대부분의 선박은 바우 스러스터(Bow thruster, B/T), 크레인 등의 장비사용에 따른 피크부하로 인하여 큰 용량의 발전기를 사용하고 있다. 이러한 이유로 선박의 항해에 있어 대부분의 선박의 발전기는 저부하 운전구간에서 운전되게 된다. 50%또는 그 이하의 운전율인 저부하 운전에서는 발전기의 운전효율이 저하하게 되어 많은 연료유를 소비하며 발전기 수명에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 입출항이 비교적 많이 있는 컨테이너선박에 이차전지 적용방안에 대하여 연구하였다. 그 결과 이차전지를 적용하여 항해 중 발전기 운전율을 높이므로 연료 소비를 줄일 수 있음을 확인하였다.
주제어: 발전기 운전율, 이차전지, 선박 전력시스템, 친환경선박, 펄스부하

Abstract: Problem of greenhouse gases associated with global warming and the world rise in fuel oil prices due to the depletion of fossil fuel has attracted attention. For this reason, maritime transport business, has shown interest in green-ship technology to reduce the consumption of fuel and reduce greenhouse gas for environmental protection. Power system of the ship is one of the most important factors for safe operation. Therefore, at design of ship power system, most of existing vessel used comparative large capacity generator in order to respond peak load such as bow thruster, crane and etc. In the navigation of ship, marine generators most would be operated at low load operation. In the low load operation of the generation rate of 50% or less, the operation efficiency of the generator it deteriorated, to consume more fuel oil. It also, it means that adversely effect the life of the generator. In this paper, studied how to apply for a secondary battery in container ship that relatively frequent arrival and departure in port. As a result, in order to apply the secondary battery to increase the operating efficiency of the generator during the voyage, it was confirmed that it is possible to reduce fuel consumption.
Keywords: Generator load factor, Secondary battery, Ship power system, Green ship, Pulse load

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈에 따른 연료유 가격의 급

† Corresponding Author: Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: ojs@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4283
1 Department of Marine Engineering, Korea Marine Engineering University, E-mail: gar4153@naver.com, Tel: 051-410-4866

격한 상승과 지구온난화의 문제로 그린하우스가스(GHG, Green House Gas)를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 이유로 선박에 있어서의 온실가스 배출규제는 국제해사기구의 총회를 통하여 논의가 본격적으로 시작되었다. 따라서 해운사업에서는 보다 친환경적인 선박을 개발하기 위하여 많은 연구가 진행되었다**[1][2]**.

선박은 발전기를 기반으로 육상 전력시스템과는 다르게 독립적인 전력시스템을 구성하며, 선박의 운항 특성상 안전 운행을 위해 전력시스템은 매우 중요하다**[3]**. 전력시스템은 선박의 부하에 따라 큰 영향을 받으며, 선박 부하는 선박의 운항 상태(정박, 표류, Ancher 등)뿐만 아니라 계절(동절기, 하절기 등) 등의 요인으로 차이가 나게 된다. 특히 바우 스러스터(B/T)등의 전력소비가 큰 선박 펄스부하의 운용에 따라 선박에 탑재되는 발전기 용량 및 대수가 선정된다. 여기서 펄스부하란 선박 전체 전력시스템에서 단기간에 많은 전력을 소비하는 부하로서 바우 스러스터, 크레인(Crane), 연료운송 펌프(Pump) 등을 의미한다.

이러한 이유로 선박의 전력시스템은 선박의 운항 특성 등을 고려하여 안정적인 운항을 위해 다소 큰 용량의 발전기를 적용하게 된다**[4]**. 이에 따라 본 연구에서는 펄스부하(B/T)의 사용빈도가 비교적 많은 컨테이너 선박을 대상으로 이차전지(Lithium-ion Battery, LIB)를 적용하여 발전기 용량 및 설치대수를 감소시킴으로 연료유 소비를 줄이며 보다 친환경적인 선박 전력시스템을 제안하고자 한다.

2. 선박의 전력체계

2.1 전력시스템 구성

선박의 전력체계에 있어 발전기 용량 및 설치대수를 선정하는 것은 매우 중요한 부분이다. 선박의 발전기 선정은 선박의 운항 및 거주를 위해 다양한 전자기기의 운용이 가능한 발전기 출력을 가져야 한다. 따라서 선박의 발전기 용량의 결정은 전력 부하 분석(Electric power load analysis), 부하여유(Load margin), 발전기 안정성(순시 및 과도 현상에 대한 분석) 및 부하 용량에 대비한 발전기 적정 운전율 등을 종합적으로 반영하여 선정하게 된다**[5]**. 따라서 정확한 용량선정을 위해서는 발전기의 과도 리액턴스, 발전기 초기 과도 리액턴스, 최대 출력을 가지는 전동기의 출력 또는 전동기 군의 출력의 합, 시동 전력, 시동계수 등이 필요하지만 본 연구에서는 발전기 안정성에 대한 부분이 모두 만족한다는 가정아래 선내부하 및 발전기 부하를 기준으로 연구를 진행하였다.

Figure 1은 일반적인 상선에서 적용되고 있는 전력구성으로 디젤발전기로 이루어진 발전부, 각 장비들의 전압, 및 주파수에 맞도록 변환시켜주는 변환부, 최종 전력 소비자인 부하부로 나뉜다. 이 외에도 대용량 전동기를 사용함으로서 필요한 역률 보상기 등의 추가적인 전력시스템이 필요하다.

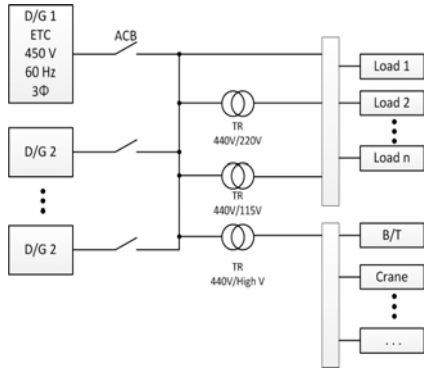

Figure 1: Typical power system

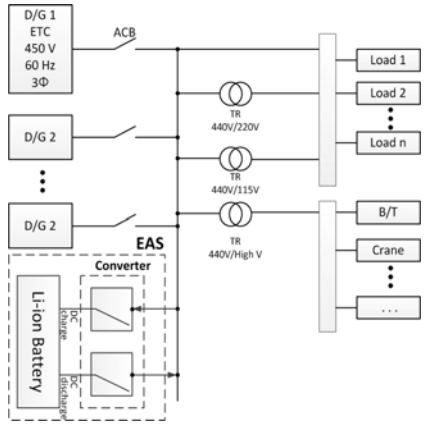

Figure 2: Proposed power system

최근 전동기 기술의 발전으로 추진 디젤엔진을 대용한 전기추진선박에 대한 관심이 증가하면서, 선박 내 전동기 등으로 인한 전력 변동률은 더 커질 것으로 예상된다. 이에 따라 본 연구에서는 **Figure 2**와 같이 기존의 전력시스템에 이차전지를 연동한 전력시스템을 제안한다. 제안하는 전력시스템의 설계를 위하여 본 연구에서는 펄스부하(B/T)의 발생빈도가 높은 컨테이너 선박을 대상으로 전력시스템을 설계하고자 한다.

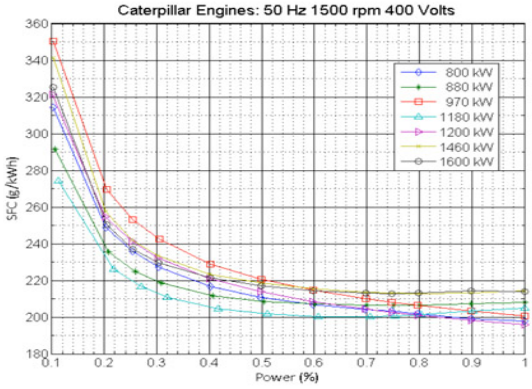

Figure 3: Diesel generator SFC curve**[6]**

선박은 독립적인 전원체계를 가지므로 선박 초기 설계 건조비용, 운항비용 및 장비의 유지비 등을 고려하여야 전력시스템을 구성해야 한다. 선박에 설치되는 4행정 발전기의 효율은 **Figure 3**과 같이 나타낼 수 있다. **Figure 3**은 발전기 출력별 SFC(Specify Fuel Consumption) 곡선을 나타내며, 발전기 부하율(%)이 높을수록 효율이 좋다는 것을 확인할 수 있다.

선박에 설치되어 운전되는 발전기의 경우 **Figure 3**에서 나타나듯이 높은 부하율에서 운전되는 것이 유리하지만, 펄스부하로 인한 갑작스런 과부하 등에 대한 대비가 필요하므로 선박의 전력체계를 설계할 때는 다양한 운항환경을 고려하여 설계하게 된다. 이처럼 발전기 용량 선정에 있어서 선박 운항환경을 고려하여야하기 때문에 실제 운항중인 컨테이너 선박을 대상으로 운항 특성을 조사하였다.

Table 1은 H 선박회사의 컨테이너 선박의 대표적인 표본을 추출하여 선박의 전력사용량을 나타낸 것이다. 컨테이너 선박의 일반적인 운항 특성을 파악하기 위해 9대의 컨테이너 선박에 대하여 데이터 수집, 분석을 진행하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 1: Vessel operated power status (H Shipping company)

Before B/T St'by G/E operation number ×load	B/T St'by Time × G/E operation number ×load	B//T operation mode, G/E total load	
1-set × 880 KW	2-hour × 3-set × 490 KW	FULL, 1460 KW ~2380 KW	Bow Motor 2000 KW **Generator 3300 KW**
1-set × 974 KW	13-hour × 3-set × 400 KW	FULL, 1410 KW ~2895 KW	
1-set × 1126 KW	2-hour × 3-set × 520 KW	FULL, 1539 KW ~3250 KW	
1-set × 1090 KW	1.5-hour × 3-set × 540 KW	FULL, 1630 KW ~3350 KW	
1-set × 930 KW	1.5-hour × 3-set × 430 KW	FULL, 1303 KW ~3100 KW	
1-set × 990 KW	3-hour × 3-set × 427 KW	FULL, 1413 KW ~3020 KW	
2-set × 1150 KW	0.8-hour × 3-set × 933 KW	FULL, 5000 KW	Bow Motor 3000 KW **Generator 1700 KW**
2-set × 1110 KW	0.8-hour × 3-set × 900 KW	FULL, 5250 KW	
1-set × 1530 KW	0.8-hour × 3-set × 667 KW	FULL, 4100 KW	
1-set × 1800 KW	1.0-hour × 3-set × 733 KW	FULL, 4500 KW	
2-set × 1380 KW	0.4-hour × 3-set × 1000 KW	FULL, 5100 KW	
2-set × 1350 KW	0.8-hour × 3-set × 983 KW	HALF, 4200 KW	

Table 2: Container vessel operation properties

Item	Ratio%)
Arrival and departure time (Less than 2-hour)	78%
B/T Load 사용 시간 (Less than 40-minute)	84%
Time ratio of B/T using time of B/T St'by time (Less than 40-minute)	65%
Load factor of the generator per unit less than 50% of seagoing	85%
Load factor of the generator per unit at B/T full load of arrival and departure	55%

Table 2에서 나타내듯이 선박의 총 운항 기간 중 입· 출항 기간은 매우 짧은 시간이며, 입·출 항시 사용되는 기기들(B/T, 송풍기(Aux. Blower), 각종 펌프 및 팬(Fan) 등)의 운전을 위해 피크부하에 대응 가능한 비교적 큰 용량의 발전기가 설치됨을 확인할 수 있다**[7]**.

$$PG[kVA) \geq P_n \times \beta \times C \times x_d\left(\frac{1-\triangle V}{\triangle V}\right) \quad (1)$$

PG : 발전기 출력

P_n : 시동전력이 최대인 전동기 or 전동기군 출력

β : 전동기 $1[kW]$당 시동 전력 $[kVA]$

C : 시동계수(직입 : 1.0, $Y-\triangle$: 0.67)

$\triangle V$: P_n 전동기 투입시 단자허용전압가항

x_d : 발전기 과도 리액턴스

식 (1)에 따라 발전기 용량을 선정함에 있어 입·출항시 사용되는 바우 스러스터 구동용 전동기의 경우 대용량 전동기이므로 큰 용량의 발전기가 필요하게 된다. 이외에도 컨테이너 선박의 경우 일반 항해에 있어 선박부하에 큰 영향을 주는 것은 냉동 컨테이너(Reefer container, REF)로 냉동 컨테이너 화물 수에 따라 발전기 부하율은 많이 변동하게 된다. 이에 따라 대부분의 컨테이너 선박은 발전기 부하율 50%이하의 저부하 운전을 하게 된다. 이러한 발전기 저부하 운전은 발전기 운전 효율(SFC)이 좋지 않을 뿐만 아니라 발전기에 좋지 않은 영향을 미치게 된다**[8]**.

선박에 이차전지를 고려하여 발전기 용량 선정 및 전력시스템을 설계한다면, 발전기 저부하 운전을 방지하며, 펄스부하에 대한 전력 안정성 및 전력 품질을 개선시킬 수 있으며, 보다 효율적인 발전기 부하율에서 발전기 운전이 가능하다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

선박에 이차전지 적용성 검토를 위해 기존에 일본에서 진행되었던 이차전지를 적용한 하이브리드 선박 조건을 분석하였다. **Figure 4**는 실 선박의 사진이며, **Table 3**은 Emerald Ace의 기초 자료를 나타낸다.

Table 3과 같이 2.2MWh의 용량을 가지는 이차전지를 적용한 선박이 2012년 시운전을 적용한 사례가 있다.

Figure 4: Hybrid vessel emerald ace

Table 3: Emerald ace specification

Ship type	Vehicle carrier
Year build	2012
Solar power	160KW(768 solar power panels)
Battery capacity	2.2MWh
Battery configuration	324,480 ×"18650" cylindrical cells

본 장에서는 S중공업에서 제작되었던 컨테이너 선박을 대상으로 하여 이차전지 적용 방안에 대하여 검토한다. **Table 4**는 검토 대상 선박 조건을 나타낸다.

Table 4: Target vessel specification

Peak load at seagoing	7,333 kW
Average load at seagoing	7,145 kW
Peak load at harbor	7,801 kW
Average load at harbor	7,478 kW
B/T St'by power consumption	587,4 kW
B/T rated power consumption	3,000 kW
arrival and departure time	60 min
B/T full load operation time	30 min
B/T operation voltage	6,600 V
B/T no-load current consumption	89 A
B/T rated current consumption	314 A
B/T starting current consumption	1,727 A

선박에 이차전지의 적용을 위해서는 이차전지에 충·방전 비율(C-rate)를 참고하여 적용 타당성을 검토하여야 한다.

$$C-rate = \frac{\text{충 • 방전전류}(A)}{\text{전지의 정격용량}} \quad (2)$$

충·방전 비율(C-rate)이란 **식 (2)**와 같이 이차전지의 총 충·방전 전류/전지의 정격용량을 계산한 값으로, 이차전지의 다양한 사용조건 하에서의 전류값 설정 및 전지의 사용가능 시간을 예측하거나 표기하기 위해 사용된다. 따라서 이차전지의 출력은 이차전지 셀(Cell)의 직·병렬 개수와 충·방전 비율(C-rate)에 따라 결정되게 된다. 이차전지의 경우 제품에 따라 셀(Cell)용량과 충·방전 비율(C-rate)이 다양함으로 필요 이차전지 용량에 맞는 제품을 사용하면 될 것으로 판단된다.

3.2 시뮬레이션

시뮬레이션은 NI사의 LabVIEW 프로그램을 이용하여 진행하였다. 시뮬레이션 조건은 **Table 4**에 나와 있는 선박을 기준으로 선박에 설치되는 발전기 용량을 변경시킴으로 필요한 발전기 대수와 이차전지 용량에 대하여 검토하였다. 발전기의 최대 부하율은 전력여유분(Load margin)을 두어 85%이상의 과부하 운전을 방지하기 위하여 과부하 운전이 되지 않는 범위 내에서 시뮬레이션이 진행되도록 하였다. **Figure 5**는 시뮬레이션의 블록다이어그램을 나타낸다.

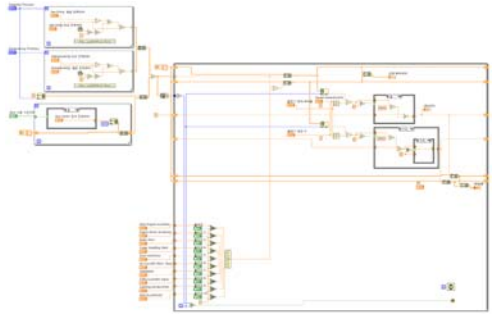

Figure 5: Simulation block diagram

시뮬레이션에 있어 이차전지 출력 C-rate는 무한대로 가정하였고, 바우 스러스터의 유휴상태(unload)에서는 발전기의 부하율이 낮을 경우 이차전지를 충·방전 비율(C-rate)로 충전하도록 하여 필요한 이차전지 용량을 선정하였다. **Figure 6**은 시뮬레이션의 프런트패널을 나타낸다.

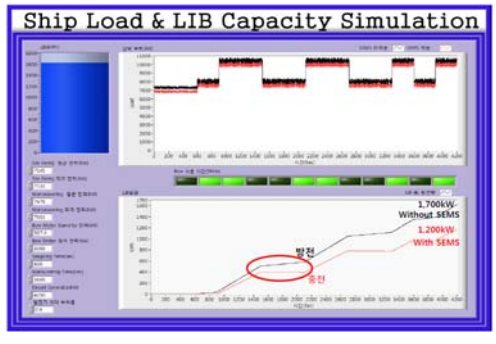

Figure 6: Simulation front panel

3.3 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션은 **Table 4**와 같이 S중공업에서 건조된 컨테이너 선박의 SEL(Ship Electric Load)분석 결과표를 바탕으로 하여 실현가능한 발전기 용량을 적용, 변경시켜가면서 이차전지 용량선정을 하였다.

Table 5: Result of simulation

Condition	Required battery capacity
Generator capacity : 4,250kW Number of operation Generator : 2-Set	1,700 kWh
Generator capacity : 4,500kW Number of operation Generator : 2-Set	1,200 kWh
Generator capacity : 4,750kW Number of operation Generator : 2-Set	800 kWh
Generator capacity : 2,900kW Number of operation Generator : 3-Set	1,500 kWh
Generator capacity : 3,000W Number of operation Generator : 3-Set	1,250 kWh
Generator capacity: 3,100kW Number of operation Generator : 3-Set	1,050 kWh
Generator capacity : 3,250kW Number of operation Generator : 3-Set	850 kWh

시뮬레이션 결과 S중공업에서 기존에 설계 시 설치하였던 발전기 4대에서 이차전지를 적용함으로서 설치 발전기 대수를 3대 또는 그 이상 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한, 이차전지 용량 결과 Emerald ace 자동차 운반선에 비하여 필요한 LIB용량이 크지 않음으로 충분히 이차전지 적용 타당성이 있다고 판단된다. **Table 5**는 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

발전기 용량을 크게 하여 설치 대수를 줄일 경우 선박의 공간적인 부분과 적은 초기 투자비 면에서 장점을 가지나 선박 부하가 작은 항해 및 정박시에 발전기 부하율이 50%이하의 저부하 운전으로 발전기 문제 발생가능성이 있다. 발전기 용량을 줄이고 발전기 설치 대수를 늘렸을 경우 낮은 부하에서도 높은 효율을 보장하므로 운항유지비 측면에서 유리하나 다수의 발전기 설치에 따른 공간적 문제, 초기 설치비용 등의 단점을 가진다.

본 연구의 결과를 바탕으로 추후 연구에서는 선박의 초기 투자비, 이차전지를 적용함으로서 연료수비율 감소로 인한 유지비, 이차전지 수명, 연료유 가격 등 여러 환경조건을 고려한 최적의 발전기 용량, 대수 및 이차전지용량을 선정하는 연구가 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

후기

본 논문은 국토해양부의 해양에너지 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] S. H. Kim and C. D Go, “Eco-friendly ship with the concept of sustainable development trends” Socielty of Naval Architect, vol. 40, no. 2, pp. 75-84, 2003 (in Korean).

[2] B. R. Yoo, “The evolution of eco-friendly shipbuilding technology”, Korea maritime institute, Maritime homeland, vol. 21, no. 6, pp. 42-52, 2010 (in Korean).

[3] B. Kim, J. S. Lee, and J. S. Oh, “A study on the relationship of ship automation system and safety”, Journal of the korea society of safety, vol. 22, no. 6, pp. 69-73, 2007 (In Korean).

[4] J. S. Oh, H. S. Lee, S. Y. Jung, H. Kang, D. Y. Park, and S. M. Sung, 2013 Eco-Friendly Advisory Project Report (Energy Storage Technology), Samsung heavy industries, 2012 (in Korean)

[5] J. Daniel, “Integrated power system modeling and simulation”, Electric ship technologies

symposium, pp. 90-95, 2011

[6] The University of Texas, http://www.utexas.edu/rese-arch/cem/Green_ship_pages/Diesel_generator_set.html, Accessed October 12, 2013

[7] M. Qian, Z. G. Wu, and J. G. Han, “Real-time simulation and analyses of ship energy management system network” ELSEVIER, vol. 10, no. c, pp. 1972-1978, 2012

[8] J. D. Kim, G. S. Jung, J. E. Lee, Y. H. Song, C. H. Jung, and J. S. Choi, “Low load operation of marine auxiliary diesel engines”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 2010 spring proceedings, pp. 189-190, 2010 (In korean)