

친환경 선박용 전기추진시스템 안전성 향상 기술개발 동향

Trends in safety improvement technologies for an electric propulsion system of eco-friendly ships

김 세 환*, 최 길 수**, 이 재 석***★

Sehwan Kim*, Gilsu Choi**, Jae Suk Lee***★

Abstract

This paper presents trends of safety improvement technologies for an electric propulsion system of eco-friendly ships. As an effort to reduce a green house effect, demands for eco-friendly ships have been increased. An energy storage system (ESS) is one of key systems in an eco-friendly ship and a lithium-ion battery generally used in an ESS system due to its high power density and efficiency. However, a lithium-ion battery is considered as one of reasons for ESS fire hazard. Since a fire extinguishing facility is especially limited in the ocean, safety issue in an eco-friendly ship is important. In this paper, recent safety improvement technologies for traction motors, ESS batteries and structures for eco-friendly ships are presented.

요 약

본 논문에서는 친환경 선박용 전기추진시스템의 안전성 향상 기술개발 동향에 대해 조사하였다. 온실효과 및 탄소배출량 감축을 위해 친환경 전기선박에 대한 수요는 점차 늘어날 전망이다. 친환경 전기선박의 주요 구성요소 중 하나인 에너지 저장장치에는 에너지밀도와 효율이 높은 리튬이온 배터리가 일반적으로 사용된다. 하지만 리튬이온 배터리는 에너지 저장장치의 주요 화재원인 중 하나로 지목된다. 항해 중인 선박에 화재 발생 시, 화재진압을 위한 소방설비 및 소방작업이 제한되어 친환경 선박에서의 안전성 향상기술은 더욱 중요하다. 본 논문에서는 친환경 선박의 안전성 향상을 위한 전기추진모터 및 에너지저장장치에 적용되는 최신 기술에 대해 조사 및 분석을 진행하였다.

Key words : Eco-friendly ships, Energy storage system, Lithium-ion battery, Redox flow battery, Electric ship propulsion system

* Korea Institute of Machinery & Materials
** Dept. of Electrical Engineering, Inha University
*** Dept. of Electrical Engineering, Jeonbuk National University

★ Co-corresponding author
E-mail : gchoi@inha.ac.kr, jaesuk@jbnu.ac.kr,
Tel : +82-32-860-7412, +82-63-270-2398

※ Acknowledgment
This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2020R1C1C1013260).
Manuscript received Aug. 20, 2021; revised Sep. 7, 2021; accepted Sep. 8, 2021.

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.

1. 서론

환경보전에 대한 관심의 지속적 증가와 함께 점차 엄격해지는 국제규제로 인해 해운에서도 기존 디젤 기반의 선박 연료를 친환경 대체 에너지로 전환해야 하는 시대가 도래했다[1]. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 지난 2018년 4월에 2050년 국제 해운 온실가스(Green House Gas, GHG) 총 배출량을 2008년 대비 50%로 감축하겠다는 목표를 설정하였으며[2](그림 1), 이에 대한 조치로 “선박 에너지 효율 설계 지수(EEDI)”와 “선박 에너지 효율 지수(EEXI)”, 그리고 “선박 탄소집약도지수(CII)” 등의 규제가 시행될 것을 예고하였다. 이를 만족하기 위해 선박에서는 액화 천연가스

(LNG) 및 LPG 추진시스템으로 대응하고 있지만 지속적으로 강화되는 IMO규제를 만족할 수 없으며, 가장 현실적인 대안 중 하나로 전기 추진선이 차세대 친환경 선박으로 주목받으며, 배터리 구동 선박의 수가 급증하고 있다(그림 2)[3].

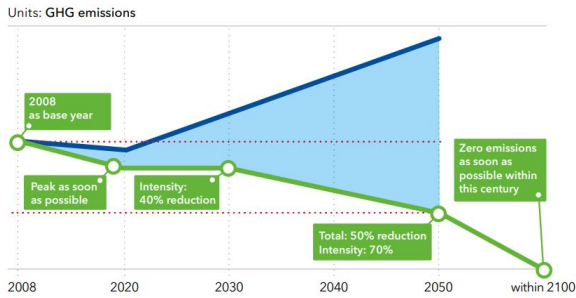


Fig. 1. IMO strategy for major reductions in GHG emissions from shipping (Source : DNV GL).

그림 1. IMO의 선박 온실가스배출 주요저감전략



Fig. 2. Ships with batteries in operations and in order per February 2019.

그림 2. 2019년 02월 대비 운항 또는 건조중인 배터리 탑재 선박수

환경적인 측면 이외에도 전기추진 방식의 장점은 추진성능 향상, 공간활용 개선, 안정성 및 신뢰도 향상, 에너지효율 개선 등이 있으며, 선박의 전기화로 인해 선내 통합전력시스템(integrated power system) 또한 보다 유연한 전기에너지의 공급이 가능한 형태로 진화할 수 있다. 그림 3은 상선, 크루즈선, 군함을 예로 들어 선박 추진 시스템이 증기·기계 동력 중심에서 전기 기반으로 진화하는 과정을 보여준다[4].

한편, 친환경 선박용 추진시스템 개발에서 가장 우선으로 고려되어야 할 부분은 안전성의 확보이다. 이는 전기자동차 등의 육상 교통수단과 비교했

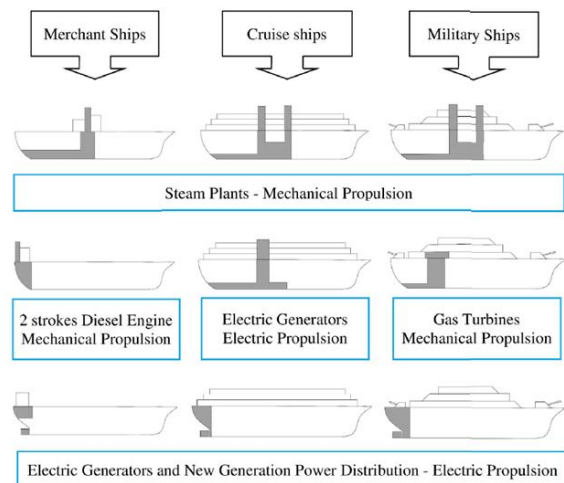


Fig. 3. The evolution of ship propulsion systems.

그림 3. 선박추진 시스템의 진화 과정[4]

을 때 선상의 고장 및 화재 사고는 막대한 금전적 피해는 물론이거니와 인명 사고로까지 이어질 수 있기 때문이다. 이에 본 논문에서는 선박용 전기추진시스템의 핵심부품의 안전성 향상 기술개발 동향에 대해 살펴보려고 한다.

II. 본론

1. 전기추진시스템 핵심부품

선박용 전기추진 시스템은 추진전동기와 전력을 저장하는 ESS(Energy Storage System) 등으로 구성된다. 이들 핵심부품으로 시스템을 구성할 때, 동

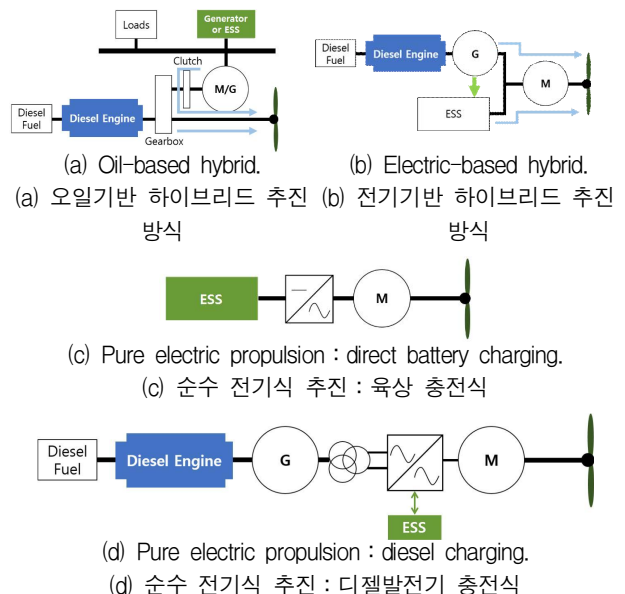


Fig. 4. Classification of electric ship propulsion systems.

그림 4. 동력전달 방식에 따른 선박용 전기추진시스템 분류

력이 전달되는 방식에 따라 선체 내부의 엔진 동력 원으로부터 축계를 통해 프로펠러로 동력을 전달하는 전통적인 기계식, 전력선을 통해 외부의 추진 전동기로 전기에너지를 전달하는 전기식, 그리고 기계식과 전기식을 혼합한 하이브리드 추진방식의 세 가지로 분류할 수 있다.

1.1 선박용 추진 전동기 동향

전기식 추진 장치의 경우 직접 구동(direct drive) 방식이 일반적이므로 대부분의 추진 전동기는 주로 저속, 고평크 영역에서 동작한다. 대형선박은 최소 2개 이상의 추진기를 탑재하고 있으며, 추진 전동기는 주로 100~300rpm 및 5~50MW의 범위에서 동작한다. 한편, 중소형 선박의 경우 속도-토크의 범위가 더 다양하며, 대형선박 대비 상대적으로 고속, 저토크 및 경부하 영역에서 더 빈번하게 동작한다. 선박용 전동기의 경우 육상 조건과 비교했을 때 외부 환경이 열악하며, 공간 문제로 인한 유지보수의 어려움 등을 설계 단계에서 고려해야 한다.

선박의 고유한 운전 특성을 고려한 설계 조건을 만족시키기 위해 직류 전동기, 농형 유도기, 권선형 동기, 영구자석형 동기, 초전도 전동기 등 다양한 종류의 기기들을 고려할 수 있다. 직류 전동기의 경우 정기적인 유지보수와 낮은 출력밀도의 단점에도 불구하고 속도제어의 용이성으로 인해 일부 선박에서 여전히 사용되고 있다. 유도전동기의 경우 구조가 단순하고 제작비용이 상대적으로 저렴하여 전기선박에 다양하게 적용되고 있다. 공극이 커질수록 역률이 낮아지는 단점으로 대형화가 어려운 단점이 있지만 최근 ALSTOM, GE 등에서 제작한 수십 MW급 유도전동기의 개발사례가 보고되고 있다[5, 6]. 권선형 동기기의 경우 높은 출력에도 역률 제어가 가능한 장점이 있어 다수의 제작사가 수십 MW급 시스템의 일반적인 솔루션으로 제시하고 있다. 영구자석형 동기전동기는 고효율, 고출력밀도 특성으로 인해 소형화, 경량화에 유리하다. Rolls-Royce[7], Siemens, ABB 등에서 제작한 영구자석형 전동기의 사례가 다수 있지만, 희토류 문제 및 제작 기술의 한계로 인해 초대형화에는 아직 어려움이 있다. 초전도 동기기는 월등한 출력밀도가 가능하므로 대형선박 용도로 활발하게 연구되고 있지만, 상용화 이전에 대용량 냉각시스템, 단열구조 등의 문제점을 극복할 필요가 있다.

국내 주요 조선사들은 최근 대형 전동기 관련 기술을 보유한 중공업 회사들과 협업하여 수 MW급 축 발전기를 개발하는 등 친환경 전기 선박 핵심 장비의 국산화를 추진 중이다.

1.2 선박용 ESS 동향

친환경 선박의 다양한 추진시스템 분류에도 불구하고 공통적으로 탑재되는 핵심부품 중 하나가 ESS이다. 엔진이 발전원이 되는 하이브리드 추진 시스템에서조차 ESS가 탑재되는 이유는 발전기의 탈락, 추진부하의 급격한 증가/감소 등으로 인한 전력품질 저하를 막기 위함이다. 최근에는 대용량 ESS를 탑재하여 직류(DC) 기반으로 운영하여 엔진 가변속을 통해 연료소비량을 더욱 절감할 수 있는 DC 전기추진선이 새롭게 등장하여 점차 적용이 확대되고 있다[8].

현재 개발 중인 모든 선박용 ESS에는 리튬이온 배터리(Lithium-ion Battery, LiB)가 탑재되고 있다. LiB는 가볍고 에너지밀도가 높은 등 다양한 장점으로 인해 전자기기, 전기자동차 및 다양한 스마트모빌리티의 전력저장장치에 적용되었다. 반면, 인화성 전해액을 사용하여 온도에 민감하고, 과방전 시 용량 감소가 매우 크고, 과충전 시에는 매우 불안정해져서 내부 전극의 쇼트 혹은 외부 충격에 의해 폭발 또는 화재로 이어지는 등 시스템의 안전성을 위협하는 치명적인 단점들이 있다.

2. 선박용 전기추진모터 안전성 향상 기술

앞서 기술한 바와 같이 선박용 전기 추진 시스템의 고장은 탑승객의 생명과 직결될 수 있는 문제이므로, 어떠한 경우라도 안전하게 육상으로 복귀할 수 있는 충분한 안전성 및 신뢰도가 보장되어야 한다. 주 발전기 및 추진 전동기의 고장에 대한 여유도(redundancy) 및 신뢰성을 증대하기 위해 다양한 방안들이 고려되고 있으며, 그 중 대표적인 기

Table 1. Fault-tolerant design techniques.

표 1. 추진시스템 안전성 향상을 위한 설계 기법

Techniques	References
Multiple motors/generators	[9]
Multi-phase stator windings	[10-12]
Multiple three-phase windings	[13]
Modular structure	[14, 15]

법들을 표 1에서 소개하고 있다.

설계 시 시스템 여유도를 증가시키는 방안은 전기선박의 안전성 향상을 위한 방법으로 널리 사용되어왔다. 특히 함정에 적용되는 전기 시스템의 고장은 전투 불능 등의 치명적인 상황으로 이어질 수 있으므로, 설계 시 각별한 주의가 요구된다. 일례로 영국과 프랑스가 공동 출자하여 개발한 Type 45 구축함은 여유도 향상을 위해 Converteam에서 개발한 멀티레벨 인버터(VDM25000)와 15상 유도전동기(Advanced Induction Motor)를 전기추진시스템에 탑재하였다. 이후 GE가 Converteam을 인수하면서 미해군 구축함 Zumwalt의 전기추진시스템에도 멀티레벨 컨버터 및 그림 5에 나타난 다상 유도전동기가 사용되었다[16]. 프랑스의 ALSTOM 또한 다상 유도전동기를 쇠빙선 및 굴착선 등의 특수 목적 선박에 적용하고 있다. 그밖에 Jeumont에서 잠수함 용도로 다상 영구자석형 동기전동기를 제작하기도 하였다[17]. 영구자석형 전동기는 타 전동기 대비 고효율, 고회전 특성으로 소형화에 적합한 특성이 있지만, 전기선박 추진시스템에 적용 시 회전자의 영구자석에서 생성된 자속이 고장 조건에서 과도한 전압 또는 전류를 생성시킬 수 있다는 점을 주의해야 한다.

이외에 선박 추진 전동기의 안전성을 증가시키는 설계 기법들은 다양한 논문을 통해 소개된 바 있다. 대표적인 예로 고정자 권선 간 전기적/자기적/물리적인 분리를 가능하게 하는 집중권 권선의 적용[11], H-bridge 인버터, 각 상의 독립적인 제어가 가능하고 유지보수가 용이한 모듈식 고정자[14, 15], 시스템 여유도 증대에 적합한 다상 권선[10-12] 및 다중 3상 권선[13]의 적용 등이 있다. 그림 6은 집중권 권선, 영구자석을 제거한 릴럭턴스 타입의 로터 적용, 영구자석 의존도를 줄인 혼합 여자 방식,

고정자 측에 영구자석을 배치한 flux-switching 전동기 등 우수한 고장 특성을 나타내는 다양한 전동기의 종류를 소개하고 있다.

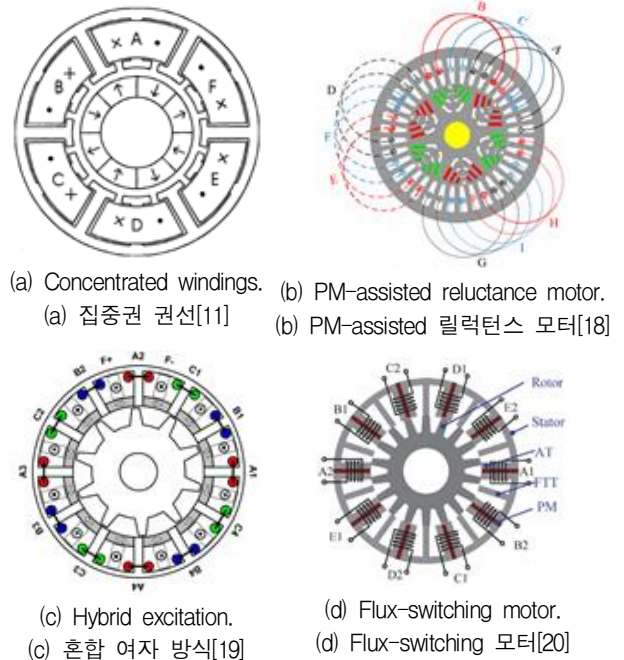


Fig. 6. Fault-tolerant electric machines.

그림 6. 우수한 고장 특성의 전동기 종류

3. 선박용 ESS 안전성 향상 기술

앞서 기술한 바와 같이 리튬이온 배터리는 높은 에너지밀도 및 효율 특성 때문에 선박용 ESS에 가장 많이 사용되고 있지만, 리튬 및 전해액의 고유적인 특성으로 인하여 온도에 민감할 뿐만 아니라 화재 발생의 원인 중 하나로 여겨진다, 그러므로 리튬이온배터리를 사용하는 선박용 ESS의 안전성을 향상하기 위한 기술들이 개발 및 적용되고 있다. 해당 기술 중 하나는 온도에 민감한 리튬이온 배터리를 위한 냉각 및 환기시스템으로 그림 7은



Fig. 5. GE Advanced Induction Motor.
그림 5. GE 다상 유도전동기[16]

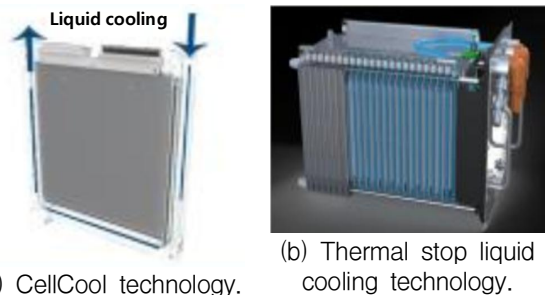
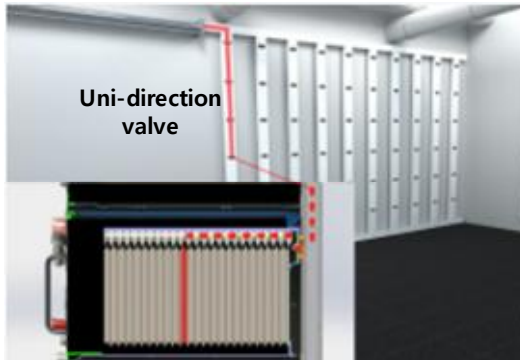


Fig. 7. Sterling Plan B ESS cooling techniques.

그림 7. Sterling Plan B사 에너지저장장치에 적용된 냉각 기술[21]

Sterling Plan B 선박용 ESS에 적용된 냉각기술을 보여준다. 그림 (a)와 같이 각 셀마다 냉각시스템을 적용하여 방열판을 통해 인접 셀과 외부로부터 배터리를 보호하며 그림 (b)와 같이 여러 셀들을 하나의 스택으로 구성하여 열 폭주상황을 효과적으로 방지할 수 있다.

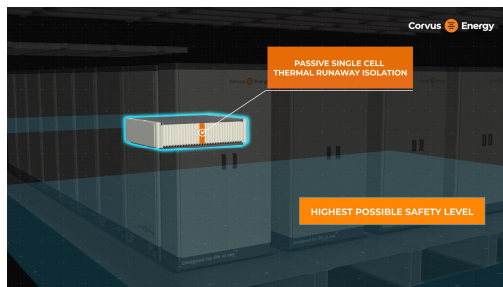


Event venting system

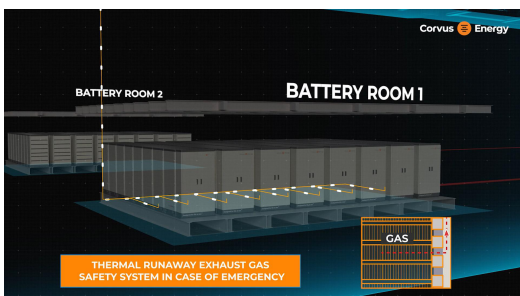
Fig. 8. Sterling Plan B ESS venting technologies.

그림 8. Sterling Plan B 사 에너지저장장치에 적용된 환기 시스템기술[21]

그림 8은 선박용 ESS에 적용된 환기시스템을 보여준다. 그림 8과 같이 각 셀마다 환기시스템을 적용하여 각 셀에서 발생된 유해가스를 배출하고 그림에 보이는 경로로 ESS의 유해가스를 외부로 배



(a) Thermal runaway isolation.



(b) Venting system.

Fig. 9. Corvus Energy ESS venting technologies.

그림 9. Corvus Energy 사 에너지저장장치에 적용된 환기 시스템기술[22]

출함으로써 화재 발생 시 유해가스와의 결합으로 인한 열 폭주상황을 방지할 수 있다. 이와 비슷한 기술이 적용된 제품으로는 그림 9에 보이는 Corvus Energy 사에서 개발된 선박용 ESS가 있다.

선박용 ESS에 적용된 운영안전성 향상기술 중 그림 10과 같은 모듈별 배치를 통하여 ESS의 냉각 및 배관시스템을 구축한 기술도 있다.



Fig. 10. Sterling Plan B modular integrated battery racks.

그림 10. Sterling Plan B 사 에너지저장장치에 적용된 모듈형 구축 기술[23]

선박용 ESS의 운영 안전성 향상을 위하여 ESS에 적용되는 냉각 및 환기기술도 중요하지만 ESS의 battery management system(BMS)의 성능 및 안전한 운영 또한 요구된다. 표 2에서는 BMS의 성능 및 안전시험 요구사항 및 각 시험항목에 해당하는 표준을 정리하였다.

최근 리튬이온 배터리의 화재 특성으로 인해 ESS내의 특정 배터리 팩에 화재가 발생하여도 화재 확산으로 이어지지 않도록 하는 최적 소화설비 기술이 중요시되고 있어 선박용 ESS시스템에도 적용될 것으로 보인다. 리튬이온배터리의 화재는 일반적인 소화방식을 통해서서는 진압이 어렵기 때문에 ESS전용 소화약제에 대한 다양한 연구들이 진행되었다. F-500 EA는 미국 HCT사에서 개발한 다목적 소화약제로 가연성액체 또는 증기를 캡슐화하여 비가연성화하고 급속도로 냉각시킴과 동시에 산화반응을 억제하는 효과가 있다. 이는 BOSCH 등이 진행한 화재진압 테스트에서 리튬이온배터리 화재에 최고의 소화약제로 판정을 받은 바 있으며, 포플러E 레이싱에서는 F-500 EA 및 미스트 분사 시스템을 혼합한 소화방식을 공식적으로 적용 중이다. 또 다른 소화약제는 3M사의 Novec-1230으로 뉴욕시 브루클린 지역에서 진행중인 “MicroGrid Project”에서는 ESS화재 시 필요한 소화시스템을

적용하기 위해 Dry power 및 Novec-1230 소화약제 및 물 분사 시스템을 채택한 사례가 있다.

Table 2. Performance and safety tests for BMS in stationary application.

표 2. BMS 안전시험 요구사항 및 표준 [24]

Test Requirements	Standard
Over-charge control of voltage (V)	IEC 62619 UL 1973, UL 9540 NAVSEA S9310
Over-charge control of current (A)	IEC 62619 UL 1973, UL 9540 NAVSEA S9310
Over-discharge	UL 1973, UL 9540 NAVSEA S9310
Overheating Control	IEC 62619
Cell Balancing	IEEE 1679.1
Disconnection	IEEE 1679.1
Cell Operating Range	IEC 62619 UL 1973, UL 9540 IEEE 1679.1
Temperature Range	IEEE 1679.1
Thermal Management	IEEE 1679.1 UL 1973, UL 9540
Heating and Cooling	IEEE 1679.1
Thermal Fault	IEEE 1679.1
Short Circuit	NAVSEA S9310
Functional Safety	IEC 62619 UL 1973, UL 9540

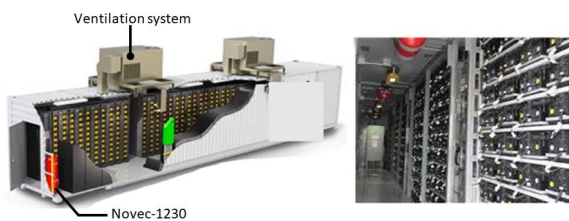


Fig. 11. An example of fire suppression system using Novec-1230 for ESS (Source: Kidde).

그림 11. Novec-1230 ESS 화재진압시스템 예시

한편, 리튬이온 배터리 기반 ESS의 안전성향상 기술 개발에도 불구하고 리튬이온 배터리 특성상 화재 위험이 완전히 해결될 수는 없다. 이에 본 논문에서는 안전성에 최적화된 배터리 시스템으로 관심받고 있는 선박용 바나듐레독스흐름전지 기반 ESS 기술에 대해 소개하고자 한다.

바나듐레독스흐름전지(Vanadium Redox Flow

Battery, VRFB)는 독보적인 안전성으로 인해 최근 태양광 풍력 등과 같은 신재생에너지를 저장하는 육상형 ESS용 배터리로 주목받으며 많은 연구와 실증이 이루어지고 있는데, 친환경 선박분야에서도 최근 네덜란드, 독일, 캐나다의 기업 간 합작프로젝트에서 VRFB를 선박용 전력저장장치로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다[25].

VRFB는 셀스택, 전해액탱크, 펌프 및 유로 등으로 구성되며, 펌프를 통해 양/음극 전해액을 순환시키고, 전해액 내의 활물질(레독스쌍)이 셀스택에서 각각 산화·환원되면서 충·방전이 이루어지는데, 셀스택에서의 발생하는 바나듐의 가수 분해를 수반한 전지반응은 아래 식(1), (2)와 같다.

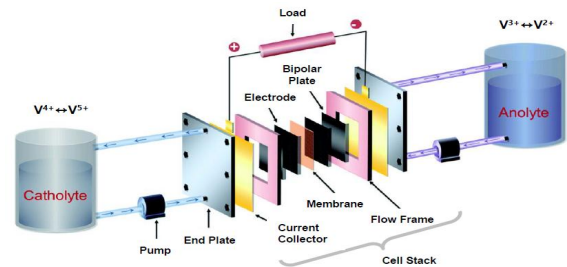
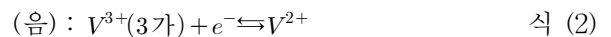
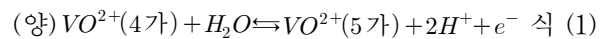


Fig. 12. VRFB structure (Source: H2).

그림 12. VRFB 구조

[VRFB의 충·방전 원리]



VRFB는 상온동작 및 수(水)계 전해질을 사용하기 때문에 화재의 위험성이 전혀 없어 안전성이 보장된다. 최근 연구는 VRFB의 화재발생가능성을 시험하기 위해 Short-circuit abuse test를 진행하여 VRFB의 안전성을 입증한 바 있다(그림 13).

Constant temperature result in shortcircuit abuse test

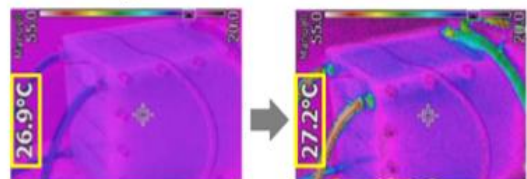


Fig. 13. VRFB Short-circuit abuse test [26].

그림 13. VRFB의 전극단락 혹사시험

앞서 언급한 안전성 외에도 VRFB는 선박용 전력저장장치 활용에 적합한 몇 가지 특성을 가지고

있다.

먼저 RFB는 전기적 출력(셀스택)과 에너지 용량(전해액탱크)의 독립적인 설계가 가능하여 대용량화가 용이하여 선박과 같은 대형 수송시스템에 적합하다. 다음으로 선박은 일반적으로 장시간 항해하고 20년의 수명을 가지는데, VRFB는 전극과 활물질이 분리되어 있어 두 물질 간의 부반응(Side reaction)이 최소화되기 때문에 2만회 및 20년 사용에도 불구하고 용량감소가 거의 없다(그림 13). 특히, 바나듐 전해액의 경우 영구적인 재생이 가능하여 리튬이온배터리에 비해 폐기물을 줄일 수 있으니 환경친화적이기까지 하다.

한편, VRFB의 초기투자 비용은 리튬이온전지에 비해 높은 편이다. 하지만 4시간 이상을 연속운전하거나 대용량 저장장치가 필요한 시스템에서는 오히려 경제성이 뛰어나다는 평가를 받고 있다(그림 14, 15).

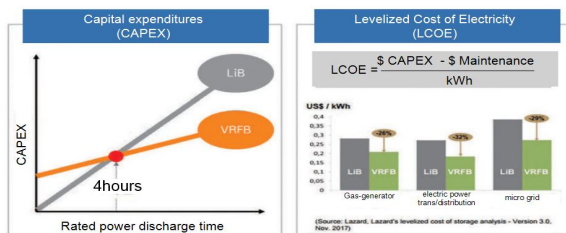


Fig. 14. Analysis of economic feasibility of VRFB in condition of long-time operation.

그림 14. 장주기운전 시 VRFB경제성 비교
(출처 : (주)에너지와 공조)

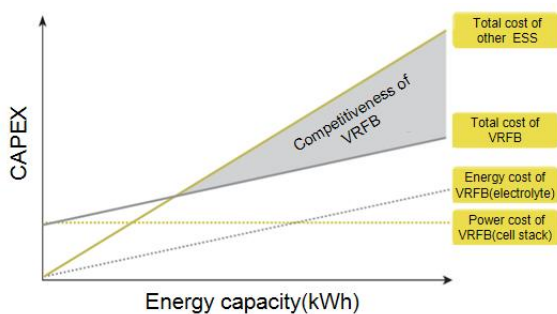


Fig. 15. Analysis of economic feasibility of Large-scale VRFB ESS [27].

그림 15. 대용량화에 따른 VRFB경제성 비교

VRFB가 앞서 언급한 장점들로 인해 대형 수송 모빌리티에 활용될 것이 기대되나, 한편으로 이는 육상용 ESS로 주로 연구되었기 때문에 VRFB를선

박에 적용하기 위해서는 고출력 대형 셀스택, 고에너지 밀도, 효율 개선, 선박환경에서의 신뢰성 확보 등 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

III. 결론

최근 조선업계는 지속적으로 강화되는 IMO규제를 만족하기 위해 친환경 선박의 개발 및 상용화가 시급한 상황에 직면하였으며, 이를 위해서는 안전한 전기추진 시스템 개발이 시급하다.

본 논문에서는 친환경 선박용 전기추진시스템의 기술개발 동향과 함께 모터 및 ESS의 안전성을 향상시킬 수 있는 기술개발 동향에 대해 소개하였다. 전기추진모터의 경우, 일부 고장에도 불구하고 운전을 계속할 수 있는 다상 모터 설계 기법과 집중권 권선, 모듈식 고정자 설계기법 등에 대해 소개하였다. 전력저장장치의 경우, 최근 모든 친환경 선박에 적용 중인 리튬이온배터리 기반 ESS의 화재 위험성으로 인한 안전 문제를 해결하기 위한 기술 개발에 대해 소개하였다.

나아가 독보적인 안전성으로 주목받고 있는 바나듐레독스흐름전지를 선박용 ESS에 적용하기 위한 연구들에 대해 소개하며, 이를 실현하기 위한 방향성에 대해 제시하였다.

친환경 선박은 기존 모빌리티 산업에 비해 모터 및 전력전자 기술들이 경험해보지 못한 환경에 놓여있기 때문에 기술개발 시, 전기추진시스템의 성능개발뿐만 아니라 안전에 최적화될 수 있는 연구가 필요하다.

References

- [1] T. H. Joung et al., 2020, "The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050," *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, Vol.4, No.1, pp.1-7, 2019. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938
- [2] DNV GL, "Maritime Forecast to 2050," p.24, 2018.
- [3] DNV GL, "Alternative Fuels in the Arctic (Norway-WWF)," p.30, 2019.

- [4] G. Sulligoi, A. Vicenzutti, and R. Menis, "All-Electric Ship Design: From Electrical Propulsion to Integrated Electrical and Electronic Power Systems," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol.2, no.4, 2016. DOI: 10.1109/TTE.2016.2598078
- [5] C. Lewis, "The Advanced Induction Motor," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol.1, pp.250-253, 2002. DOI: 10.1109/PESS.2002.1043227
- [6] <https://www.gepowerconversion.com/product-solutions/induction-motors/large-slow-speed-marine-motors>
- [7] Rolls-Royce, "New Azimuthing Permanent Magnet Thruster," pp.2-4, 2019.
- [8] Kim, Su-Nam, Park, Yeong-Ho. "DC Electric Propulsion Ship Technology Trend" *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.67, No.6, pp.25-31, 2018.
- [9] J. W. Bennett, G. J. Atkinson, B. C. Mecrow, and D. J. Atkinson, "Fault-tolerant design considerations and control strategies for aerospace drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no.5, pp.2049-2058, 2012. DOI: 10.1109/TIE.2011.2159356
- [10] A. G. Jack, B. C. Mecrow, and J. A. Haylock, "A Comparative Study of Permanent Magnet and Switched Reluctance Motors for High-performance Fault-tolerant Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.32, no.4, pp.889-895, 1996. DOI: 10.1109/28.511646
- [11] A. G. Jack, B. C. Mecrow, and J. A. Haylock, "A Comparative Study of Permanent Magnet and Switched Reluctance Motors for High-performance Fault-tolerant Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.32, no.4, pp.889-895, 1996. DOI: 10.1109/28.511646
- [12] A. S. Abdel-Khalik, M. S. Hamad, A. M. Massoud, and S. Ahmed, "Postfault operation of a nine-phase six-terminal induction machine under single open-line fault," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.65, no.2, pp.1084-1096, 2018. DOI: 10.1109/TIE.2017.2733471
- [13] G. Sala, M. Mengoni, G. Rizzoli, M. Degano, L. Zarri, and A. Tani, "Impact of star connection layouts on the control of multiphase induction motor drives under open-phase fault," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.36, no.4, pp.3717-3726, 2021. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3024205
- [14] K. Atallah, J. Wang, and D. Howe, "Torque-ripple minimization in modular permanent-magnet brushless machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.39, no.6, pp.1689-1695, 2003. DOI: 10.1109/TIA.2003.818986
- [15] G. J. Li, Z. Q. Zhu, M. P. Foster, D. A. Stone, and H. L. Zhan, "Modular permanent magnet machines with alternate teeth having tooth tips," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.62, no.10, pp. 6120-6130, 2015. DOI: 10.1109/TIE.2015.2427112
- [16] <https://magneticsmag.com/ge-power-conversion-equip-nsnavy-fleets-with-electric-propulsion-systems/>
- [17] JEUMONT Electric, "Power and Propulsion Systems," pp.2-3.
- [18] Y. Shi, J. Wang, R. Hu, and B. Wang, "Electromagnetic and thermal behavior of a triple redundant 9-phase PMASynRM with insulation deterioration fault," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.56, no.6, pp. 6374-6383, 2020. DOI: 10.1109/TIA.2020.3014274
- [19] Z. Q. Zhu N. Pothi, P. L. Xu, and Y. Ren, "Uncontrolled generator fault protection of novel hybrid-excited doubly salient synchronous machine with field excitation current control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.55, no.4, pp.3598-3606, 2019. DOI: 10.1109/TIA.2019.2909492
- [20] X. Xue, W. Zhao, J. Zhu, G. Liu, X. Zhu, and M. Cheng, "Design of five-phase modular flux-switching permanent-magnet machines for high reliability applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol.49, no.7, pp.3941-3944, 2013. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2244201
- [21] Sterling Plan B, *CellCool Liquid Cooling*, <https://spb.com/products/>
- [22] Corvus Energy, *Corvus Energy products*, <https://corvusenergy.com/products/>
- [23] Sterling Plan B, *Integrated racking*, <https://spb.com/products/>

- [24] Hossam A. Gabbar, Ahmed M. Othman and Muhammad R. Abdussami, "Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards," *MDPI Technologies*, 2021
DOI: 10.3390/technologies9020028
- [25] Nick Flaherty, "Flow battery project to power ships," *eeNewseurope*, 2021.
- [26] A. H. Whitehead, T. J. Rabbow, M. T rampert, P. Pokorny, "Critical safety features of the vanadium redox flow battery," *Journal of Power Sources*, Vol.351, pp.1-7, 2017.
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.075
- [27] Han Shin, Kim Yu-jong, Heo Ji-hyang. "Vanadium Redox Flow Battery development and domestic demonstration," *Journal of Electrical World Monthly Magazine*, pp.48-54, 2014.