



Received: 2023/11/27  
Revised: 2023/12/03  
Accepted: 2023/12/26  
Published: 2023/12/31

**\*Corresponding Author:**

**So Yeon Kim**

Dept. of Electrical and Engineering, Republic of Korea  
Naval Academy  
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,  
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea  
Tel: +82-55-907-5315  
E-mail: ksy4rang@navy.ac.kr

**Abstract**

수상함 교류 배전은 특성상 전기적 특성이 매우 복잡하고, 전력품질 기준을 충족하는 데 드는 비용도 점차 증가하고 있다. 이를 해결하는 방안은 직류 배전 방식을 도입하는 것이다. 본 논문에서는 DC 배전의 적용 이점을 고찰하고, 전기추진 수상함의 전력 계통에서 DC-bus 구현 방안에 대해 제안하고자 한다. 현재 수상함 전기추진 시스템에서는 다이오드 정류기의 다펄스화 또는 AFE 정류 단을 도입하여 고조파 문제를 해결하고 있다. 그러나 필터의 추가 설치는 무게와 비용 측면에서 불리하다. 만약 대용량 전기추진 시스템의 DC-link 전압을 DC 모션으로 확대하여 DC 배전 방식을 채택하면, 고조파 전류에 대한 고려가 전혀 필요하지 않다. 또한 기계식 차단기와 변압기가 제거되면서 DC 계통 최적화를 통한 공간과 무게 절감 및 장비의 유연한 구성 등 이점을 제공한다.

Surface naval ship's AC distribution, with its complex electrical characteristics and increasing costs to meet power quality standards, can be addressed by adopting DC distribution. This paper explores the benefits and proposes strategies for implementing a DC-bus in electric propulsion naval ships. By adopting DC distribution, issues like harmonic currents are eliminated, and the removal of mechanical circuit breakers and transformers allows for space and weight savings and flexible equipment configuration.

**Keywords**

전력변환장치(Power Conversion Equipment), 교류모션(AC-bus), 직류모션(DC-bus), 전 고조파 왜율(Total Harmonics Distortion), 직류 링크(DC-link), 에너지 저장장치(Energy Storage System)

**Acknowledgement**

이 논문은 2023년도 한국해군과학기술학회 동계학술대회 발표 논문임.

# 직류 배전 계통의 수상함 적용 필요성 및 적용 방안에 관한 연구

## Study on the Necessity and Application of DC Distribution System in a Surface Naval Ships

김소연<sup>1</sup>, 홍창우<sup>2</sup>

<sup>1</sup>해군 중령/해군사관학교 전기전자공학과 부교수

<sup>2</sup>해군 소령/해군사관학교 기계시스템공학과 조교수

So Yeon Kim<sup>1\*</sup>, Chang Woo Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CDR, ROK Navy/Associate professor, Dept. of Electrical Engineering, ROK Naval Academy

<sup>2</sup>LCDR, ROK Navy/Assistant professor, Dept. of Mechanical System Engineering, ROK Naval Academy

### 1. 서론

19세기 말 함정에 설치된 발전기 용량은 단순 조명 부하에 전력을 공급하는 정도였다. 20세기에 걸쳐 레이더 및 통신 시스템, 그리고 이지스 전투 시스템 등 함정 탑재 장비의 비약적 발전으로 함정의 전력 소비는 급격하게 증가하였다. 4차 산업혁명에 따른 국방 기술의 혁신으로 함정 시스템이 더욱 첨단화, 지능화되면서 이러한 전력 수요 증가 추세는 양적·질적으로 더욱 심화될 것으로 전망된다.

함정 AC 전력 부하의 대부분은 팬, 펌프, 압축기와 같은 전동기 구동 장치이다. 최근 이러한 부하 장치의 고효율화에 대한 관심이 증가하여, 전원 계통에 직결하지 않고 인버터 장치를 통하여 교류 전원을 직류로 변환 후 다시 원하는 주파수로 전동기를 구동하는 방식으로 바뀌고 있다. 함정 통신 시스템은 특수 전력을 사용하는 부하로서 주파수 변환기, 직류 정류기, 변압기 등 여러 가지 전력변환장치가 필요하다. 통신용 직류 전원의 경우 비상 전원을 공급하기 위한 축전지와 직류 정류기로 구성된다. 함 내 전력 장비는 이렇듯 다양한 전원을 사용한다.

함정 추진 부하의 경우 소요 마력은 함 속력의 세제곱 또는 그 이상으로 비례하여 증가한다. 전기추진 방식을 적용하면 추진 부하량에 따라 적정한 발전기 운용 대수를 선정할 수 있어 연료 소비량을

대폭 절감할 수 있다. 특히, 저속 항해가 많은 함정의 특성을 고려하였을 때 대용량의 추진 에너지를 고풍력 무기체계 운용과 같은 작전용 에너지로 통합 운용할 수 있어 그 효율성이 증대된다.

그러나 제한된 함 공간에 고풍력의 전기추진 시스템을 탑재하기 위해서는 시스템의 출력밀도(power density)를 높여야 한다. 수상함에서 일반적으로 사용되는 배전 방식은 3상 교류 3선식이다. 그러나 교류 배전의 특성상 전기적 특성이 매우 복잡하고, 함정 설계/건조 기준을 충족하는 데 드는 노력과 비용도 점차 증대하고 있다. 이를 해결하는 방안은 국내외 친환경 선박을 중심으로 활발하게 적용되고 있는 직류 배전 방식을 도입하는 것이다. 본 논문에서는 AC 배전 방식 대비 DC 배전의 적용 이점을 고찰하고, 전기추진 시스템을 포함하는 수상함 전력 계통에서 직류 모선의 구현 방안에 대해 제안하고자 한다.

## 2. 수상함 AC 배전과 고조파문제

현재 우리 해군은 440 V 3상 교류 방식을 채택하고 있으며, 전기추진 함정에서 690 V를 적용한 사례가 있다. 향후 수십 MW급 대용량 추진 전동기를 구동하기 위해서는 더 높은 교류 전압이 요구된다. 일반적으로 선박 전력 계통에서 저전압과 고전압의 구분은 IEC 규격에 따라 1 kV를 기준으로 한다[1]. 직류는 IEEE Std 1709 기준을 따른다[2]. 전기추진 함정에서 추진 모선(propulsion-bus)의 전압 선정에 따라 결정되는 모선 전류의 크기는 전선의 굵기나 스위치보드 차단기의 허용 용량에 의해 제한된다. 또한, 추진 전동기 구동 전력변환장치의 구성 방식과도 밀접하게 관련되어 있으므로 함정 특성을 고려하여 최적의 전압이 선정되어야 한다[3].

함정에서 고전압 교류전력 사용이 증가함에 따라 개정된 MIL-STD-1399 SECTION 300에 따르면, 미 해군 함정의 공칭 전압은 Table 1과 같다[4]. 우리나라의 경우, 육상 표준전압은 690 V, 3,300 V, 6,600 V, 22,900 V를 사용하고 있다. 육상 전력 계통과 상호 연결을 쉽게 하려면 이 전압들을 모방해서 우리 함정의 사용전압을 선정하는 것이 유리하다. 단, 영국과 미국은 현재 미국의 육상 표준전압인 4,160 V를 구축함의 표준전압으로 사용하고 있어 이들과의 공조를 고려하면 4,160 V 역시 적용될 만하다.

**Table 1.** High voltages of AC shipboard power system

Classification	Nominal Voltage
5 kV	4.16 kV, 60 Hz
8.7 kV	6.60 kV, 60 Hz
15 kV	11 kV/13.8 kV, 60 Hz

AC 배전 계통에서 전기추진 시스템의 전력변환 방식은 고조파 전압과 전류의 크기에 큰 영향을 미친다. 고조파는 왜형파의 구성성분 중 기본파에 대해 2배 이상의 정수배 주파수를 갖는 파를 의미한다. 고조파는 대부분 전력반도체 소자(diode, thyristor, IGBT, IGCT 등)를 사용하는 장비에서 발생한다. 전력변환 장치의 동작이 스위칭에 의존하기 때문에 고조파/고주파 성분이 필수적으로 발생하게 되고, 이 성분의 크기가 일정 값 이상으로 크면서 지속하는 경우 다른 장비의 오동작을 초래한다.

콘덴서는 고조파 피해 사례의 대부분을 차지하며, 회로의 임피던스 감소에 따른 과대 전류 유입으로 과열, 소손, 진동, 소음이 발생한다. 전동기에는 회전수의 주기적인 변동에 따른 철손, 동손 등에 추가적인 손실을 초래하고, 케이블에는 과열이 발생하며, 변압기에는 철심의 자기포화 현상에 의한 소음 발생 및 철손, 동손이 증가한다. 전자기기는 반도체 소자의 수명 및 성능이 저하되고, 계전기는 설정 레벨의 초과 혹은 위상변화에 의한 오동작이 야기될 수 있으며, 차단기는 오동작의 위험이 있다. 특히, 전력용 콘덴서는 전원과 콘덴서의 임피던스가 고조파 전류에 의해 병렬 공진을 일으킬 수 있고, 이 병렬 공진에 의해 고조파 증폭은 물론 계통 전체에 대해 과전압을 일으킬 수 있다[5].

고조파로 인한 여러 가지 문제점 때문에 MIL-STD 또는 각 선급에서는 전 고조파 왜율(THD, total harmonics distortion) 발생 수준을 제한하고 있으며, 계통 전압의 경우 8 % (단일 고조파는 3 %)를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 전 고조파 왜율은 아래 식 (1)과 같이 표현된다[5].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서,  $V_1$ : 기본파 전압,

$V_2, V_3, \dots, V_n$ : 각 차수별 고조파 전압.

고조파를 감소시키기 위한 가장 간단한 방법은 고조파 발생 부하 장치의 1차 측에 교류 리액터를 설치하거나 직류 회로에 리액터를 삽입하는 것인데 무게와 전압강하 문제로 선호되지는 않는다. 이 밖에 정류기의 다펄스화, PWM 컨버터의 채용, LC 필터의 설치, active front end 정류기, 또는 multilevel 컨버터 등의 방법을 사용하여 고조파 문제를 효과적으로 해결하고 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 다양한 고조파 저감 방법에 따라 오실로스코프 상 교류 입력단 파형에서 왜곡이 거의 보이지 않는 것을 의미한다.

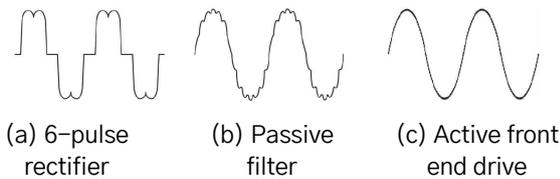


Fig. 1. Comparison of harmonic current reduction levels by different methods for harmonics suppression

### 3. 수상함 AC 계통의 전력변환장치 구성

AC 배전 계통인 경우, 함정 추진제어용 전력변환 시스템은 모선의 교류 전원을 직류로 변환하는 과정에서 크게 DFE(diode front end)와 AFE(active front end) 방식으로 나뉜다. 통상 DFE 방식이 구조가 간단하다는 장점이 있지만, 입력단에 다이오드 정류기를 사용함으로써 입력 전류의 THD가 커지는 단점이 있

다. 전기추진 시스템이 단일 시스템 중 가장 큰 전력을 소모하는 장치이므로, 전 고조파 왜율이 악화하는 경우 함 전체의 전력망에 영향을 미치게 되어 고조파 장애 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 저차(low-order)의 고조파 저감용 위상치환 변압기를 추가해야 하는데, 고조파 저감용 변압기는 구조가 복잡하고, 전체 전력변환 장치의 부피를 증대시키며, 가격이 비싸다는 단점이 있다.

이에 비해 AFE 방식의 경우 입력 전류가 정현파에 가까워져서 전 고조파 왜율이 개선되는 장점이 있다. 특히, 저전압 시스템의 경우 변압기가 필요 없어 효율이 개선되고 시스템의 부피를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 입력단의 승압형 PWM 컨버터의 스위칭에 의해 DFE 방식에 비해서 스위칭 손실이 증대되고, EMI/EMC 문제가 발생할 수 있기 때문에 함정과 같이 정밀 부하를 많이 탑재할 경우, 입력단에 추가적인 EMI/EMC 필터가 필요한 단점이 있다.

전기추진 체계의 전압과 전류 고조파에 대한 가장 엄격한 국제 규격인 IEEE-STD-45, IEEE-STD-519, MIL-STD-1399-300B 등의 만족 여부를 정리하자면, DFE/AFE 방식 중 규정을 항상 만족하는 전기추진 체계의 전력변환 장치는 AFE 방식이다. 단, 이 결과는 고조파 필터를 적용하지 않을 경우를 가정하였다.

Fig. 2와 Fig. 3는 수상함 전기추진 계통에서 추진제어용 전력변환 방식으로 DFE 또는 AFE 방식을 적용한 계통도를 나타낸다. 함 전력 계통의 주 모선 전압

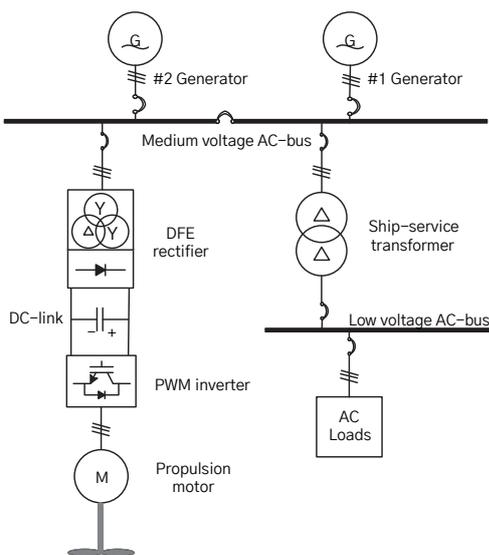


Fig. 2. Electric propulsion system with DFE rectifier based on AC-bus

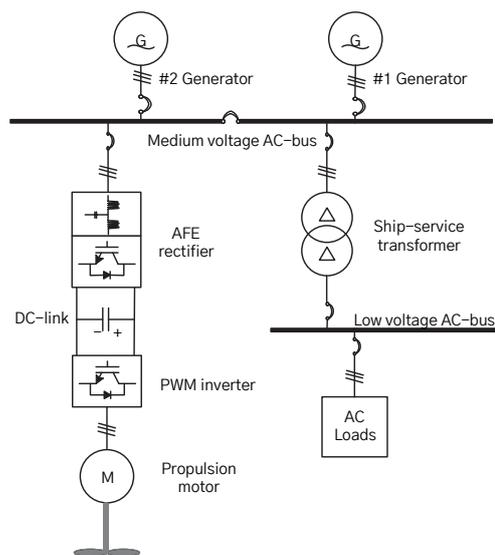


Fig. 3. Electric propulsion system with AFE rectifier based on AC-bus

은 고전압 교류 모선(MAVC-bus)을 채택하였다. 함내 서비스 부하를 위해 강압 변압기를 통해 저전압(수상함의 경우 440 V) 교류 배전한다. 한편, 추진 전동기 속도 제어용 PWM 인버터는 모선의 교류 전원을 직류로 변환한 후 이를 직류 단(DC-link)의 커패시터에 저장하여 유사 전압원으로 변환한 후 다시 가변 전압/주파수의 교류 전압원으로 변환하는 장치이다. DFE 방식에서는 교류모선 전압의 크기 변동에 따라 직류 단 전압의 크기도 가변하나, AFE 방식에서는 직류 단 전압의 크기를 일정하게 유지할 수 있다.

#### 4. 함정 DC 배전 적용이점

최근, 해외 선진사를 중심으로 선박의 고연비를 실현하는 혁신적인 기술로 DC 배전을 전기추진 선박에 적용한 사례가 소개되고 있다. 기존 AC 배전을 채용한 전기추진 시스템은 경부하 운전 시 엔진의 효율이 저하되는 문제가 있으나, DC 1,000 V급 배전을 적용하여 엔진을 가변속 운전함으로써 연료 효율을 대폭 향상했다. 미 해군은 Zumwalt급 구축함에 DC 1,000 V를 적용한 것으로 알려져 있으나 그 외 사례를 찾아보기는 힘들다. 상용 선박 분야에서는 ABB와 SIEMENS가 DC Grid 솔루션을 개발하여 사업화를 활발하게 진행하고 있다.

기존의 AC 배전 계통은 발전기의 주파수/위상 동기화가 필요하고 계통에서의 돌입전류, 역률, 고조파 전류 및 3상 불균형에 대한 고려 또한 항상 요구된다. DC 배전 계통은 직류 전원으로 구성되어 있어 이러한 고려가 전혀 필요하지 않다. 또한, 부피가 큰 교류 배전반이나 변압기가 제거되면서 DC 배전 계통은 공간과 무게 절감 및 장비의 유연한 구성 등 이점을 제공한다. 특히, DC 배전 계통은 에너지저장장치와 연료전지 등의 분산전원을 연계하기가 쉽다. 위에서 언급한 DC Grid 솔루션은 MWh 용량의 ESS를 연계하여 해양오염 배출 없이 청정해역에서 운항한다.

AC 배전 계통에서는 60 Hz 주파수를 유지하기 위해 엔진-발전기가 출력과 관계없이 일정 속도로 운전되어야 한다. 이는 저부하 운전 시 엔진의 연비(SFOC) 효율이 저하되는 단점이 있다. 특히, 위치제어 선박에서처럼 20 % 이하의 저부하 운전이 대부분인 선박에서는 연비가 급격하게 나빠지고, 매연 등이 침전되면서 엔진 수명에도 악영향을 미치는 문제가 발생한다.

DC 배전 계통은 발전기와 주 모선 간 AC/DC 컨버터로 연계되므로 발전기의 주파수를 변동시켜 운전할 수 있어 엔진을 일정 속도로 운전할 필요가 없다. 엔진의 연비 특성 사양을 기준으로 최적의 운전점에서 동작시키는 것이 가능하므로 저부하 운전 시 엔진의 속도를 낮추는 엔진 가변속 운전으로 발전 효율을 향상시킨다. 가변속 운전을 통한 연료 절감은 경부하에서 더 크게 나타나므로 운항 프로파일에 따라 연료 절감량은 다를 수 있으나, 경부하 운전이 많은 선박의 경우 DC 배전 방식의 연료 절감 효과가 큰 것으로 알려져 있다. ABB는 엔진 가변속 운전과 ESS 연계를 통해 SFOC를 20 % 이상 절감하였다고 발표하였다. Fig. 4는 500마력급 디젤엔진 발전기에서 엔진의 SFOC 지도를 참조하여 최적 연비 곡선을 따라 엔진 가변속 운전을 하였을 때, 정격 속도 운전 대비 50 % 부하율에서 약 8 %, 20 % 부하율에서 약 25 %, 10 % 부하율에서 40 % 이상의 연료 절감 효과가 나타나는 것을 보여주고 있다.

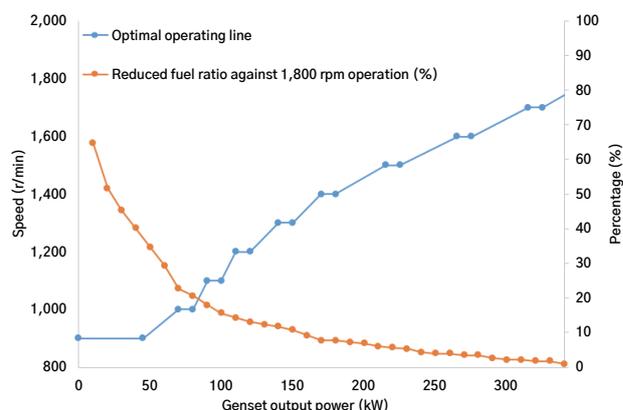


Fig. 4. Fuel consumption reduction through engine mariable speed drive

발전기 효율 향상 및 연료비 절감 장점 외에도 DC 배전 계통은 전장품 무게 및 설치 공간 절감, 발전기의 빠른 투입, 분산전원 연계 시 변환손실 저감 등 추가적인 장점이 있다. THD 저감을 위한 가변속 구동용 위상전이변압기나 기타 전압 조절을 위한 변압기가 불필요하므로 공간이 줄어들고 전력 설비의 무게를 줄일 수 있다. 또한, 같은 절연 내압을 가지는 690 V AC 전압과 비교할 때 1,000 V DC 전압을 사용하면 케이블 무게를 20 % 이상 줄일 수 있다. DC 배전 계통에서는 발전기 동기화가 필요하지 않아 10초 이내

에 발전기 투입이 가능하며 에너지저장장치(ESS, energy storage system) 연계 시 엔진 ramp 제약을 완화해 전체 시스템의 동적 응답 특성을 획기적으로 향상할 수 있다. ESS를 쉽게 통합 운영할 수 있어 에너지 효율 향상과 친환경 운전이 가능할뿐만 아니라, 엔진이 최적 운전점에서 지속적으로 동작하기 때문에 고장 빈도가 낮아져 유지보수 비용을 약 30 % 절감할 수 있다는 장점이 있다.

### 5. 수상함 DC 배전 계통 구현 방안

교류모션에서는 다수의 발전기가 동기를 맞추어 일정 속도로 운전해야 하지만, DC 배전 계통은 위에서 언급한 바와 같이 발전기 출력의 주파수를 분리하기 때문에 발전기가 출력에 대응해 효율적인 속도에서 운전할 수 있어 연비를 개선한다. 특히, 함정과 같이 발전 및 배전 설비의 용량은 크게 설계되지만, 실제 운용 부하의 관점에서는 경부하 운전이 많은 선박일수록 연비 개선 효과는 극대화된다.

AC 배전 방식에서는 일반적으로 3상 계자 권선형 동기발전기 출력 단자의 일정한 주파수와 전압을 버스 전압으로 이용하는데, 부하의 유효전력과 무효전력 성분의 크기에 따라 엔진 속도의 변동과 내부 임피던스 전압강하로 인하여 주파수 및 전압 변동이 일어나게 된다. 이를 일정 주파수와 전압으로 복귀시키기 위해서는 엔진 속도를 제어하는 governor와 발전기의 계자 전류 및 자속을 제어하는 AVR이 필요하다. DC 배전 방식에서는 엔진과 발전기의 효율적인 운전을 위하여 가변속 제어를 수행한다. 더 이상 고정된 속도로 운전할 필요가 없으므로 무게와 부피를 절감할 수 있는 고속 디젤엔진의 적용이 가능하다.

Fig. 5는 발전기의 교류 전원을 직류로 변환하기 위해 1970년대부터 많이 사용되어 온 사이리스터 정류단(TFE, thyristor front end)을 적용한 DC 배전 계통도를 보여준다. TFE 방식은 주로 LCI(load commutated Inverter), 사이클로컨버터 등의 전류형 인버터에 적용한 회로로 회생 운전이 가능하고, 온 제어 가능 소자인 사이리스터를 통한 위상제어로 인해 역률 제어가 가능하다는 장점이 있다. 또한 사이리스터의 대용량 특성에 의해 고전압·고용량 시스템에 적합하다. 하지만 직류 단에 큰 DC 링크 인덕터가 필요하다는 단점이 있으며 전력품질이 나쁘므로 THD와 저차 고조

파를 줄이기 위한 큰 필터가 필요하다는 단점이 있다.

발전기와 정류기의 출력이 고전압 DC-bus를 형성하는데, AC-bus에서는 bus-tie 차단기를 적용하는 반면 DC-bus에서는 기계식 DC 차단기가 필요하다. 그러나 보다 신속하게 사고를 차단하기 위해서는 반도체 차단기(SSCB, solid state circuit breaker)를 적용해야 한다. 차단기는 필요에 따라 두 배전반을 분리하거나 연결하는 기능을 하며, 사고 발생 시 사고확산을 방지하기 위하여 정격운전 용량과 차단 용량을 고려하여야 한다.

다음으로, 기존과 같이 AC 부하에 교류 전원을 공급하기 위해서는 CVCF(constant voltage constant frequency) 컨버터가 필요하다. 컨버터와 같은 전력변환 장치는 큰 부하 전류에 대한 순간적인 내량이 기존 동기발전기나 변압기보다 떨어지고, 영구적인 손상을 입을 수 있으므로 가능한 정격전류 이내로 제한해야 한다. 따라서 비교적 큰 용량의 전동기 부하들은 모두 인버터 구동 방식으로 변경하여 순간적으로 발생하는 돌입전류의 발생을 되도록 지양하고, 출력 조절을 통한 에너지 절감 효과도 기대할 수 있다.

Fig. 6는 발전기의 TFE 정류기를 AFE 정류기로 대체한 DC 배전 계통도이다. AFE 방식은 PWM 제어를 통하여 발전기 단자에 DC-link 전압 이하의 평균적인 AC 전압을 만들어 낼 수 있다. AFE 정류기는 AFE 출력전압과 발전기 역기전력의 전압 차를 이용하여 순시적으로 전류제어가 가능하므로 엔진-발전기 토크

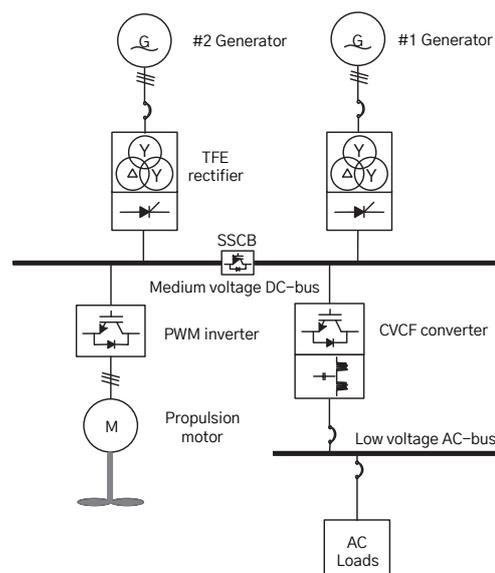
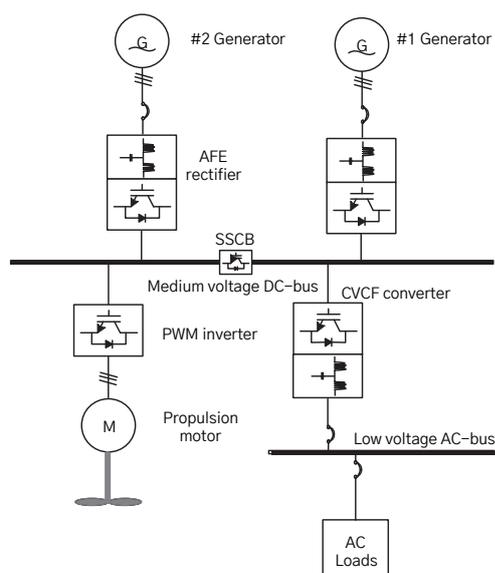


Fig. 5. Electric propulsion system with TFE rectifier based on DC-bus

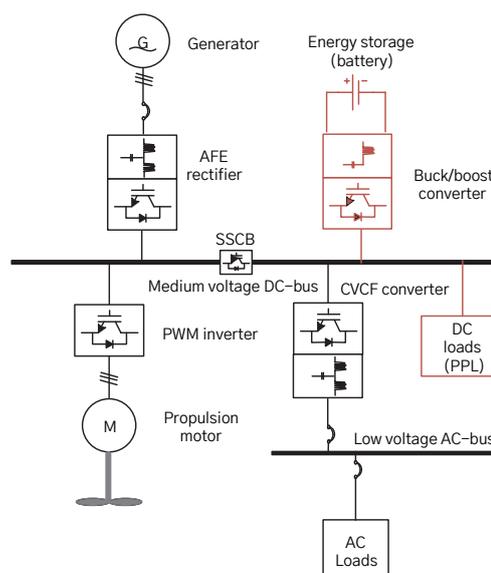


**Fig. 6.** Electric propulsion system with AFE rectifier based on DC-bus

를 제어할 수 있고 이를 통해 최종적으로 DC-link 전압제어가 가능하다. 또한, 스위칭 주파수가 수백~수천 Hz로 높아서 필터의 크기를 줄일 수 있고, 고조파 문제가 감소한다.

한편, 엔진 발전기의 응답 특성은 상대적으로 느리므로 만약 부하가 순간적으로 크게 증가하는 경우 엔진의 출력이 이를 따라가지 못하여 엔진이 정지하게 되는 사고가 발생할 수 있다. 해당 사고를 방지하기 위해서는 점진적으로 부하를 변동시키거나 순간적으로 보조 전력을 공급하여야 하는데, 이러한 기능을 하는 것이 PEMS(power & energy management system)와 에너지저장장치(ESS)이다. 일반적으로 엔진 governor의 속도 지령은 발전기의 헌팅 현상을 억제하기 위하여 10 Hz 미만의 저역통과필터(LPF)를 거쳐 결정되므로 ESS의 유무에 따라 엔진의 속도 지령 한계는 달라질 수 있다. ESS는 순간적으로 변동하는 부하 상승분만큼의 전력을 짧은 시간 동안 엔진 대신 출력하고, 그동안 엔진이 가속하여 순시 최대 출력을 확보하게 된다. 이렇듯 ESS는 DC 배전 계통 운영의 안정성 향상을 위해서는 반드시 포함하는 것이 좋으며, 배터리의 충·방전 제어를 위해서는 buck/boost 타입의 양방향 전력 전달이 가능한 DC-DC 컨버터가 요구된다. Fig. 7은 DC 배전 계통에서 ESS를 연결한 전력 계통도를 나타내고 있다.

특히, 수상함에서 ESS가 연계된 DC 배전 계통을 채



**Fig. 7.** Electric propulsion system with energy storage system based on DC-bus for pulsed power loads

택하였을 때 이점은 점차 증가하는 고출력 DC 부하를 운용하는 데 있다. 최근 수상함 전력 계통에는 신기술의 레이더 시스템, 전자전 시스템, 레이저 무기 시스템과 같은 지향성 에너지 무기와 통신 장비, 수중 소나 등의 펄스 부하전력(pulsed power loads)이 증가하고 있다. 펄스 부하는 짧은 시간 동안 많은 전류가 필요하므로, 기존의 교류 배전 계통에서는 엔진 발전기가 응답하는 동안 교류 모션 전압과 주파수의 과도한 변동을 초래할 수 있다. 우리나라 함정 설계/건조 기준서에서는 이러한 펄스 부하의 운용을 제한하고 있으며, MIL-STD-1399 SECTION 300을 참조하도록 명시하고 있다. 이 표준은 2018년 개정되었는데, 펄스 부하 전력은 함정 전력 계통에서 드물게(infrequent) 또는 반복적으로(repetitive) 전력을 필요로 하는 사용 장비로 규정되어 있으며, 에너지저장장치를 통해서 전력을 보상받을 수 있는 장비로 명시되어 있다. 따라서 함정에서 펄스 부하전력의 용량이 증대될수록 ESS 도입은 필수적이며, 전체 전력 설비의 최적화를 위해서도 DC 배전 계통이 AC 계통보다 훨씬 유리하다.

## 6. 결론

본 논문에서는 교류 배전 방식을 적용하고 있는 수상함 전기추진 시스템에서 AC 모션 전원의 특징과 고조파 문제에 대해 언급하였다. 현재 수상함 전기추진

시스템에서는 다이오드 정류기의 다펄스화 또는 AFE 정류 단을 도입하여 고조파 문제를 해결하고 있다. 그러나 제한된 함 공간에서 이러한 필터의 추가적인 설치는 무게와 비용 측면에서 불리하다.

만약 대용량 전기추진 시스템의 DC-link 전압을 DC 모선으로 확대하여 DC 배전 방식을 채택하면, AC 계통에서의 돌입전류, 역률, 고조파 전류 및 3상 불균형에 대한 고려가 전혀 필요하지 않다. 또한 기계식 차단기와 변압기가 제거되면서 DC 계통 최적화를 통한 공간과 무게 절감 및 장비의 유연한 구성 등의 이점을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 수상함에 적용이 가능한 DC 배전 계통의 구성 및 적용 방안에 대해 제안하였다. 수상함에 DC 배전 계통을 적용하면 엔진 발전기와 함께 에너지 저장장치를 보조전원으로 연계하기도 쉽다. 발전기와 DC 모선은 AC-DC 컨버터로 연계되는데 전기추진 시스템에서와 마찬가지로 DFE/TFE 방식보다 AFE 방식의 전력 변환이 THD 특성과 고조파 필터 크기를 줄일 수 있어 유리하다. 특히, DC 배전 계통은 낮은 부하율에서 엔진의 속도를 낮추는 엔진 가변속 운전을 통해 발전 효율을 향상하여 연료 소비량 및 배기량을 상당히 감소시킬 수 있다.

한편, 수상함에 DC 배전 계통을 적용하기 위해서는 아직 검토해야 할 부분들도 많이 있다. 저전압 직류 배

전은 상용 선박을 기반으로 시장 성장 단계에 있으나, 수상함에 수천 V 이상의 DC 전압을 적용하기에 상용화된 기기가 절대적으로 부족하고, 고전압 컨버터의 개발, 보호기기 및 차단장치의 개발, 그리고 관련 규정이나 표준화 등이 필요하며 따라서 이에 대한 산학연과 군의 협조가 절실하다.

## 참고문헌

- [1] "IEEE Recommended Practice for Electrical Installations on Shipboard - Design," in IEEE Std 45.1-2017, pp.1-198, Aug. 2017.
- [2] "IEEE Recommended Practice for 1kV to 35kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships," in IEEE Std 1709-2018 (Revision of IEEE Std 1709-2010), Dec. 2018.
- [3] P. Ghimire, D. Park, M. K. Zadeh, J. Thorstensen and E. Pedersen, "Shipboard Electric Power Conversion: System Architecture, Applications, Control, and Challenges [Technology Leaders]," in IEEE Electrification Magazine, Vol. 7, No. 4, pp. 6-20, Dec. 2019.
- [4] Naval Sea Systems Command (Ships Systems), "Department of Defense Interface Standard MIL-STD-1399, Section 300, Part 1 Medium Voltage Electric Power, Alternating Current," Sep. 25, 2018.
- [5] H. Kim, (2011) "A Study on the Selection of Control Method for Electric Propulsion System of Multipurpose Special Ships," Master's Thesis, Korea Maritime & Ocean University.