



Received: 2024/11/14  
Revised: 2024/11/22  
Accepted: 2024/12/26  
Published: 2024/12/31

**\*Corresponding Author:**

**Tae-Kue Kim**  
School of Electrical, Electronic and Control  
Engineering, Changwon National University  
20-1, Changwondaehak-ro, Uichang-gu,  
Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea  
Tel: +82-55-213-3633  
Fax: +82-55-213-3640  
E-mail: tkkim@changwon.ac.kr

# Bearingless 타입의 1.7 MW급 전동기 구동 시스템을 갖는 직렬 하이브리드 추진 함정의 축전위 분석 및 축계 전식 현상의 대책방안 연구

## A Study on the Power Status of Series Hybrid Propulsion Vessels with Bearingless Type 1.7 MW Motor Drive System and the Countermeasures of the Shaft System

김정호<sup>1</sup>, 주창대<sup>2</sup>, 정민욱<sup>2</sup>, 한수지<sup>3</sup>, 안원석<sup>4</sup>, 박희옥<sup>5</sup>, 김태규<sup>6\*</sup>

**Abstract**

본 연구는 bearingless 타입의 전동기 구동 시스템을 갖는 하이브리드 전기추진 함정에서 발생하는 축계 전식 현상의 원인을 축전압과 축전류로 분석하고, PWM 제어 기반 인버터에 의해 유도된 공통 모드 전압(CMV)과 shaft 회전에 따른 축전압의 영향을 추진함정의 구동 모드를 포함한 다양한 조건에 따라 규명하였다. FFT 분석과 축 접지 장치를 활용한 실험적 검증을 통해 축전압 저감 방안을 제시하였으며, 이를 통해 하이브리드 추진 함정의 전식 현상 저감을 위한 실용적 해결책을 제안하였다.

In this study, we analyzed the causes of shaft electro-corrosion in hybrid electric propulsion vessels equipped with a bearingless-type motor drive system, focusing on shaft voltage and current. We investigated the influence of common-mode voltage (CMV) induced by PWM inverter control and shaft rotation on shaft voltage under various conditions, including propulsion modes. Using FFT analysis and experimental validation with shaft grounding devices, we proposed effective solutions to reduce shaft voltage, providing practical measures to mitigate electrocorrosion phenomena in hybrid propulsion vessels.

**Keywords**

하이브리드 전기추진 함정(Hybrid Electric Propulsion Ship),  
Bearingless 타입 전동기(Bearingless Type of Motor),  
축 접지 장치(A Shaft Grounding Device),  
축계 전식현상(Shaft System Prevention Phenomenon)

**Acknowledgement**

이 논문은 2024년도 한국해군과학기술학회  
하계학술대회 발표 논문임

<sup>1</sup>해군 대령/해군 군수사령부 함정기술연구소 기관연구과장

<sup>2</sup>국립창원대학교 전기전자제어공학부 전기공학과 박사과정 연구원

<sup>3</sup>국립창원대학교 전기전자제어공학부 전기공학과 석사과정 연구원

<sup>4</sup>해군 군수사령부 함정기술연구소 기관연구과 추진제어연구원

<sup>5</sup>해군 군수사령부 함정기술연구소 기관연구과 추진체계연구원

<sup>6</sup>창원대학교 전기전자제어공학부 전기공학과 교수

Jeong-Ho Kim<sup>1</sup>, Chang-Dae Joo<sup>2</sup>, Min-Uk Jeong<sup>2</sup>, Su-Ji Han<sup>3</sup>, Won-Seok An<sup>4</sup>,  
Hee-Ohk Park<sup>5</sup>, Tae-Kue Kim<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>CAPT./Chief of Engineering Research Branch, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command, ROK Navy

<sup>2</sup>Ph.D course researcher, Dept. of Electrical Engineering, School of Electrical, Electronic and Control Engineering, Changwon National University

<sup>3</sup>Master course researcher, Dept. of Electrical Engineering, School of Electrical, Electronic and Control Engineering, Changwon National University

<sup>4</sup>Propulsion control researcher, Engineering Research Branch, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command, ROK Navy

<sup>5</sup>Propulsion system researcher, Engineering Research Branch, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command, ROK Navy

<sup>6</sup>Professor, Dept. of Electrical Engineering Major, School of Electrical, Electronic and Control Engineering, Changwon National University

### 1. 서론

하이브리드 전기추진 함정은 전기모터와 터빈을 함께 구동하여

추진력을 얻는 직렬 하이브리드 방식의 함정으로, 친환경적 운항과 연료 효율성 측면에서 주목받고 있다.

그러나 이러한 시스템에서는 고속 스위칭 인버터와 펄스 폭 변조(PWM) 제어에 의해 발생하는 고주파 공통모드 전압(common mode voltage, CMV)이 모터의 기생 커패시턴스와 결합하여 축 전압 및 축 전류 문제를 유발할 수 있다. 이로 인해 추진 모터와 추력 베어링 사이의 축계에서 전식 현상이 발생하며, 이 현상은 함정의 추진 시스템에 신뢰성과 안정성 측면에서 큰 영향을 미친다.

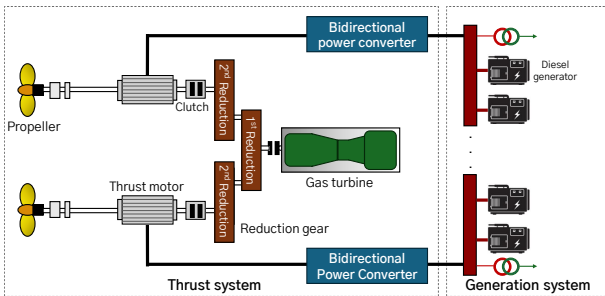


Fig. 1. Configuration chart of serial hybrid propulsion system

이처럼 PWM 인버터의 고주파 스위칭에 의해 유도되는 CMV는 모터의 Y결선 중성점과 고정자 프레임 접지 사이에서 높은  $dv/dt$  값을 가지며, 일반적인 베어링 구동 시스템에서는 이 축 전압이 베어링을 통과하여 용량성 방전 전류, 축 전류 및 순환 전류와 같은 형태로 전식 현상을 발생시켜 베어링의 수명을 단축시킨다.

$$V_{sh} = \frac{C_{wr}}{(C_{wr} + C_{sr} + 2C_b)} V_{CMV} \quad (1)$$

본 연구에서는 이러한 축계 전식현상이 발생하는

bearingless 타입의 전동기 구동 시스템이 적용된 하이브리드 추진 함정을 대상으로 분석하였다. 해당 시스템에서는 베어링 대신 구리 재질의 스너버 패드가 축 전류의 경로를 대체하며, 이 스너버 조립체는 충격이나 회전자자의 이심 현상으로부터 고정자와 회전자를 보호하는 역할을 한다. 그러나 약 1 mm의 윤활막을 포함한 스너버 패드와 축 간의 구조에서도 축계 전식 현상의 소요가 발생하고 있는 실정이다.

따라서, bearingless 타입의 전동기 구동시스템을 갖는 하이브리드 추진 함정에서 발생하는 축계 전식 현상의 주요 원인에 대한 규명을 shaft-to-frame 전압의 분석을 통해 제시한다. 특히 전기 추진시스템만을 갖는 전전기 추진 함정과는 달리, 직렬 하이브리드 전기 추진 함정의 추진 전동기 모드(thrust motor mode)와 터빈 모드(gear turbine mode)에서 발생하는 축 전압을 주파수 분석(FFT) 기법으로 비교 분석하여, 두 모드에서의 축계 전압 차이를 규명하였다.

이를 통해 전기추진함정의 구동모드에 따른 전식 현상의 특성을 축 전압 분석을 통해 파악하고, 이들 차이에 기반하여 축계 전식 현상의 저감 방안에 대하여 실험을 통해 실제 필드에 적용 가능한 방안을 검증하였다. 현재 전식이 발생하는 추진함정을 대상으로 스코프 코더(scope coder)를 활용한 최소한의 장비를 사용하여 필드 환경에서의 축 전압을 계측하고, FFT 분석을 통해 전동기 모드와 터빈 모드에서 나타나는 축 전압의 차이점을 확인하였다.

이러한 분석을 바탕으로, 축계 전식 현상을 저감하기 위해 필드에서 실질적으로 적용할 수 있는 shaft-to-frame grounding(SFG) 장치 혹은 브러시-슬립 링(brush-slip ring)의 축 전위 저감 효과를 실험적으로 검증하였다.

특히 기존의 브러시와 슬립 링(brush+slip ring)

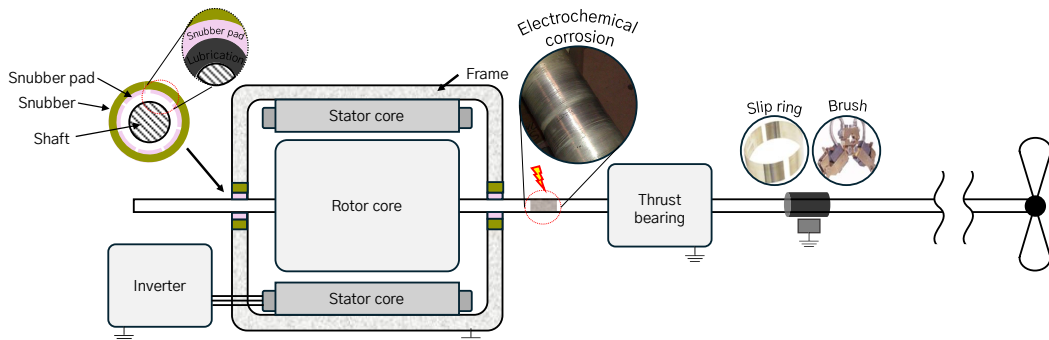


Fig. 2. Bearingless type motor drive system of propulsion ship with shaft electric charge

구조는 축 전위 저감을 위해 사용되었으나, 브러시의 접촉 면적에 따라 접촉 저항이 증가하므로 축계 전식 현상을 방지하기 위한 충분한 효과를 거두기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 접촉 면적을 넓혀 축 전류가 원활히 접지로 빠져나갈 수 있는 SFG 장치를 하이브리드 추진 함정에 실제 사례로 적용하여, 기존 브러시-슬립 링과 SFG 장치 간의 축 전위 저감 효과를 비교 분석하였다.

## 2. 전기추진함정의 구동 모드 및 측정 위치에 따른 축전압 분석

일반적으로 교류 전동기 구동 시스템에서의 전식 현상은 베어링 전류, 축 전류, 프레임 전류, 접지 전류 등 통전되어 흐르는 경로에 따라 다양한 표현으로 나타낼 수 있는 일종의 기생 전류 혹은 방전 전류에 의해 발생한다. 앞서 언급한 바와 같이, 전식 현상의 원인이 되는 축 전압/축 전류는 베어링이 통전 경로를 제공하는 역할을 하며 베어링의 수명 단축에 큰 영향을 미친다.

본 논문에서 다루는 1.7 MW급 bearingless 타입 교류전동기 시스템의 경우, Fig. 3와 같이 모터 내부에 베어링이 있지 않고 drive-end(DE) 단에 개별적으로 설치되어 있다. 이때, 스너버 조립체가 회전자 의 이심 현상 등으로부터 고정자와 회전자의 기구적인 보호 역할을 수행한다. 따라서, 해당 전기추진함정의 경우 교류 전동기 내부에 베어링이 함께 설치되어 있지는 않지만 결국 전체 축 계통에 연결되어 있으며, 이는 기생 커패시턴스 성분 에 의한 축 전류 통전 경로를 제공할 수 있는 구조이다.

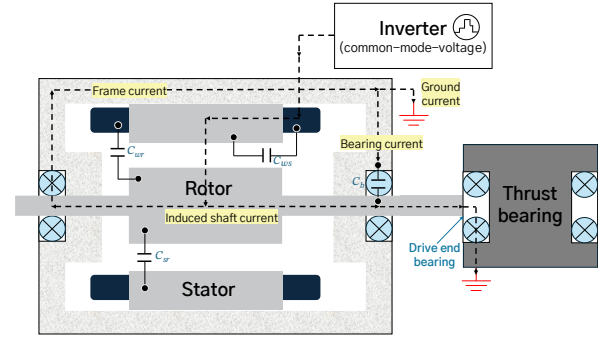


Fig. 3. The path of capacitive current from thrust bearings and thrust motors[9]

### 2.1 측정 위치에 따른 축 전압 계측 및 분석

본 논문에서는 앞서 서술한 내용을 바탕으로, 전식 현상이 발생하는 함정 2척에 대하여 축 전압을 계측 및 분석을 수행하였다. 가장 전식이 심한 추력전동기와 drive-end 단의 추력베어링 사이의 한 지점과 추력베어링과 부하(프로펠러) 사이의 한 지점에 대하여 총 두 지점에서 축 전압을 계측하였다. 이러한 축 전위 계측 지점에 대한 모식도를 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

각 측정 지점에서 축 전압을 측정하여 Fig. 5에 나타냈다. 이는 추진함정의 구동 모드 중 전동기 모드에 해당하며, shaft의 속도 단계를 구분하는 Lever 5 (약 98 RPM)에서의 축 전압을 나타낸다.

앞서 언급한 두 측정 지점 즉, 추력전동기와 drive-end 단의 추력베어링 사이의 지점을 측정 지점 A, 그리고 추력베어링과 부하(프로펠러) 사이의 한 지점을 측정 지점 B라고 하였을 때, 축계 전식 현상의 정도가 심한 곳은 측정 지점 A와 추력 베어링이다. 축

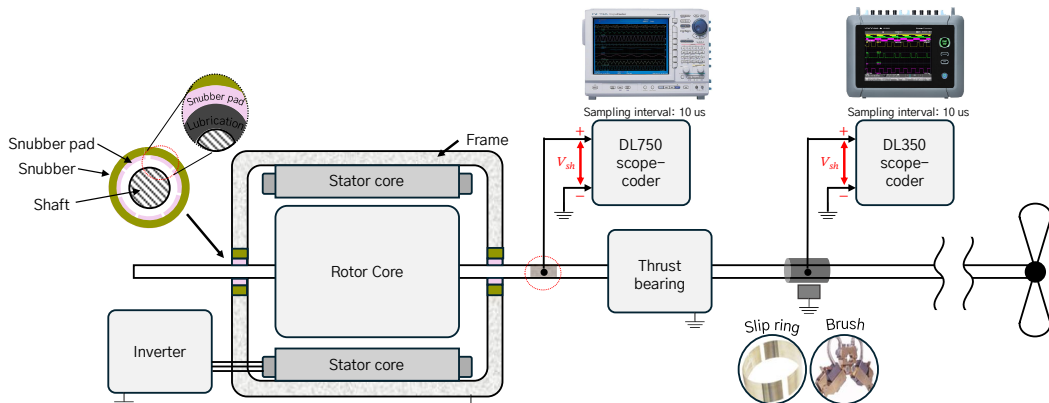


Fig. 4. A schematic diagram of the axial voltage measurement system applied to the thrust motor chamber of the propulsion ship where the shaft electric equation has occurred

전압의 크기가 축으로 흐르는 전류의 크기와 비례함으로써 전식에 미치는 영향도가 결정되는데, 이러한 경향을 Fig. 5를 기준으로 각 측정 지점에 따른 축전압 계측 파형을 통해 확인할 수 있다.

즉, 전기추진함정의 전동기 구동에 따라 발생한 인버터의 CMV 혹은 shaft의 속도에 비례한 end-to-end voltage로 인해 축 전압이 발생하게 되고, 측정 지점 A와 B의 전위차만큼 그 사이에 있는 추력 베어링을 통해 축 전류의 통전이 되는 것으로 판단된다.

2.2 추진함정의 구동 모드에 따른 축 전압 계측 및 분석

본 논문은 추진동력을 모터로부터 얻는 전전기함정(all electric ship)이 아닌 직렬 하이브리드 추진계통을 갖는 전기추진함정(Fig. 1 참조)을 다룬다. 따라서, 축 전식 현상을 다루는 일반적인 교류전동기 구동시스템과는 달리, 기동 조건에 따라 추진 전동기 모드(thrust motor mode)와 터빈 모드(gear turbine mode)로 구동 모드가 나뉜다. 여기서, 축 전식 현상을 일으키는 축 전압의 경우 인버터 CMV에 의한 영향도 있지만, shaft의 속도에 비례해 유도된 축 전압의 영향도 발생하게 된다.

그러므로 전식 현상이 발생하는 함정 2척에 대하여 동일한 속도(레버 5, 축속도 98 RPM)에서의 전동기 모드와 터빈 모드에 따른 축 전압을 계측 및 분석하였으며, 해당 계측 결과는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 여기서, 용이한 비교 분석을 위하여 Fig. 7에 명시된 계측 파형의 경우 전압의 최대/최소치는 모두 동일하며, Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)를 10 ms/div으로 확대한 파

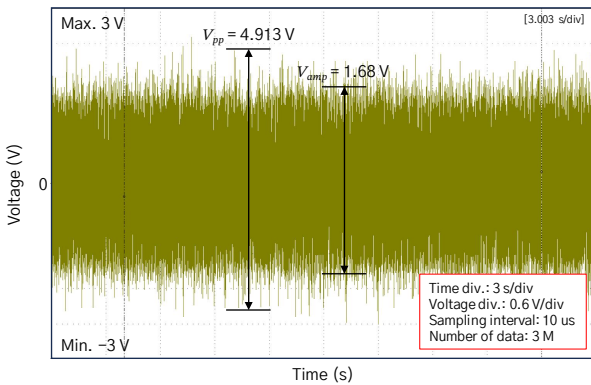
형이다.

Fig. 7의 계측 결과를 통해 확인할 수 있듯이, 동일한 속도 조건이더라도 축 전압의 peak-to-peak 값은 터빈 모드(1.2267 V)보다 전동기 모드(4.913 V)에서 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 7(b)에서처럼 각 파형을 확대하였을 때 전동기 모드에서의 축 전압이 터빈 모드에서의 축 전압에 비해 고주파 대역의 노이즈가 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다.

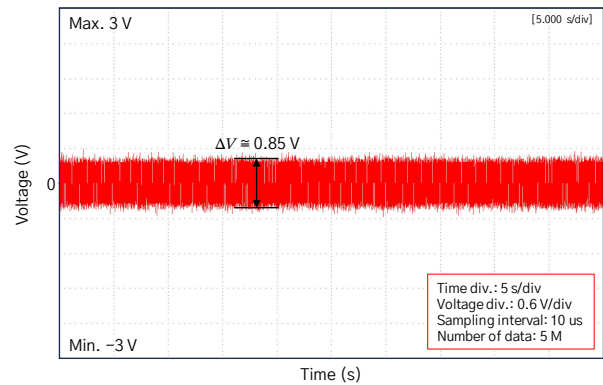
그러나, 전동기 모드에서의 파형을 10 ms/div만큼 확대하였을 때 나타나는 기본파 성분과 터빈 모드에서의 기본파 성분이 동일한 주파수를 가지며, 노이즈 성분을 무시하고 보았을 때 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 즉, 추진 전동기 모드에서의 shaft 속도가 터빈 모드와 동일함에도 peak-to-peak 평균 전압이 크게 나타나는 이유는 터빈 모드에서 나타나는 축의 회전속도에 비례한 기본파 성분에 인버터의 공통모드 전압 및 인버터 구동 주파수의 기본파 성분이 추가된 것으로 미루어볼 수 있다.

$$\omega_{TM} \cong \omega_{GT} \Rightarrow \begin{cases} |V_{TM}|_{pp} > |V_{GT}|_{pp} \\ \Delta V_{TM} \approx \Delta V_{GT} \end{cases} \quad (2)$$

다만 단순 시간파형으로 비교하는 것은 정확한 해석으로 볼 수 없기에, 본 논문에서는 이러한 경향성에 대한 근거를 계측된 축 전압에 대한 FFT 분석을 통해 검증하였다. 따라서, 해당 장에서 명시한 구동 모드에 따른 축 전압 분석은 시간 도메인에 대한 분석이며, 구동 모드에 따라 축 전압이 높고 낮음을 떠나 근본적인 축 전위 발생 원인에 대한 규명을 통해 그에 맞는 대책방안을 설계하고자 한다.



(a) Measurement point A: between thrust motor and thrust bearing



(b) Measurement point B: between thrust bearing and load end

Fig. 5. Shaft voltage at two measurement points in motor mode of propulsion(speed lever 5, 98 RPM) conditions



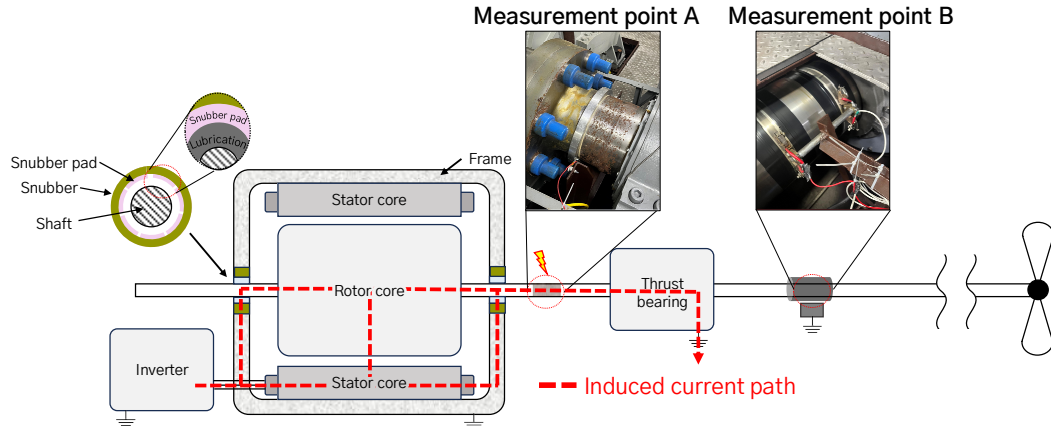


Fig. 6. Electric current conduction path based on shaft voltage measurement result according to measurement position

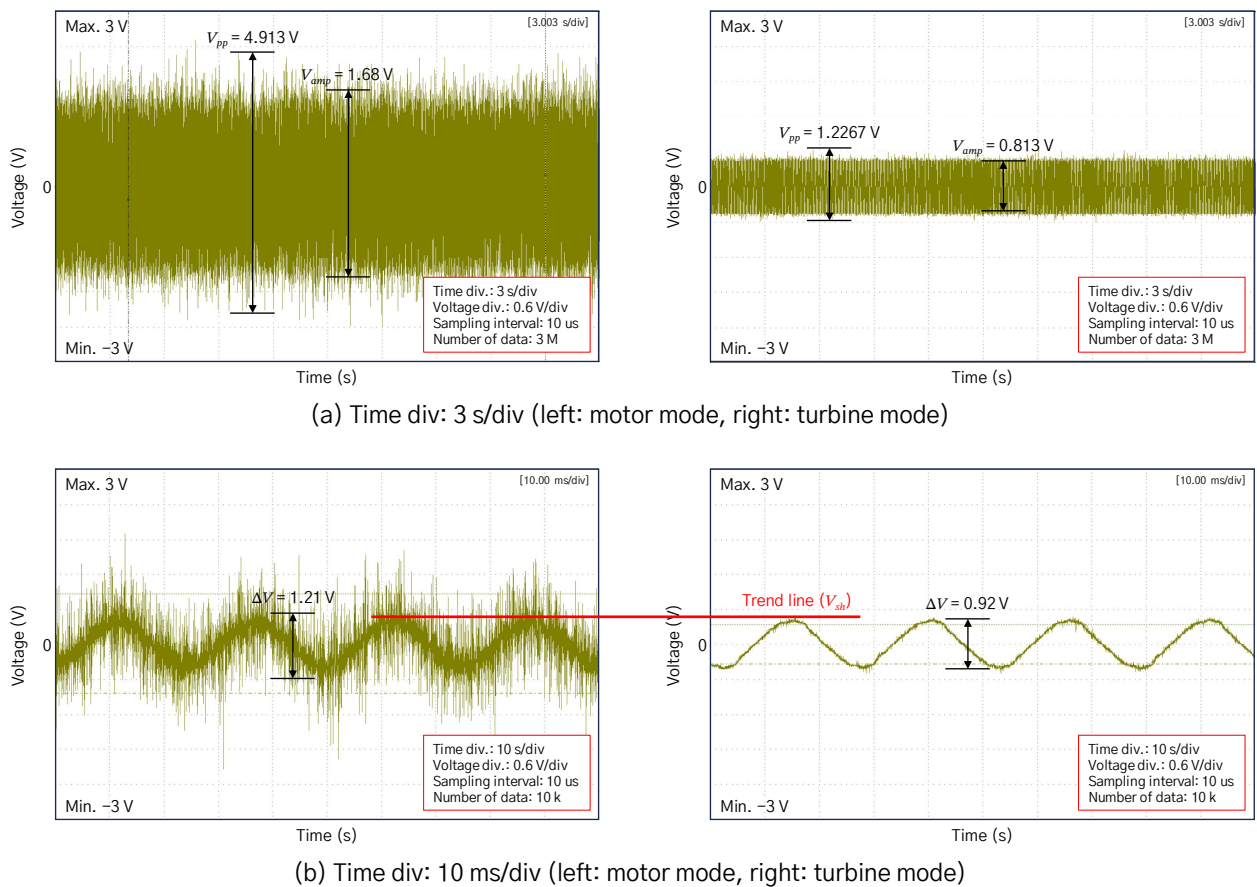


Fig. 7. Shaft voltage waveform according to driving mode of propulsion definition

### 2.3 추진함정의 축 속도에 따른 축 전압 계측 및 분석

추진함정의 축 속도에 비례하여 유도되는 모터 축 양단의 전압(end-to-end voltage)과 축 전압 영향성을 해석하기 위하여 Fig. 8과 같이 추진함정의 축 속도에 따른 축 전압 비교 계측을 수행하였다. 여기서, Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 동일한 터빈 모드에서 각각

축 속도 152 RPM, 축 속도 220 RPM의 조건에서의 축 전압 계측 파형을 나타낸다.

Fig. 8에서 나타난 축전압 계측파형을 시간 도메인 상에서 분석하였을 때, Fig. 7에서 명시된 터빈 모드(축 속도 98 RPM)의 파형에 비교하여 약 60 RPM만큼 축 속도가 증가할 때마다  $\Delta V$ 가 약 0.2 V 가량 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한, 기존 속도 98 RPM

에서 나타났던 축 전압의 파형에 비해 터빈 모드에서 속도가 증가할수록 큰 전압으로 튀는 스파이크성 전압의 빈도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이처럼 시간에 따른 전압변동성이 크게 나타나는 경향은 ( $dv/dt \uparrow$ ), 축전류 통전 경로를 제공하는 모터 혹은 추력베어링 등의 축과 접지 간의 기생 커패시턴스 성분에서 보다 높은 방전전류 ( $i_C \uparrow$ )로 나타날 수 있다.

$$i_C = C \frac{dv_c}{dt}, v_C = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (3)$$

### 3. 축 전압 저감 방안에 대한 실험 결과 및 축 전압에 대한 FFT 분석

#### 3.1 축 접지 여부에 따른 축 전압 계측 및 분석

전기추진함정의 구동 모드 및 측정 위치에 따른 다

양한 축 전압 분석 내용을 바탕으로, 축계 전식 현상을 저감하기 위해 필드에서 실질적으로 적용할 수 있는 shaft-to-frame grounding(SFG) 장치 혹은 브러시-슬립 링(brush-slip ring)의 축 전위 저감 효과를 실험적으로 검증하였다. 이때 Fig. 9과 같이, 측정 지점 A에서는 SFG 장치를 통한 접지 연결 여부를 결정하며, 측정 지점 B에서는 브러시-슬립 링 구조를 통해 접지 연결 여부를 결정한다.

Fig. 10은 축 접지 여부에 따라 전동기 모드와 터빈 모드에서 속도 레버5(축 속도 98 RPM) 조건 하에 측정된 축 전압의 변화를 나타내며, shaft-to-frame 접지 여부가 축 전압에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 축전압 파형은 전동기 모드와 터빈 모드 모두에서 접지를 연결했을 때 전압 진폭( $V_{amp}$ )이 감소하였으며, 이는 축-프레임 접지를 통해 축 전압을 저감시켜 전식 현상 억제에 기여함을 나타낸다. 또한, 전동기 모드의 경우에는 측정

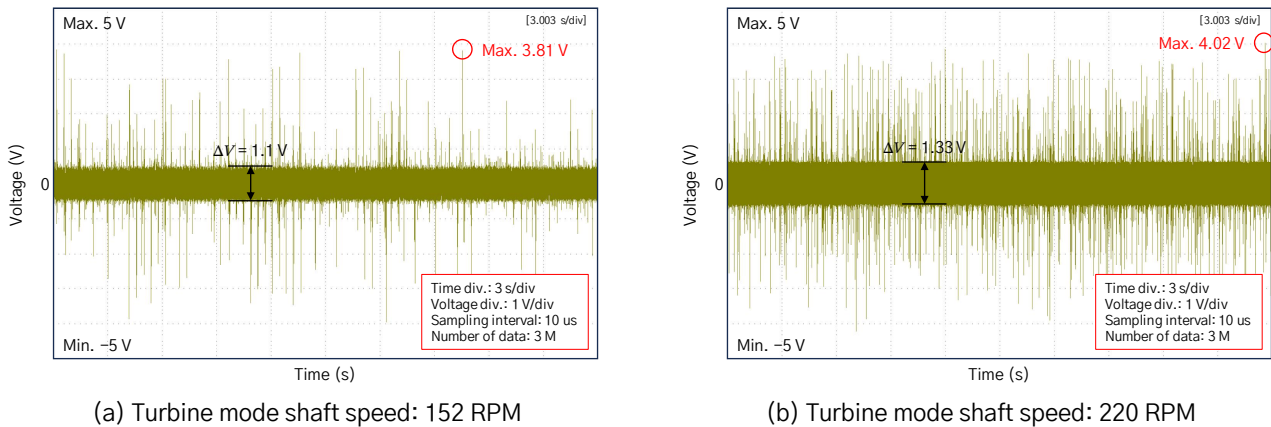


Fig. 8. Shaft voltage waveform according to shaft speed of propulsion definition

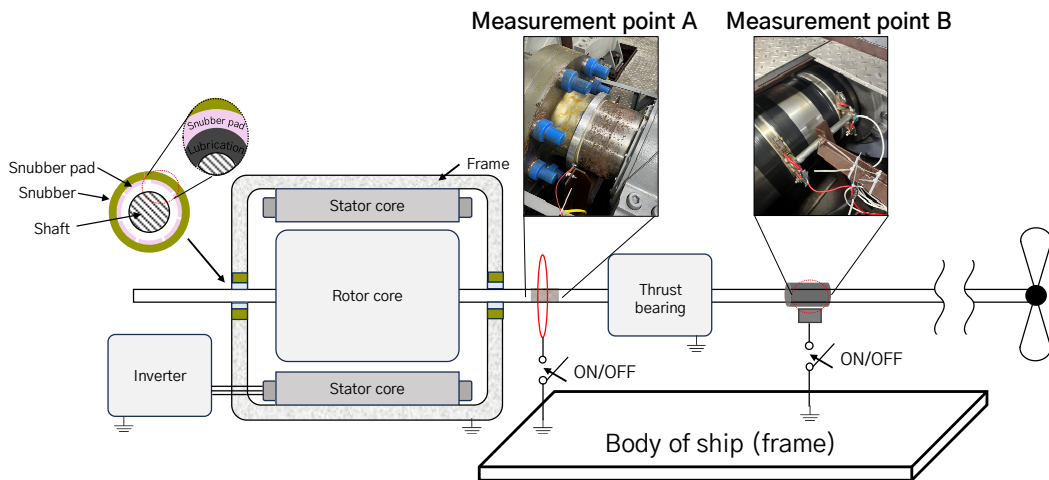


Fig. 9. A schematic diagram showing the shaft-to-frame ground control position of the electric propulsion ship

지점 A에서의 shaft-to-frame 접지에 따라 축 전압의 진폭( $V_{amp}$ )이 1.68 V에서 1.18 V로 약 0.5 V 감소하였으며, 터빈 모드에서 축 전압의 진폭( $V_{amp}$ )이 0.813 V에서 0.219 V로 약 0.6 V 가량 감소한 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 다루는 전기추진함정의 축계 구동 시스템의 축 전압에 대한 등가회로를 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로, 두 측정 지점에서 이루어지는 축-프레임 접지 여부 또한 Fig. 11의 등가회로에서 저항 성분으로 모델링될 수 있다. 즉, 모터의 기

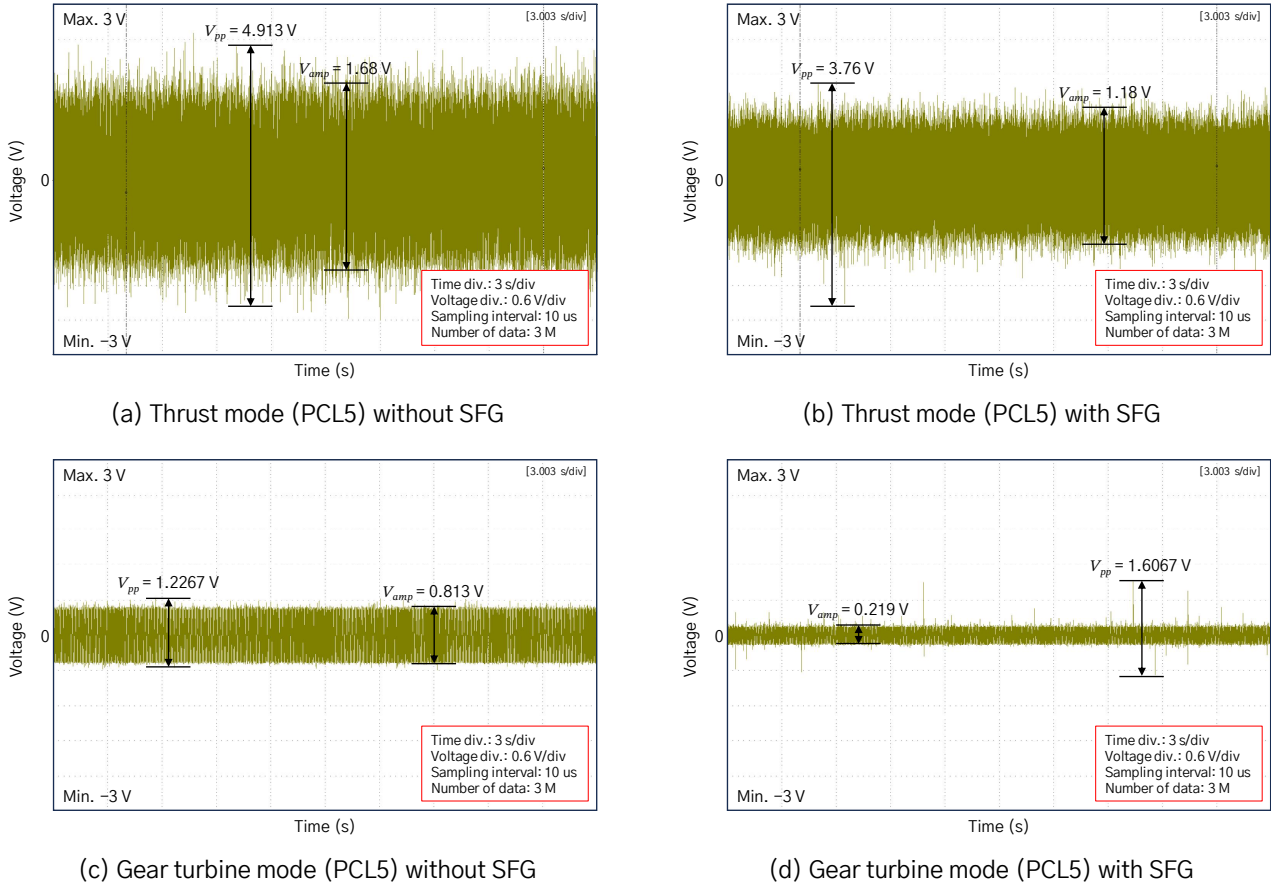


Fig. 10. Shaft voltage waveform based on shaft-to-frame ground and drive mode for measurement point A of propulsion ship

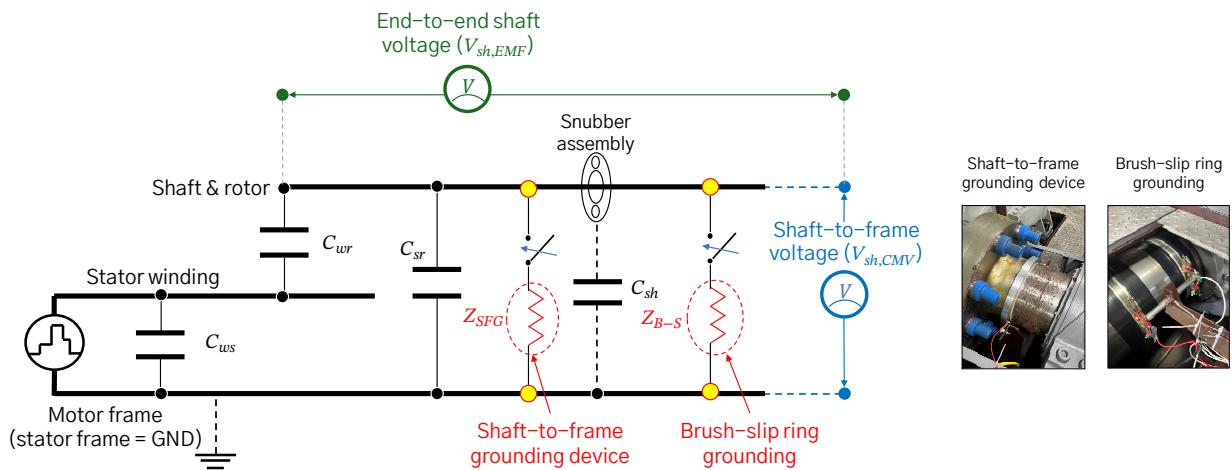


Fig. 11. Shaft voltage equivalent circuit model of shaft system with AC motor

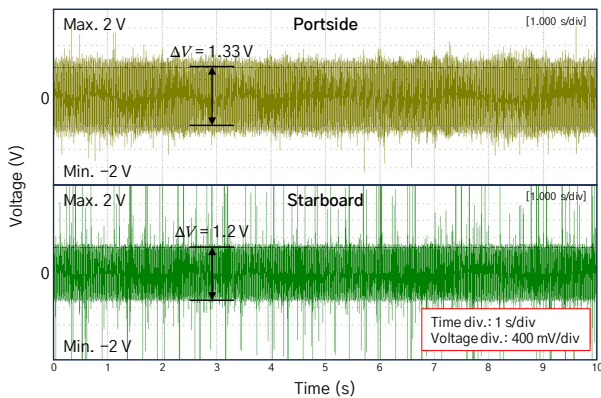
생 커패시턴스 성분과 인버터 구동에 따른 CMV 전압에 의해 유도된 축 전압을  $Z_{SFG}$  혹은  $Z_{B-S}$ 로 모델링된 축과 프레임(접지) 사이의 통전 경로를 제공하여 축 전압 저감에 기여할 수 있다.

Fig. 12를 통해 확인할 수 있듯이, 기존 축계 전식 현상이 발생하던 전기추진함정에서 축 전위 저감을 위해 적용하고 있던 브러시-슬립 링 방식은 축 전위 저감 효과가 미미한 것을 확인할 수 있다. 이는, 기존에 shaft-to-frame(ground) voltage 저감을 위해 사용되는 브러시-슬립 링 구조의 경우 브러시의 접촉 면적에 따라 두 도체가 서로 접촉하고 있는 부분의 경계면에서 나타나는 접촉저항이 높게 나타날 수 있다. 따라서, 브러시-슬립 링 구조의 접지 장치의 자체 임피던스가 높아지게 되고, 축 전류가 보다 낮은 임피던스를 갖는 곳으로 흘러가게 되면서 축계 전식을 유발할 수 있다.

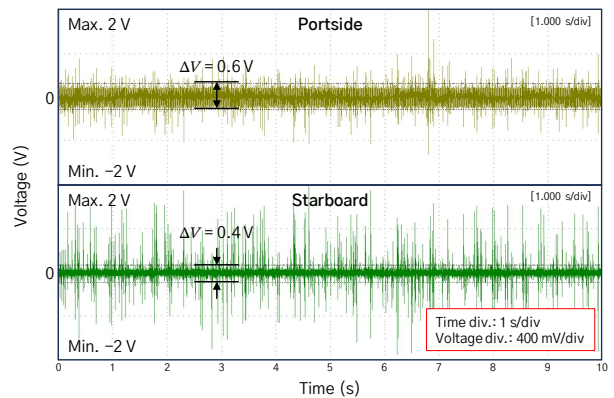
그러므로, 식 (4)와 같이 브러시-슬립 링 구조의 접지 장치보다 접촉 면적을 넓혀 낮은 임피던스 경로를 제공하여 축 전류가 비교적 선체 접지로 원활히 빠져나갈 수 있도록 실사례로서 적용하고 실험을 통해 검증하였다.

$$Z_{SFG} < Z_{B-S}(\text{brush-slip ring}) \tag{4}$$

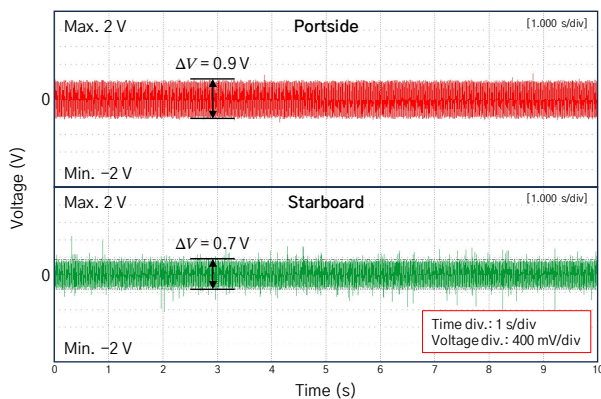
따라서, 단순히 축과 접지를 연결시킴으로써 축전위 저감 및 전식현상에 대한 대책방안을 수립하는 것은 적절하지 않다. 해당 연구내용을 바탕으로, 전식 현상이 발생한 위치에 따른 축전위 저감장치의 설치 위치가 중요하며, 기존 추진함정 체계에서 PSG로 사용되고 있는 접지장치의 임피던스 보다 낮은 임피던스의 장치를 사용하여 축전류 통전 경로를 제공하는 것이 필요하다.



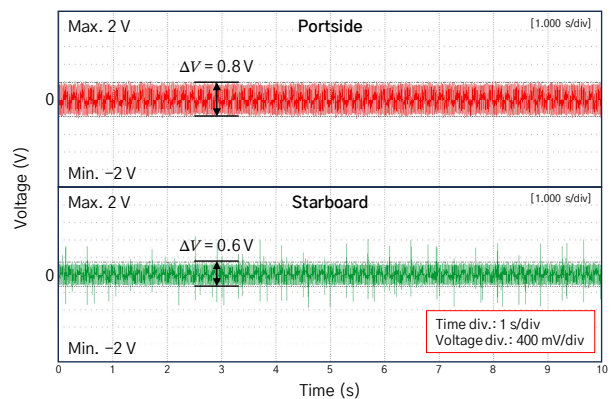
(a) G/T (PCL 9) without grounding at measurement point A



(b) G/T (PCL 9) with grounding at measurement point A



(c) G/T (PCL 9) without grounding at measurement point B



(d) G/T (PCL 9) without grounding at measurement point B

**Fig. 12.** Shaft voltage waveforms appearing at each measurement point according to shaft-to-frame grounding of the propulsion definition



### 3.2 축 전압에 대한 FFT 분석

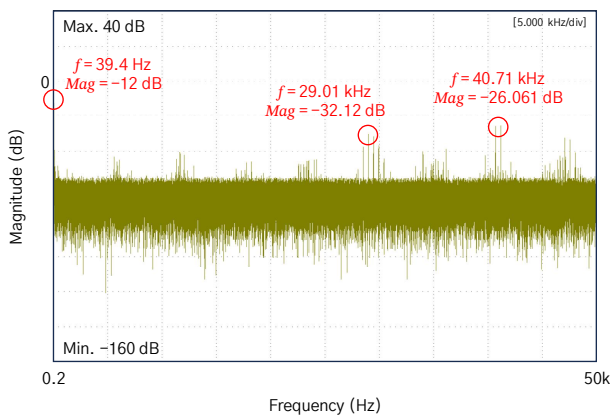
결국 시간 도메인에서 Fig. 10과 같은 축 전압 파형에 대해 분석하였을 때, 축 전압의 진폭, 피크, 최대값 등의 정보만을 다룰 수 있기 때문에 축계 전식 현상에 영향을 미치는 축 전압 성분의 분석은 제한적일 수밖에 없다. 따라서, Fig. 13과 같이 동일한 속도 조건(레버 5, 98 RPM)을 갖는 전동기 모드와 터빈 모드에서의 축 전압에 대해 log spectrum FFT 분석을 수행하였으며, 이를 통해 축 전위의 원인분석 및 그에 맞는 대책방안에 대해 연구하였다.

Fig. 13에 나타나 있는 조건은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫 번째는 추진함정의 구동에 따른 분류, 두 번째는 축-프레임 접지 여부이다. Fig. 13(a)와 Fig. 13(b)를 통해 확인할 수 있는 전동기 모드에서의 축 전압 주파수 성분을 분석하면 크게 아래와 같이 나눌 수 있다.

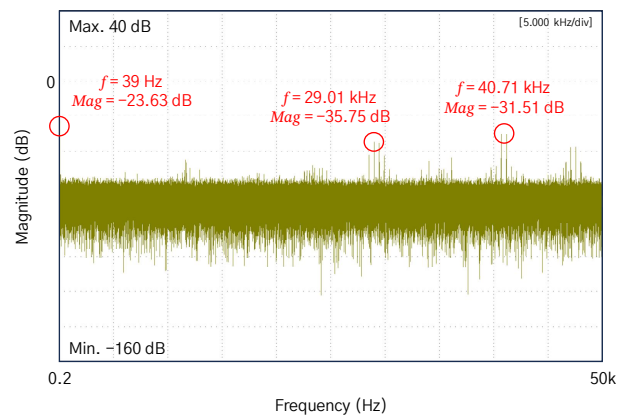
- (1) 축(shaft) 속도에 비례한 기본파 주파수 성분
- (2) 인버터 구동에 따른 스위칭 주파수에 비례한 고주파 성분

위 전동기 모드에 대한 FFT 분석 결과 가장 큰 비율을 차지하는 주파수는 축(shaft) 속도에 비례한 기본파 성분이며, 측정 지점 A에 대해 접지를 연결하였을 때 해당 기본파 성분을 포함한 고주파 성분까지 모두 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 이때, 측정 지점 A에서의 접지 연결을 통해 기본파 및 고주파 성분들이 줄어드는 경향은 일치하나, 축 속도에 비례한 기본파 성분이 가장 큰 폭으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

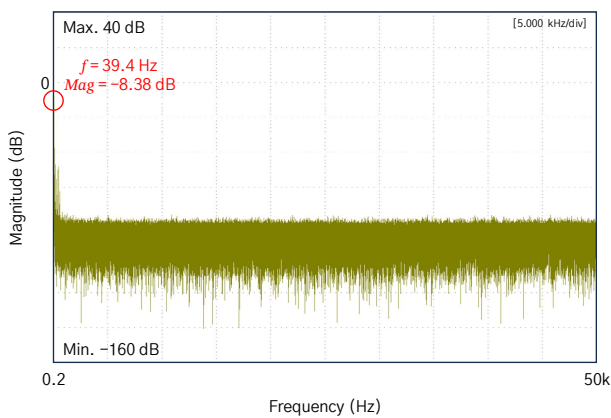
한편, Fig. 13(c)와 Fig. 13(d)에 나타난 터빈 모드에서의 축 전압 주파수 성분을 분석하면 크게 아래와 같이 나타난다.



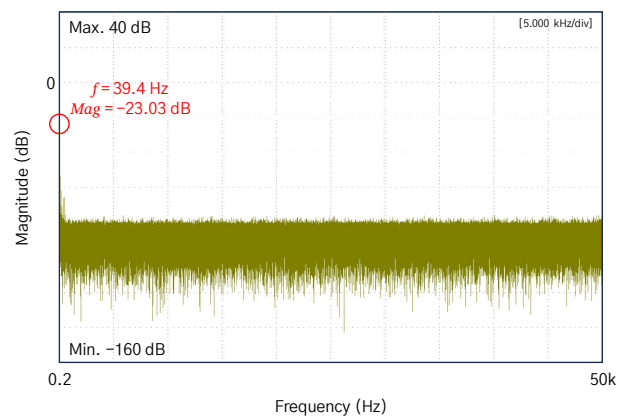
(a) T/M (PCL 5) without shaft-to-frame grounding



(b) T/M (PCL 5) with shaft-to-frame grounding



(c) G/T (PCL 5) without shaft-to-frame grounding



(d) G/T (PCL 5) with shaft-to-frame grounding

**Fig. 13.** Shaft voltage FFT analysis according to driving mode for shaft voltage waveforms measured at Point A

(1) 축(shaft) 속도에 비례한 기본파 주파수 성분

즉, 터빈 모드에서는 교류전동기의 구동을 위한 인버터가 동작하지 않기 때문에, shaft-to-frame의 전위를 측정하였을 때 FFT 분석 결과에 고주파 영역의 성분이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 터빈 모드와 전동기 모드의 FFT 분석 결과에서도 나타나듯이, 축 전압을 이루고 있는 성분 중 기본파의 성분이 절대적이기 때문에, 전식 현상이 심한 측정 지점 A에서의 접지 여부가 shaft 속도에 비례한 기본파 성분의 저감에 크게 기여함을 확인할 수 있다. 이를 수치적으로 나타낸다면, 전동기 모드(T/M)에서 shaft-to-frame 접지에 따른 기본파 성분의 저감 효과는 약  $\Delta Mag \cong -11.63[\text{dB}]$ 이며, 터빈 모드(G/T)에서 shaft-to-frame 접지에 따른 기본파 성분의 저감 효과는 약  $\Delta Mag \cong -14.65[\text{dB}]$ 임을 Fig. 13에서 확인할 수 있다.

앞서 서술한 다양한 조건에서의 전기추진함정의 축 전압 분석 결과를 바탕으로, 축 전압 저감효과를

갖는 축-접지 장치에 대해 실험적으로 검증하였다. 따라서, 추진전동기와 추력 베어링 사이의 전식 현상에 대한 원인을 축 전압과 축 전류로 규명하고, 하이브리드 추진 함정의 축계 전식 현상 저감을 위한 실용적 대책을 Table 1에 정리하였다.

본 논문에서는 직렬 하이브리드 추진 함정에서 발생하는 축계 전식 현상의 원인을 축-접지 전압의 분석을 통해 규명하였다. 특히, 구동 모드에 따른 축 전압의 변화를 주파수 분석(FFT) 기법을 사용하여 비교 분석함으로써 전동기 모드와 터빈 모드 사이의 축 전압 차이를 도출하였다.

이를 기반으로 축계 전식 현상의 특성을 구체적으로 파악하고, 실제 운용되고 있는 함정에 적용하는 시험을 통해 축 전압 저감 방안을 검증하였다. 기존의 브러시-슬립 링 구조의 한계를 극복하기 위해 접축 면적을 확대하여 더 원활한 전류 경로를 제공하는 SFG(shaft-to-frame grounding) 장치를 적용하고, 그 결과를 기존 방식과 비교하여 축 전위 저감 효과를 입증하였다.

다양한 조건에서의 축 전압 분석을 통해 축 전압

**Table 1.** Measures for reduction of shaft voltage/shaft current in hybrid propulsion vessels

Classification of causes	Countermeasures			
	Field step	Inverter side	Motor design side	Bearing side
Changing and blocking the shaft current path	ABB's MSCP (motor shaft current protector)			
	AEGIS's SGR (shaft grounding ring)	-	Apply Copper Shield between stator/rotor core and frame of motor (copper shielding)	Insulation bearings application
	Shaft-ground connection via brush-slip ring			
	Direct grounding between motor frame and load unit			
Reducing parasitic capacitance	-	-	Change winding structure	Optimal design of ball shape for bearings satisfying lubricating film minimum thickness
Reducing common-mode-voltage (CMV)	Symmetric three-core shield of inverter output cable + symmetric three-core ground cable	Filter design	-	-
	Construction of inlet high frequency grounding of inverter output cable	PWM control technique for CMV reduction		

저감 장치의 설치 위치, 구동 모드, 축 속도 등에 따른 영향성에 대해 확인하였으며, 이를 통해 추진전동기와 추력 베어링 사이의 전식 현상의 원인을 체계적으로 분석하였다.

추가적으로, 기생 커패시턴스를 줄이는 방안으로 절연 소재 사용과 윤활유 교체를 통한 절연 강화가 전동기 구동 시스템의 구조적 변경 없이도 실용적인 해결책이 될 수 있다. 이러한 연구 결과는 현재 전식 문제를 겪고 있는 함정 혹은 추후 활용될 하이브리드 추진 함정에서의 전기 추진 시스템의 내구성과 안정성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구결과를 바탕으로 미루어보았을 때, 하이브리드 추진 함정에서 나타나는 축계 전식 현상은 전동기 모드 혹은 터빈 모드 어느 한 동작 구간에 의해 발생하는 문제가 아니며, 각 구동 모드에 적절한 대책 수립을 강구하는 것이 필요하다.

최종적으로, 현재 전기추진함정에서 발생하고 있는 추력 베어링 및 축계 전식 현상의 문제점을 현안으로 다루고 있는 만큼, 하이브리드 추진함정의 축계 전식 현상 및 대책에 대해 다음과 같이 단계별로 제시하고자 한다.

- (1) 현 단계에서 적용 가능한 방안(현재 운용되고 있는 함정에서 축계 전식 현상이 발생한 경우)
  - bearingless 타입의 추진 전동기의 스너버 조립체를 분리하여 Copper 패드의 절연코팅을 실시하거나 혹은 절연재를 추가 하는 방법
  - 스너버 패드와 축 사이의 약 1mm 간격 내에서 존재하는 윤활소재를 절연윤활유로 변경하는 방법
  - 본 논문에서 다룬 방안으로써 축과 접지 사이의 전위를 저감시키기 위하여 브러쉬-슬립링 접지 장치보다 접촉면적을 넓혀 보다 낮은 임피던스의 축-접지 전류 경로를 제공하는 방안
- (2) 향후 건조되는 새로운 전기추진함정에 적용 가능한 방안
  - 모터 제작 시 권선 구조 변경을 통해  $C_{wr}$ ,  $C_{ws}$  등의 기생 커패시턴스 저감 방안

- 모터 프레임 내부에 고정자/회전자 코어와 프레임 간의 구리 차폐재 사용
- 인버터의 공통 모드 전압 저감 PWM 기법 적용

#### 참고문헌

[1] J. S. Kim, "Research on Novel Equivalent Parasitic Impedance Network Model and Robust Design Based on FEM of IPMSM for Shaft Voltage Reduction," Ph.D. dissertation, Dept. of Electrical and Computer Eng., Sungkyunkwan University, 2020.

[2] J.-H. Lee, K.-H. Shin, S. Sung, and J.-H. Park, "Design and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for 1 MW Class Electric Propulsion Ship According to Shape Ratio and Number of Series Turns per Phase," J. Korean Magn. Soc., Vol. 33, No. 2, pp. 82-92, Apr. 2023, doi: 10.4283/JKMS.2023.33.2.082.

[3] J. Park, T. Wellawatta, H.-M. Kim and J. Hur, "New Equivalent Circuit of the IPM-type BLDC Motor for Calculation of Shaft Voltage by Considering Electric and Magnetic Fields," in Proc. IEEE Int. Conf., 2015, pp. 1872-1877.

[4] J.-K. Park, S.-H. Rhyu, and J. Hur, "Shaft-to-frame Voltage Mitigation Method by Changing Winding-to-rotor Parasitic Capacitance of IPMSM," in Proc. IEEE Int. Conf., 2017, pp. 3571-3576.

[5] A. Muetze and A. Binder, "Techniques for Measurement of Parameters Related to Inverter-induced Bearing Currents," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 43, No. 5, pp. 1274-1283, Sep./Oct. 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.904413.

[6] Y.-K. Lee, J.-H. Im, and J. Hur, "Analysis of Common-mode Voltage and Shaft Voltage of IPMSM According to Inverter Parameters," Trans. Korean Inst. Electr. Eng., Vol. 71, No. 1, pp. 071-078, Jan. 2022, doi: 10.5370/KIEE.2022.71.1.071.

[7] K.-T. Ryu and Y.-H. Lee, "Speed Control for Low Voltage Propulsion Electric Motor of Green Ship through DTC Application," J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc., Vol. 24, No. 7, pp. 422-432, Jul. 2023, doi: 10.5762/KAIS.2023.24.7.422.

[8] J.-S. Kim, H.-M. Jeon, and D.-K. Kim, "A Study on Characteristics of Each Operation Mode for Hybrid Electric Propulsion Ship by Operation Circumstances," J. Korean Soc. Mar. Eng., Vol. 41, No. 3, pp. 245-250, Mar. 2017, doi: 10.5916/jkosme.2017.41.3.245.

[9] C.-H. Kim, S.-B. Jun, H.-J. Yoon, N.-H. Kim, H.-C. Jung, R.-E. Kim and S.-Y. Jung, "Calculation of Parasitic Capacitance to Analyze Shaft Voltage of Electric Motor with Direct-Oil-Cooling System," Processes, Vol. 10, No. 8, 1541, Aug. 2022, doi: 10.3390/pr10081541.