



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

다목적 특수선의 전기추진시스템 제어 방식 선정에 대한 연구

A Study on the Selection of Control Method for Electric
Propulsion System of Multipurpose Special Ships



지도교수 김 윤 식

2011년 8월

한국해양대학교 해사산업대학원

전기전자제어공학과

김 효 민

공학석사 학위논문

다목적 특수선의 전기추진시스템 제어 방식 선정에 대한 연구

A Study on the Selection of Control Method for Electric
Propulsion System of Multipurpose Special Ships



지도교수 김 윤 식

2011년 8월

한국해양대학교 해사산업대학원

전기전자제어공학과

김 효 민

本 論文을 金孝民의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 李成根 (인)

위 원 徐東煥 (인)

위 원 金潤植 (인)



2011 년 6 월

한국해양대학교 해사산업대학원

목 차

Abstract

I. 서론	1
II. 선박의 추진시스템	3
1. 추진방식별 구성 및 특징	3
2. 추진방식별 성능	5
3. 추진방식별 분석	9
III. 전기추진시스템에서의 추진기 비교	11
1. 전기추진방식 구성 및 특징	11
2. 전기추진방식 추진기 특성별 성능	13
3. 전기추진방식 추진기 선정	21
IV. 고조파 저감을 위한 전기추진시스템 전력변환장치 선정	23
1. 전기추진방식의 왜형파	23
2. Propulsion Converter	27
3. Sine Wave Filter 적용 방안	38
4. 전기추진 제어 방식 선정	40
V. 다목적 특수선의 고조파 예측	41
1. Propulsion Converter 모델링 및 시뮬레이션	41
2. 다목적 특수선의 전기추진시스템 모델링 및 시뮬레이션	46
VI. 결론	55
참고문헌	57

표 목 차

표1 성능별 추진방식 비교	05
표2 추진방식별 초기획득비 비교	06
표3 연간 연료소비율 비교	06
표4 설치장비 중량 비교	07
표5 전기추진 및 복합추진방식 종합 분석/비교	09
표6 초기 획득비 비교	14
표7 설치장비 중량 비교	15
표8 실적선 비교	18
표9 조정성능 비교	19
표10 장비별 정비주기 분석표	20
표11 종합분석	21
표12 12 펄스 DFE와 24 펄스 DFE 비교	31
표13 펄스별 고조파 발생율(%)	32
표14 DFE와 AFE 비교	38
표15 시뮬레이션에 사용된 파라미터	41
표16 시스템 설정	46
표17 시뮬레이션에 사용된 전력소자 파라미터	47
표18 4-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과	49
표19 3-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과	51
표20 2-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과	54

그림 목 차

그림1 전기추진방식 구성도	03
그림2 복합추진방식 구성도	04
그림3 전기추진방식 설치도	08
그림4 복합추진방식 설치도	08
그림5 Propeller 방식	11
그림6 Azimuth Thruster 방식	12
그림7 POD 방식	13
그림8 Azimuth Thruster 설치도	16
그림9 Propeller 설치도	16
그림10 Azimuth Thruster 적용 선박 수중방사소음	17
그림11 Propeller 적용 선박 수중방사소음	18
그림12 인버터의 구성	24
그림13 PWM 컨버터의 동작 파형	28
그림14 PWM 컨버터 회로도	29
그림15 전형적인 DFE 시스템	30
그림16 24 펄스 DFE 시스템 회로도	32
그림17 AFE 시스템 회로도	33
그림18 AFE 시스템 구성도	34
그림19 AFE 시스템 컨버터 형상	35
그림20 IGBT 인버터 형상	36
그림21 1.25KHz 인버터 스위칭	36
그림22 2.5KHz 인버터 스위칭	37

그림23 전기추진 제어 방식 구조도	40
그림24 PWM 정류기 회로도	42
그림25 PWM 정류기 입력 전압 및 전류 파형	43
그림26 PWM 인버터 회로도	44
그림27 PWM 인버터 입력전압 및 전류 파형	45
그림28 PWM 인버터 전력소자 파라미터 및 시뮬레이션 결과	45
그림29 Propulsion Converter 고조파 해석 모델	47
그림30 다목적 특수선의 전기추진 시스템 고조파 해석 모델	48
그림31 4-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과	49
그림32 입력측 690V Bus 고조파 스펙트럼	50
그림33 출력측 690V Bus 고조파 스펙트럼	50
그림34 출력측 440V Bus 고조파 스펙트럼	50
그림35 3-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과	51
그림36 입력측 690V Bus 고조파 스펙트럼	52
그림37 출력측 690V Bus 고조파 스펙트럼	52
그림38 출력측 440V Bus 고조파 스펙트럼	52
그림39 2-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과	53
그림40 입력측 690V Bus 고조파 스펙트럼	53
그림41 출력측 690V Bus 고조파 스펙트럼	54
그림42 출력측 440V Bus 고조파 스펙트럼	54

Abstract

A Study on the Selection of Control Method for Electric Propulsion System of Multipurpose Special Ships

hyo-min, Kim

Department of Electric, Electronic and Control Engineering
Graduate School of Maritime Industrial Studies Korea Maritime University

Recently, motorship is replaced rapidly by the vessel in which Electric Propulsion System is adopted.

This system have many strong points especially in the vessel which accomplishes ice braking or underwater research and investigation mission or oil drilling etc. These kind of ships are so called Multipurpose Special Ships.

In the Electric Propulsion System of the ships, maneuverability and low vibration characteristic and low noise emission is required strictly. and so minimization of harmonics in the power line is essential for these

In order to verify the efficiency of PWM methods and to choose the best propulsion system, numerical harmonic analysis is carried out. From the analysis result , Propulsion Converter control method is

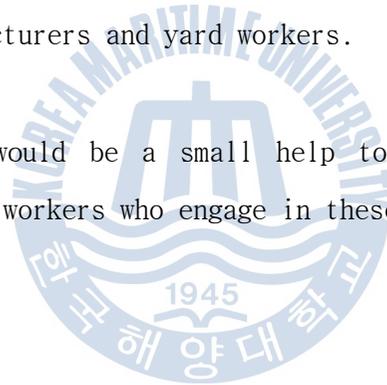
selected for the Multipurpose Special Ships.

The THD (Total Harmonic Distortion) Property of Electric Propulsion System configuration of the Propulsion Converter Multipurpose Special Ships is analyzed and verified through computer simulation.

Currently the Electric Propulsion System hardware, its engineering and technology are mainly depends on european makers, On the other hand domestic level of technology is quiet low.

From these points of view, it is required that research and development in electrical propulsion system should be carried out by many researchers and manufacturers and yard workers.

I hope this paper would be a small help to those researchers and manufacturers and yard workers who engage in these field.



I. 서 론

해양조사 및 연구의 목적을 갖는 특수선은 선박 특성상 조사 및 연구 장비의 보다 정확한 운용을 위하여 우수한 조종성능 및 저 진동과 저소음을 요구하고 있으며, 대부분 선박에 DP(Dynamic Positioning) 시스템을 채택하고 있다. 이는 선박이 임무 수행을 위해 한 지점에서 오랫동안 정지하여야 함을 의미하며, 이를 실현하기 위해서는 저속유지, 정지 상태에서 360도 회전이 가능해야 하며, 각 방향에 대한 조종성능 및 동특성이 우수해야 한다.

전기추진시스템은 주 기관 및 발전기로부터 동력을 얻어 전동기로 추진력을 발생하는 구조로 이루어져 있다. 즉 전기추진 선박은 기존의 주 기관(동력원) - 감속기어 - 축계 - 프로펠러로 이어지는 동력전달 방식이 아닌, 주 기관(동력원) - 교류기 - 제어기 - 전동기 - 프로펠러로 추진 방식이 변경된 것을 뜻한다.

전기추진시스템은 초기 설치비용이 높은 단점이 있지만 조종성능이 우수하고, 소음과 진동이 작으며, 기관실 배치가 유연함 등의 이유로 우수한 성능과 기능을 요구하는 쇄빙선, 해양조사선, 군함 등의 특수목적 선박에 적용되어지고 있다. 최근에는 여객선, LNG선 등에도 사용이 증가되고 있다.

복합추진시스템은 기존의 추진기관 시스템과 전기추진시스템을 함께 구현한 것으로 10 노트 이상에서는 기존의 추진기관을 사용하고, 10 노트 이하의 저속 추진시에는 전동기를 사용하는 것을 의미한다. 기존 동력전달 방식은 저속에서 엔진 효율이 급감하여 연료 소비율이 증가하고, 수중탐지시에는 소음에 의한 문제점이 발생한다. 또한 이 시스템은 해상 경비와 순찰 개념의 저속운항과 긴급 상황 발생시 고속운항을 해야 하는 해군 및 해경 함정에 적용할 수 있다.

전기추진 선박에서의 전동기의 선택은 중요하며, 효율이 우수하고, 경제성에도 유리한 유도 전동기가 많이 사용되고 있다. 무엇보다 가장 중요하게 고려해야 할 부분은 전동기의 속도를 제어하기 위하여 인버터 장치에서 사용자가

요구하는 주파수를 갖는 제어신호로 변환할 때 고조파 왜율이 발생하는 문제점을 해결해야 한다는 것이다.

본 논문에서는 복합추진방식과 전기추진방식의 경제성과 운용성을 비교 분석하고, 추진전동기의 속도제어를 위해 사용하는 인버터에서 발생하는 고조파를 최소화함으로써, 소음 및 진동의 원인을 감소할 수 있는 제어방식을 제안하여 해양조사, 연구 및 시험 등을 위한 다목적 특수선에 적합한 추진기 제어방식 선정의 기초자료를 확보하고자 한다.



II. 선박의 추진시스템

1. 추진방식별 구성 및 특징

추진방식 선정은 다목적 특수선임을 고려하여 경제성, 설치성, 정숙성, 운용성 및 정비 유지성 등 다양한 방면에 적합하도록 구성되어야 한다. 추진체계에 대한 성능 요구조건은 전진 속도 제어 및 후진이 가능하고, 정지 상태에서 360도 회전이 가능해야 한다. 또한 수중방사소음을 최소화하여야 하며, 시험 지원시 DP(Dynamic Positioning) 시스템 성능을 만족시켜야 한다. 위 성능 요구를 기준으로 전기추진방식과 복합추진방식을 비교 검토하기로 한다.

1.1 전기추진방식 구성 및 특징

전기추진방식은 일반적으로 발전기(Generator), 주 배전반(Main Switch Board : MSBD), 변압기(Transformer), 컨버터(Converter), 전동기(Motor), 추진시스템(Propulsion System)으로 구성된다.

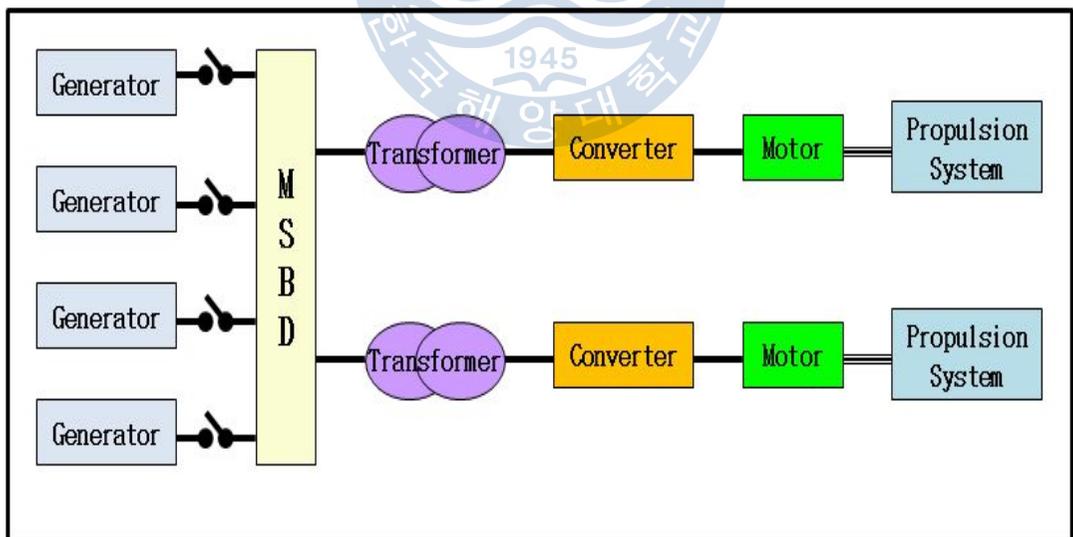


그림1 전기추진방식 구성도

전기추진방식에서 전동기와 추진기는 축계 및 벨벳기어로 연결되어진다. 주 기관과 연결되는 축계 시스템은 불필요하므로 기관실 위치선정이 유연하고, 선저내부 공간 증가, 진동 및 소음이 감소된다. 추진 장치 종류(Propeller, Azimuth Thruster, POD)에 따른 구성 및 특징은 다음 장에서 구체적으로 언급하고자 한다.

1.2 복합추진방식 구성 및 특징

복합추진방식은 일반적으로 주 추진기관(Main Engine : M/E), 발전기, 주 배전반, 변압기, 전동기, 기어상자(Gear Box : G/B), FPP(Fixed Pitch Propeller) 또는 CPP(Controllable Pitch Propeller)로 구성된다.

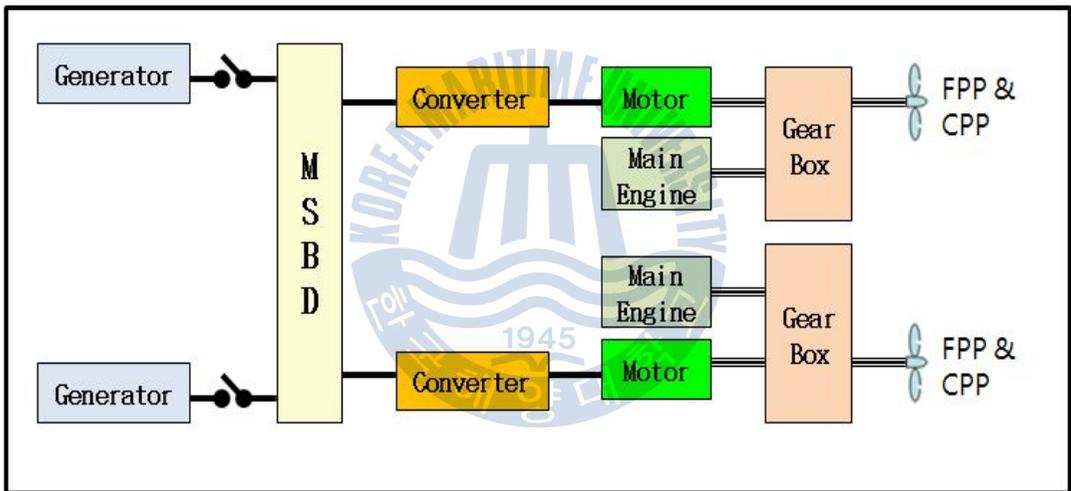


그림2 복합추진방식 구성도

복합추진방식은 일반적으로 10~15 노트 이하로 운항할 때에는 전기추진방식을 사용하고, 고속 추진시에는 주 추진 기관(디젤엔진)을 사용하므로 운전의 80%를 3~15 노트로 운용하는 순시선(Patrol Ship)에 적합하다. 저속과 고속의 범위가 클 경우 효과적이므로 경비 및 순찰 개념의 저속운항과 긴급 상황이 발생할 경우에 고속운항을 필요로 하는 해군 및 해경 경비정에 유용하다.

2. 추진방식별 성능

2.1 일반 성능

표1은 전기추진방식과 복합추진방식의 일반적인 사항에 대해 성능별로 비교한 것이다. 표를 통하여 전기추진방식이 복합추진방식에 비해 조정성능, 소음 및 진동, 신뢰성, 환경, 정비성에 대해 우수한 것으로 나타났다.

표1 성능별 추진방식 비교

검토 성능	전기 추진	복합 추진
조정성능	조정성능 높음	조정성능 낮음
	-전동기를 이용한 신속하고 정확한 속도 제어	-프로펠러(Propeller)와 타(Rudder)를 이용
소음/진동	소음/진동 낮음	소음/진동 높음
	-기계장치 구성 단순 -감속기 미 탑재	-주추진기관, 전동기, 감속기, 프로펠러 등 주요 소음 장비 다량 탑재
신뢰성	신뢰성 우수	신뢰성 저하
	-기계적 장치 소수 탑재	-기계적 장치 다량 탑재
배출가스	NoX 배출 낮음	NoX 배출 높음
	-작은 엔진 작동 시간 -운용 모드(엔진 최적화 운용)	-엔진 속도 변화에 따른 NoX발생
정비성	정비성 우수	정비성 불리
	-기계장치 감소 -장비의 평균고장주기가 길다.	-엔진, 감속기, 모터 등 다수의 기계장치 탑재

2.2. 경제성

초기획득비와 운용비를 비교하였으며, 초기획득비는 제작사별 및 요구조건별 변동이 크고, 세부 산출이 곤란하므로 일반적인 가격 비율을 적용하였다. 운용비는 동일 선형 및 동일 운항시간/속력 기준이다.

표2에서 초기획득비는 전기추진방식이 복합추진방식에 비하여 약 18~31% 정도 비싼 것으로 나타났다.

표2 추진방식별 초기획득비 비교

구 분	전기 추진	복합 추진
주 추진기관	-	5
기어상자	-	
발전기	3	1
추진시스템 (프로펠러, 축계장치, 전기장치 포함)	8~10	3
합계	11~13	9

표3에서 운용유지비 중 연료소모비용은 전기추진방식이 복합추진방식에 비하여 약 9% 정도 많다.

표3 연간 연료소비율 비교

구 분	전기 추진	복합 추진
연료소비율	1	1.1

2.3 설치성

전기추진방식은 동력발생장치인 주 기관에서 전기를 발생하고 주 기관에서 추진 장치까지는 전선을 이용하여 연결함으로써 주 기관을 임의 위치에 배치할 수 있어 기관실 용적을 감소시키고, 선박내부 배치 및 선형의 유연성을 향상시킬 수 있다. 또한 장비탑재 중량이 다소 증가되지만 기계장치의 구성이 단순하다는 장점이 있다.

표4에서 설치중량은 전기추진방식이 복합추진방식에 비하여 약 9% 정도 무겁다.

표4 설치장비 중량 비교

구 분	전기 추진	복합 추진
주 추진기관	-	3
기어상자	-	
발전기	2.5	1
추진시스템 (프로펠러, 축계장치, 전기장치 포함)	3	1
합계	5.5	5

그림3은 전기추진방식의 설치도이고, 그림4는 복합추진방식의 설치도이다. 그림에서 보듯이 전기추진방식의 경우 주 추진기관에서 전동기까지 기계적인 장치가 불필요하므로 공간 활용 측면에서 복합추진방식 보다 유리하다.

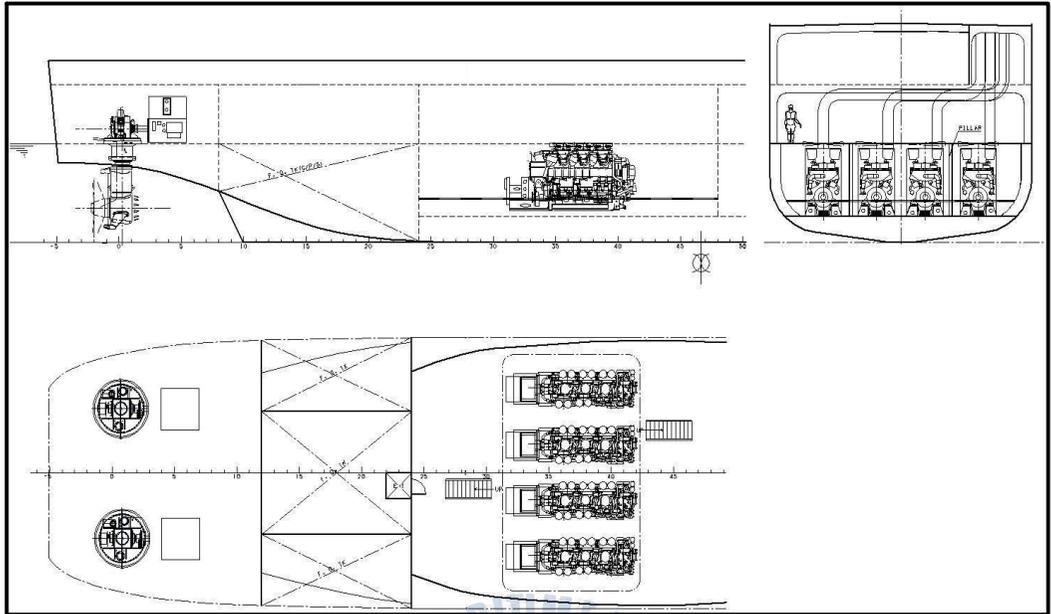


그림3 전기추진방식 설치도

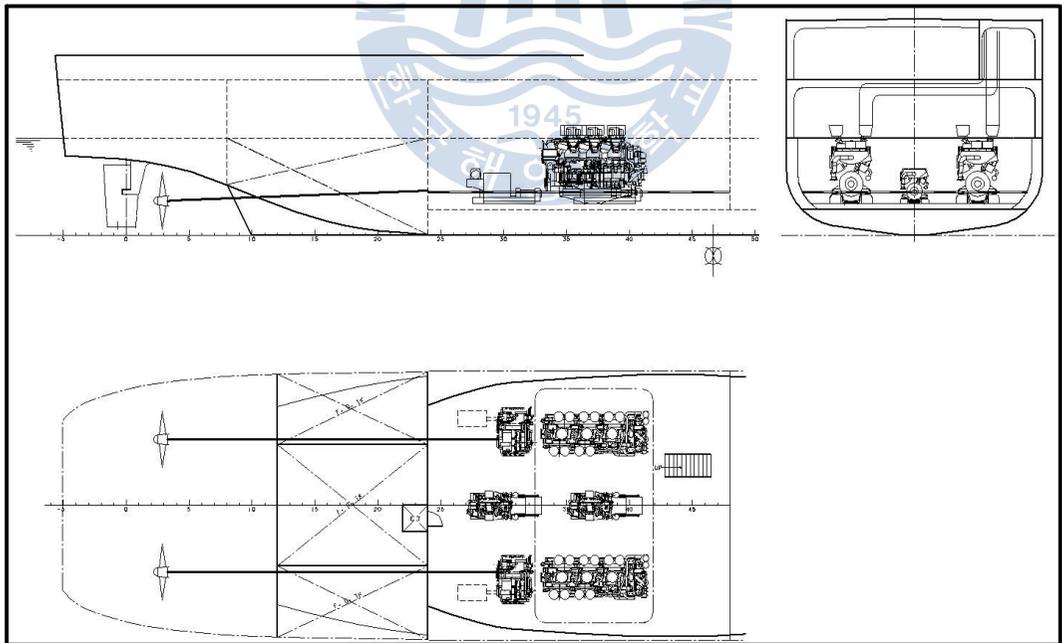


그림4 복합추진방식 설치도

3. 추진방식별 분석

3.1 추진방식별 종합 분석

표5는 전기추진방식과 복합추진방식을 종합 비교한 것으로써 전기추진방식이 복합추진방식에 비하여 초기설치비용은 비싸지만 운용적인 측면에서 많은 장점을 갖고 있다.

표5 전기추진 및 복합추진방식 종합 분석/비교

구분	전기 추진	복합 추진
구성 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> - 발전기 4대 - 주 배전반 1대 - 변압기 2대 - 컨버터 2대 - 전동기 2대 - 추진기 2대 	<ul style="list-style-type: none"> - 주 추진 기관 2대 - 발전기 2대 - 축계장치 2대 - 전동기 2대 - 주 배전반 1대 - 컨버터 2대 - 기어상자 2대
경제성	1.2~1.5	1
설치성	<ul style="list-style-type: none"> - 장비 설치의 유연성 - 기계 장치의 구성 단순 	<ul style="list-style-type: none"> - 장비 설치의 유연성 떨어짐 - 구조 복잡
정숙성	유리	불리
운용성	유리	불리
정비유지성	유리	불리

3.2 소결론

상기에서 비교 검토 및 분석한 것과 같이 전기추진방식의 경우 복합추진 방식에 비하여 경제적인 측면(초기획득비, 운용유지비)에서 다소 고가이며(약 17~33%), 중량 또한 무거운(약 9%) 단점이 있으나, 설치 공간 및 정숙성, 조종성, 정비 유지 측면에서 유리하므로 전기추진방식을 선정하는 것이 적합하다.



Ⅲ. 전기추진시스템에서의 추진기 비교

1. 전기추진방식 구성 및 특징

전기추진방식에 적용할 수 있는 추진기에는 Propeller, Azimuth Thruster, POD(Podded Propulsor) 방식이 있으며, 각각의 구성 및 특징은 다음과 같다.

1.1 Propeller

FPP 또는 CPP 추진기를 장착한 전기추진시스템은 발전기, 주 배전반, 변압기, 컨버터, 전동기 외에 프로펠러, 축계장치, 타(Rudder), Steering Gear, Bow/Stern Thruster로 구성된다.

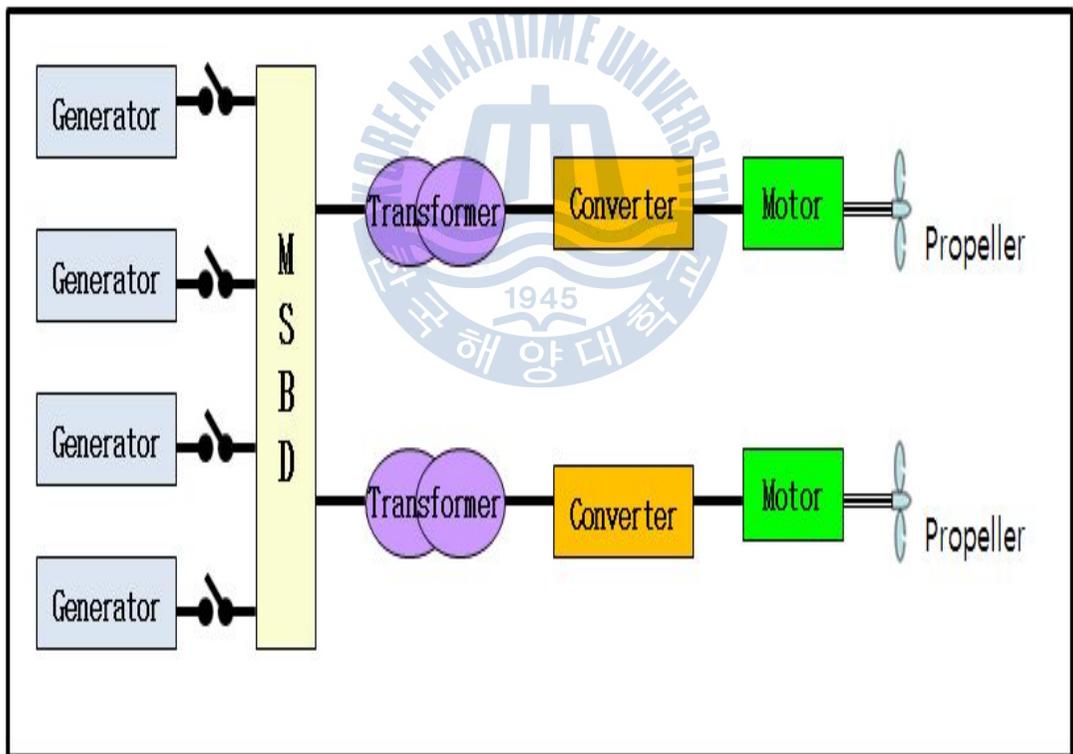


그림5 Propeller 방식

주 기관에서 전동기까지 기계장치가 없으므로 기관실 배치 및 선내 공간 활용에 유연성이 높고, 진동 및 소음이 적다. 여객선, LNG선, 실험 및 조사선 등 다목적 선박에 널리 사용되고 있으나, 정지상태에서 단독으로 선회가 불가능하므로 별도의 Bow/Stern Thruster가 필요하다.

1.2 Azimuth Thruster

Azimuth Thruster를 장착한 전기추진시스템은 발전기, 주 배전반, 변압기, 컨버터, 전동기 외에 Azimuth Thruster로 구성되고, 일반적으로 Bow Thruster가 추가된다.

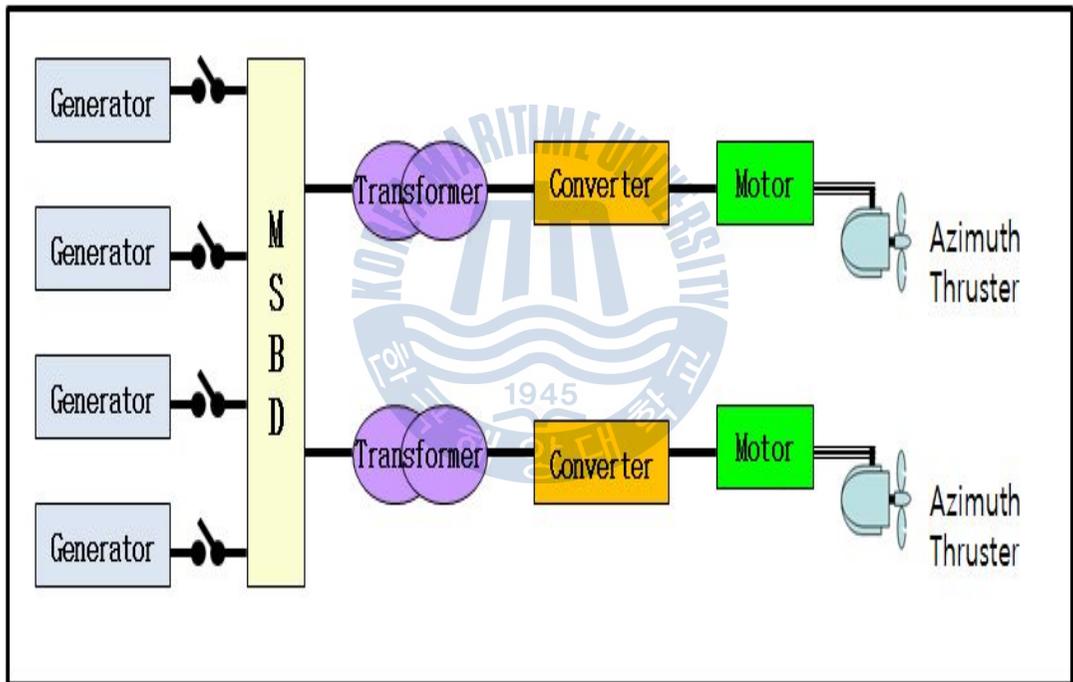


그림6 Azimuth Thruster 방식

추진과 조정을 동시에 할 수 있으므로 타 장치가 필요 없고, 별도의 Stern Thruster 없이 360도 전 방위 선회 가능 등 조정 성능이 우수하다.

1.3 POD

POD를 장착한 전기추진시스템은 발전기, 주 배전반, 변압기, 컨버터, 전동기 외에 POD로 구성되고, Bow Thruster가 추가된다.

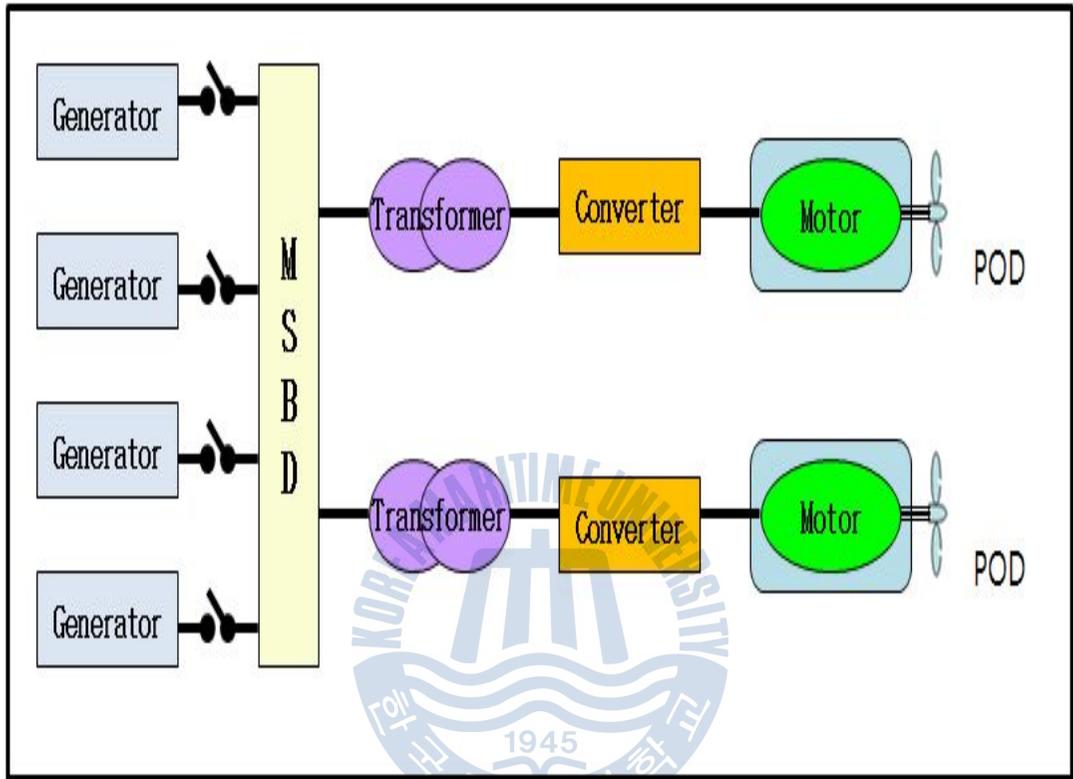


그림7 POD 방식

Azimuth Thruster와는 달리 추진기 내부에 Propeller를 구동하는 전동기가 장착되어 있고, 축 및 감속기 등 동력전달을 위한 기계장치를 사용하지 않으므로 진동 및 소음 감소에 효과적이다.

2. 전기추진방식 추진기 특성별 성능

추진기 특성별 성능은 Propeller와 Azimuth Thruster에 대하여 경제성, 설치성, 정숙성, 운용성, 정비유지성을 비교분석하였다. POD형은 Azimuth

Thruster와 비교하여, 전동기가 추진기 내부에 있다는 것과 가격의 차이가 있으므로 본 검토대상에서는 제외하기로 한다.

2.1 경제성

Azimuth Thruster가 Propeller 보다 총 금액에서 약 27% 정도 저렴하다. 이는 Azimuth Thruster가 Propeller 보다 장비구성이 간단하기 때문이다.

표6. 초기획득비 비교

구 분		Azimuth Thruster	Propeller
추진용 장비 (전동기, 컨버터, 변압기, 주 배전반)		19	33
추진 장비 및 축계 장치	Azimuth Thruster	12	-
	프로펠러, 축계장치, 타, Steering gear	-	9
Bow/Stern Thruster		1	2
총 금액		32	44

2.2 설치성

Propeller와 Azimuth thruster 설치장비 중량은 거의 차이가 없다.

표7 설치장비 중량 비교

구 분	Azimuth Thruster	Propeller
발전기	95	95
추진기	56	-
전동기	14	40
컨버터	8	8
주 배전반	5	5
변압기	13	13
타, 프로펠러, Steering gear, 축계장치	-	29
Bow Thruster, Stern Thruster	1	2
합계	192	192

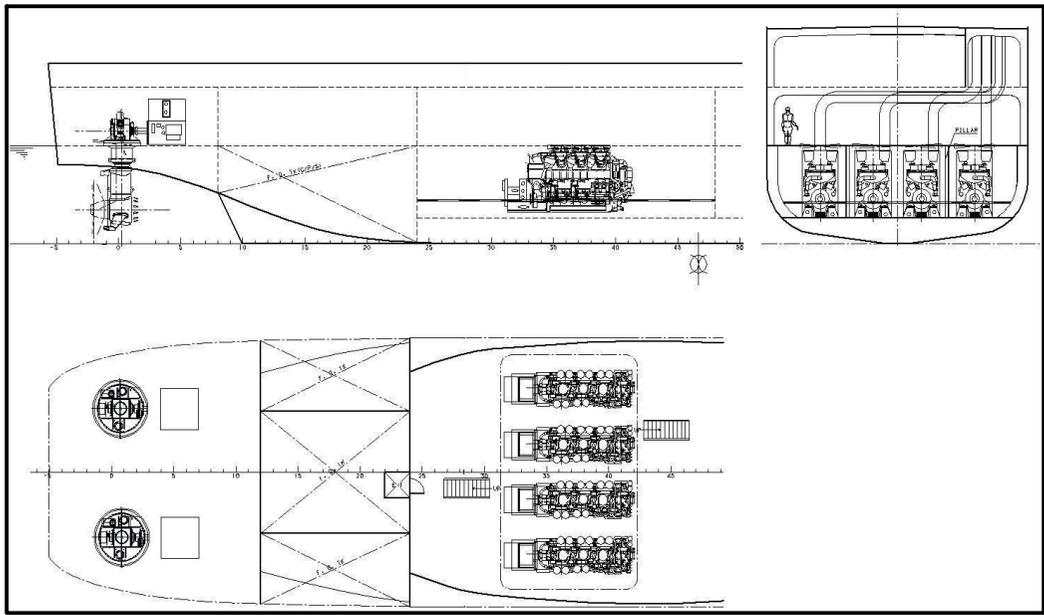


그림8. Azimuth Thruster 설치도

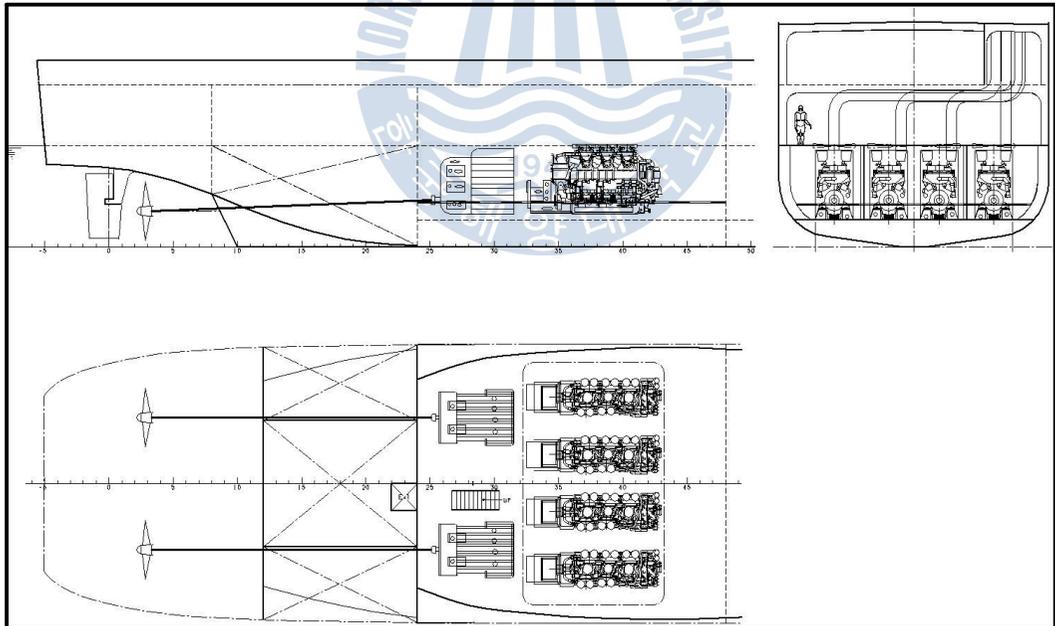


그림9. Propeller 설치도

2.3 정속성

수중방사소음과 진동에 있어서 Azimuth Thruster의 경우 고속 전동기를 사용함으로써 저속 전동기를 사용하는 Propeller 보다 다소 불리할 것으로 예상되지만, 제작사에서는 고속 및 저속 전동기 사용에 따른 소음, 진동의 차이는 거의 없다고 주장하고 있다. 그러나 일부 연구 보고에서는 Azimuth Thruster(POD 포함)의 경우 캐비테이션(Cavitation)에 의한 영향이 있음을 주장하고 있고, 일부 저주파 영역에서 기준치를 초과할 가능성이 있다.

그림10은 Azimuth Thruster를 사용한 Alaska Regional Research Vessel의 수중방사소음 결과를 나타낸 것이다. 31.5~200Hz 사이의 저주파 영역에서 수중방사소음 기준치를 초과함을 알 수 있다.

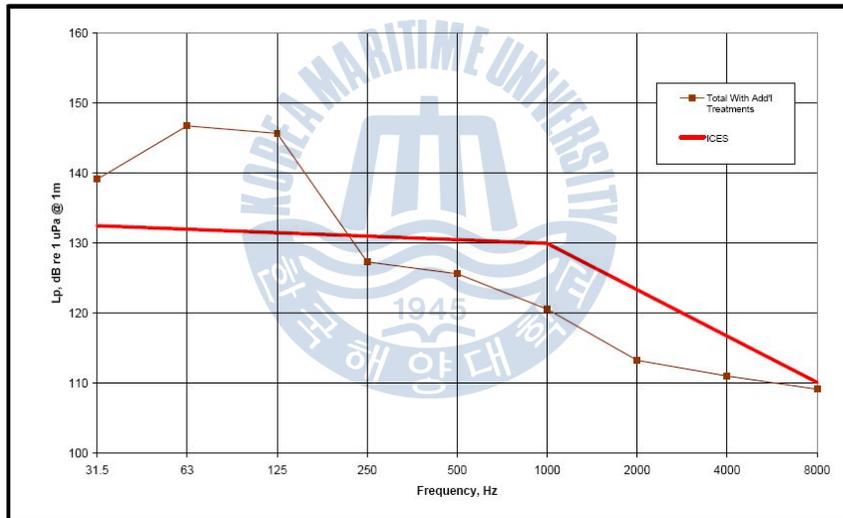


그림10. Azimuth Thruster 적용 선박 수중방사소음

수중방사소음이 선박의 운항목적에 중요한 부분을 차지한다면 Propeller 방식을 다수 실적선에서 채택하였다. 아래 표8에서와 같이 프로펠러 방식을 채택한 실적선 모두 ICES 기준치를 만족시키고 있다.

표8 실적선 비교

선박명	일반제원				추진체계			ICES 기준
	전장	톤수	최대 속도	주 전원	형태	출력	구성	
CELTIC	52.5m	1289톤	12 노트	600VAC	Propeller	2,000KW	2기 2축	만족
RRS james cook	89.2m	-	15 노트	690VAC	Propeller	1,770KW	4기 2축	만족
G.O. Sars	77.5m	3800톤	17 노트	690VAC	Propeller	3,000KW	3기 1축	만족
Cefas Endeavour	73m	2983톤	14.4 노트	-	Propeller	1,080KW	3기 1축	만족
RV Corystes	52.5m	1289톤	12 노트	660VAC	Propeller	2,000KW	2기 1축	만족

그림11은 Propeller 방식을 채택한 실적선의 수중방사소음을 측정된 결과이다. 실적선 모두 ICES CRR 209 기준치 아래에 그래프가 형성됨을 알 수 있다.

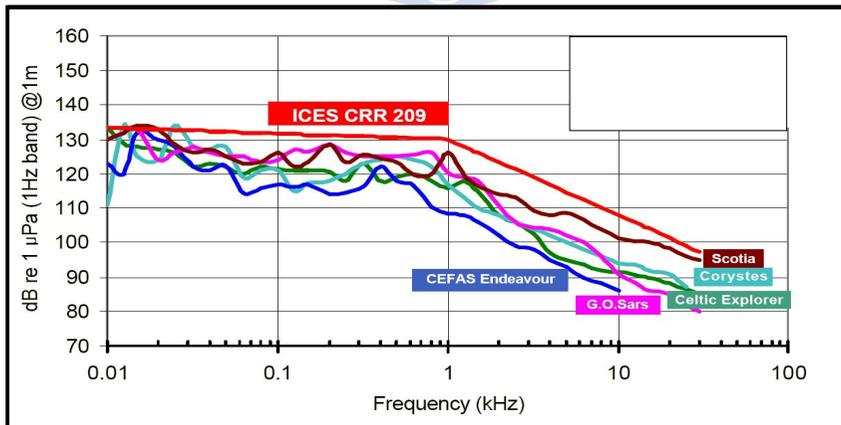
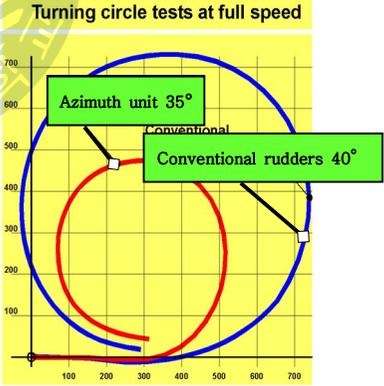


그림11 Propeller 적용 선박 수중방사소음

2.3 조정성능

Turning Circle, 360도 전 방위 선회성능 측면에서 Azimuth Thruster 방식이 Propeller 방식보다 우수한 성능을 가진다. 360도 전 방위 선회성능은 Azimuth Thruster 방식의 경우 추가설치장비 없이 자체적으로 가능하나 Propeller 방식의 경우는 Stern thruster를 추가 설치 하여야한다.

표9 조정성능 비교

구 분	Azimuth Tthruster	Propeller
요구 장비	Azimuth Thruster 2대 Bow Thruster 2대	Propeller 2대 Bow Thruster 1대 Stern Thruster 1대 Rudder&Steering gear 2대
회전반경	<p>■ 시험조건</p> <p>- 속도 : 최대속도 (동일조건)</p>	 <p>The graph shows two turning circles on a coordinate system from 0 to 700 on both axes. The blue circle, labeled 'Azimuth unit 35°', has a diameter of approximately 650. The red circle, labeled 'Conventional rudders 40°', has a diameter of approximately 450. The blue circle is significantly larger than the red circle, indicating a larger turning radius for the azimuth thruster system.</p>
	회전 반경이 40~50 % 감소되므로 우수함	
360도 전 방위 선회 성능	전방위 선회 가능	전방위 선회 가능(주1)

2.4 정비유지성

Azimuth Thruster 방식 및 Propeller 방식 모두 전문 인력이 필요하고, 점검 및 정비주기는 거의 비슷하다.

표10 장비별 정비주기 분석표

구 분	장비명	전문 인력	정비 주기
Propeller	주 배전반	12명	121,000 시간(27년)
	컨버터		50,000 시간(11년)
	변압기		2,500,000 시간(영구적)
	전동기		50,000 시간(11년)
	프로펠러 & 축		5년 주기 점검
Azimuth Thruster	Azimuth Thruster	15명	5년 주기 점검
	주 배전반, 컨버터, 변압기	문제 발생 중요도에 따라 필요	Propeller 방식과 유사
	전동기		-베어링 점검주기 : 5 ~10년 -그리스 점검 주기 : 2년

3. 전기추진방식 추진기 선정

표11 종합분석

구분		Azimuth Thruster	Propeller
경제성	획득비	73%	100%
설치성	부피	80%	100%
	중량	100%	100%
정속성	주소음원	발전기, 전동기, Thruster	발전기, 전동기, 프로펠러, Steering gear
	기준치 만족가능성	제한적 주과수영역 만족 (저주과 영역 불만족)	전 주과수영역 만족
운용성	DP 요구장비	Azimuth Thruster Bow Thruster	Propeller Bow/Stern Thruster Rudder & Steering gear
	DP 만족여부	만족	만족
	회전반경	우수(70% 향상)	보통
정비 유지성	주요정비 요구장비	고속 전동기	저속 전동기
	정비 특성	-Azimuth Thruster 5년 주기 점검 -유도전동기 사용으로 평균 고장시간 향상	-Propeller & 5년 주기 점검 -유도전동기 사용으로 평균 고장 시간 향상

Propeller, Azimuth Thruster 및 POD 방식의 3가지 경우 중 Propeller와 Azimuth Thruster를 비교 분석하였으며, 표11은 종합분석 결과이다.

운용성 측면에서 Azimuth Thruster 방식이 Propeller 방식보다 우수한 것으로 나타났으며, 설치성 및 정비 유지성, 경제성 측면에서는 대동소이한 것으로 나타났지만, 정숙성 관점에서는 Azimuth Thruster가 일부 저주파 구역에서 ICES 기준을 만족하지 못하므로 제한적 운용이 불가피하므로 선박운항의 주목적에 따라 세밀한 검토가 이루어져야 할 것이다.



IV. 고조파 저감을 위한 전기추진시스템 전력변환장치 선정

1. 전기추진방식의 왜형파

1.1 왜형파의 정의

전기신호에서 고조파는 일반적으로 왜형파의 구성성분 중 기본파에 대해서 2배 이상의 정수배 주파수를 갖는 파를 의미한다.

고조파는 대부분 전력전자소자(다이오드, SCR 등)를 사용하는 장비에서 발생한다.

발생원을 보면 전력변환장치(인버터, 컨버터 등)외에 변압기, 회전기기, 정류기 등이 있으나 전력변환장치를 제외하고는 발생 고조파의 크기가 작고 순간적인 것이 많아 크게 문제가 되지 않는다. 전력변환장치는 동작이 스위칭에 의존하기 때문에 고조파 성분이 필수적으로 발생하게 되고, 고조파가 지속적이며 성분이 크기 때문에 다른 장비에 미치는 영향이 크다.

왜형파는 기본파와 고조파(정수배의 주파수)로 나누어서 생각할 수 있다. 전력계통에서 왜형파는 발전기에서 생성된 기본파와 기본파의 정수배인 고조파가 합성되어 훼손된 신호가 발생되는 것을 말하며, 이러한 왜곡된 신호 중에서 일시적이 아닌 왜곡 양상이 주기성을 갖는 것을 왜형파라고 한다.

1.2 왜형파의 영향

고조파의 전압과 전류의 증대는 변압기, 회전기, 전력변환기기 등 각종 전기기기에 악영향을 미치게 된다. 고조파 전압 및 전류는 전력계통의 품질을 저하시키고, 장비의 오동작을 불러온다.

콘덴서는 고조파에 피해 사례의 대부분을 차지하며, 회로의 임피던스가 감소함에 따른 과대 전류 유입으로 과열, 소손, 진동, 소음 발생이 발생한다.

전동기는 회전수의 주기적인 변동 및 철손, 동손 등의 손실이 증가하고,

케이블에서는 과열이 발생하며, 변압기는 철심의 자화현상에 의한 소음 발생 및 철손, 동손의 증가와 함께 용량이 감소한다.

전자기기는 반도체 소자의 수명 및 성능이 저하되고, 계전기는 설정레벨의 초과 혹은 위상변화에 의한 오동작을 야기시키며, 차단기는 오동작의 위험이 있다.

특히 전력용 콘덴서에서 중요한 점은 전원과 콘덴서 회로의 임피던스가 고조파 전류에 의해 병렬 공진을 일으킬 수 있다는 것이고, 이 병렬 공진에 의해 고조파 증폭은 물론 계통 전체에 대해 왜곡을 일으킬 수 있다는 것이다.

1.3 전기추진 선박의 왜형파

전기추진방식의 선박에서 왜형파가 발생하는 가장 큰 이유는 전동기의 속도 제어를 위한 주파수 변환장치인 Propulsion Converter 때문이다.

Propulsion Converter의 구성은 3상 교류 전원을 직류 전원으로 변환하는 정류기(Rectifier) 부분과 직류 전력으로부터 원하는 크기의 전압 및 주파수를 갖는 교류 전원을 얻는 인버터(Inverter) 부분으로 이루어진다.

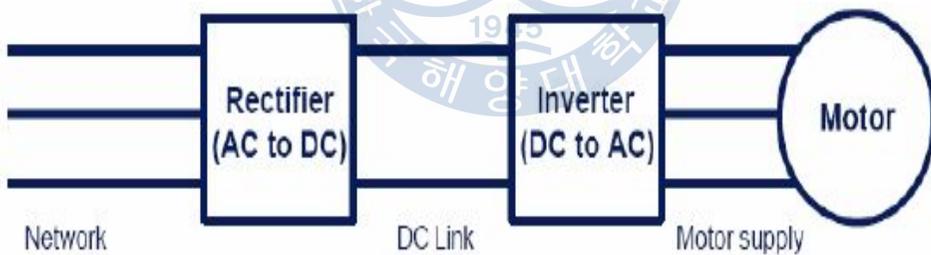


그림12 3상 Propulsion Converter의 구성

그림12는 3상 Propulsion Converter의 구성을 나타낸다. 정류기 부분에서는 다이오드 또는 실리콘 제어 정류기(SCR)가 직류 성분의 전압을 생성하고, 필터부에서는 파형의 고저를 없애 주는 역할을 한다. IGBT 등의 반도체 소자를 사

용하는 인버터부에서는 스위치 역할을 하는 고속 트랜지스터에 의해 펄스 폭을 조정한 전원을 전동기에 공급한다. 이때 정류기부에서 전압, 전류를 한쪽 방향으로만 흐르게 하는 비선형 과정과 인버터부에서 스위칭 순간 불연속적인 전압 강하로 고조파가 발생하게 된다.

고조파로 인한 여러 가지 문제점 때문에 각 선급에서는 전 고조파 왜율(THD : Total Harmonic distortion)을 정하여 제한하고 있으며, ABS, DNV의 경우 5%, KR의 경우 배전시스템의 전압과형에서 8%(단일 고조파는 3%)를 초과하지 않도록 규정하고 있고, 국제적으로도 IEEE 519에서 전 고조파 왜율을 5%로 제한하고 있으며, 전 고조파 왜율은 아래식과 같이 표현한다.

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

여기서, V_1 : 기본파 전압
 V_2, V_3, \dots, V_n : 각 차수별 고조파 전압이다.

1.4 고조파 감소 방안

고조파 전류가 허용치를 초과하지 않게 하기 위한 억제 대책에는 기기로부터 발생하는 고조파 전류를 감소하는 방법과 발생한 고조파 전류를 분리시켜 유출 전류를 저감하는 방법이 있다.

고조파를 감소시키기 위한 가장 간단한 방법은 리액터를 설치하는 것으로, 고조파 발생 부하장치의 1차측에 교류리액터를 설치하여 전체 임피던스를 크게 하거나 직류 회로에 리액터를 삽입하는 것이다. 가장 저렴하고 설치가 쉽지만 제거율이 낮다.

이 밖에 변환기의 다펄스화, PWM 컨버터 채용, 필터 설치, Active Front End(AFE) 등의 방법을 사용하면 고조파 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

1.4.1 리액터 설치

고조파 발생 부하 1차 측에 교류 리액터를 설치하여 전원의 임피던스를 크게 함으로써 저차 고조파를 저감시킬 수 있다. 또는 고조파 발생 부하 직류회로에 직류 리액터를 설치하여 교류 전원을 정류하여 직류로 만들 때 완벽하게 직류가 되지 않고 교류 신호가 일부 남아 생기는 리플전압을 제거하여 고조파를 줄일 수 있다.

리액터의 이용은 가장 저렴하고, 설치가 용이하지만 효율이 낮다.

1.4.2 수동필터 설치

수동필터는 L, R, C의 조합으로 이루어지며, 일정한 주파수 대역에서 고조파 저감 능력이 뛰어나지만 고조파 제거 능력이 필터 자체의 임피던스와 전원 임피던스의 비율에 따라 좌우된다는 문제가 있다. 구성이 간단하고, 취급 및 보수가 용이하며, 경제적이긴 하지만 현실적으로 전원의 임피던스 측정이 어렵고 크기가 다양하게 변화하므로 개선효과는 낮다.

1.4.3 능동필터 설치

능동필터는 부하와 역위상의 고조파를 발생시켜 부하에서 발생된 고조파를 상쇄시킴으로써 전원 왜율을 최소화하는 장치이다. 변동하는 고조파에 대응할 수 있고, 전압변동, 전압 플리커의 저감에도 효과적이다. 능동필터는 수동필터와 비교하여 공진의 문제점이 없다.

1.4.4 AFE 설치

AFE 방식의 가장 큰 특징은 정류소자가 양방향으로 전력전달이 가능하므로 효율이 매우 좋다는 것이다. 전력전자소자로 IGBT를 사용하여 원천적으로 고조파 발생을 억제하며, AFE Unit 내의 필터를 이용하면 전 고조파 왜율을 5% 이하로 감소할 수 있도록 설계되어 있다.

1.4.5 위상제어 변압기(Phase Shift Transformer)

실제 위상제어는 SCR(Silicon Controlled Rectifier)을 기반으로 하는 컨버터에 국한되어 사용되며, 입력전압 파형의 특정한 위상에서 일어나기 때문에 이 위상을 조정하여 전력을 제어하면, 저차수의 고조파를 감소할 수 있다.

2. Propulsion Converter

전기추진선박의 경우 AC 전동기를 주로 사용한다. DC 전동기는 속도 제어가 용이하고 자동화 기계 및 전기철도에 사용되어진다. AC 전동기의 경우 유도 전동기와 동기전동기로 구분할 수 있다. 전기추진선박에서는 구조가 간단하고 고장이 적은 유도 전동기를 많이 사용하고 있다. AC 유도 전동기 속도 제어를 위한 컨버터에 대하여 알아보려고 한다.

2.1 PWM 컨버터

전기추진선박에서 AC 유도 전동기를 사용함에 있어 속도 및 토크 제어를 위해 사용 가능한 컨버터 중에는 Cyclo-Converter와 PWM 컨버터가 있다.

Cyclo-Converter는 AC-AC 전력변환장치로 어느 주파수의 교류 전력을 다른 주파수의 교류 전력으로 직접 변환하는 장치이다. 일반적으로 입력 주파수 보다 낮은 출력 주파수를 얻는 경우에 사용된다. 출력 주파수가 감소함에 따라 출력 전류의 품질이 증가하므로 고전력 저주파수에 적합하고, 하나의 SCR이 고장이 나도 출력전압의 왜형율이 다소 증가하는 것 외에는 정상적으로 작동이 가능하므로 매우 안정적이다. 반면에 출력 주파수의 범위가 작고, 많은 수의 SCR 사용으로 제어 구조가 복잡하며, 전력손실이 크다는 단점이 있다. 또한 출력에 고조파가 발생하기 때문에 상당한 크기의 입력 필터를 필요로 하며, 역률 조정이 힘들고, 비용이 많이 든다. Cyclo-Converter는 주회로 구성이 단순한 경우 변환 효율이 높은 특징이 있으므로 대용량의 변환장치에 이용된다.

최근 전기추진시스템에는 유도전동기 사용이 증가됨에 따라 제어 성능이 우수한 PWM 컨버터를 많이 채택하고 있다. PWM 컨버터는 교류전력을 정류기를 통해 직류전력으로 변환한 후 인버터부에서 펄스 폭을 제어함으로써 크기와 주파수가 다른 교류전력으로 변환하는 장치이다.

PWM 컨버터에는 전류원과 전압원 컨버터가 있으며, 주로 전압원 컨버터가 사용되고 있다.

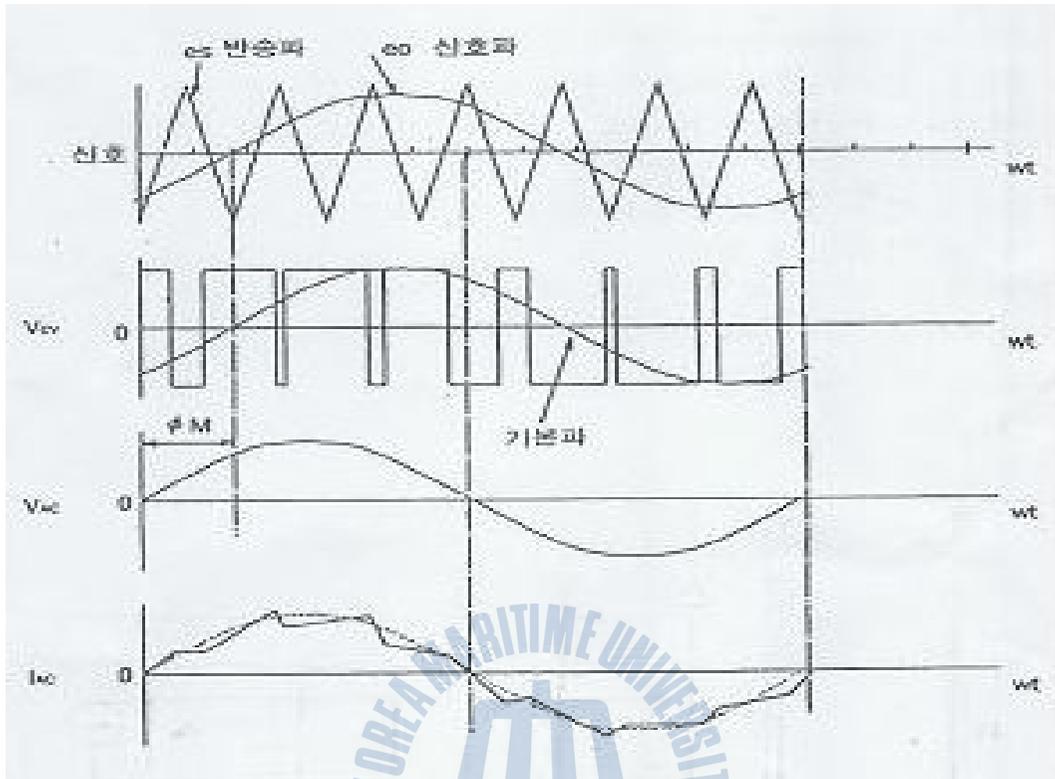


그림13 PWM 컨버터의 동작 파형

그림13에서와 같이 펄스 폭 변조를 위해서는 정현파 기본신호와 스위칭 주파수를 결정하는 삼각파인 반응신호가 필요하다. PWM 컨버터의 스위칭 속도는 기본신호와 반응신호의 비교에 의해서 결정되며, 스위칭 속도가 빠를수록(즉, 스위칭 주파수가 높아질수록) 고품질의 출력을 가져온다. 하지만 스위칭 주파수가 높아지면 전력손실도 많아진다. 빠른 스위칭을 위해 전력용 반도체 스위치는 대전력의 높은 주파수의 소자가 필요하며, 가장 일반적인 완전제어 스위치는 SCR, GTO, IGCT 및 MOSFET 그리고 IGBT가 있다. SCR, GTO, IGCT는 가장 전력이 크고, 속도가 느리며, 전력용 MOSFET은 가장 전력이 작고, 속도가 빠른 스위치이다. IGBT는 가장 일반적인 저전력 및 중전력 컨버터에 있어서 가장 우수하다.

그림14는 전기추진선박에서 주로 사용하는 전압원 PWM 컨버터의 일반적인 회로도이다. 정류기를 통해 생성된 DC 전압은 DC Link를 통해 인버터에 공급된다. DC Link부에서 인덕터의 역할은 정류기와 전력시스템을 인버터 입력 전류 고조파 성분으로부터 분리시키는 것으로 반드시 필요한 것은 아니며, 실제 컨버터 크기와 비용을 절감하기 위해 인덕터를 없애기도 한다.

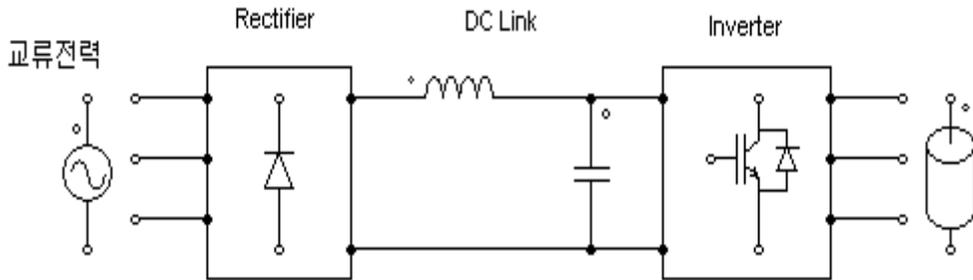


그림14 PWM 컨버터 회로도

2.2 DFE & AFE 비교

PWM 컨버터에서 고조파 감소를 위해 사용되는 Diode Front End(DFE)와 Active Front End(AFE) 방식의 비교 검토를 통해 다목적 특수선에 가장 적합한 방식을 선정하고자 한다.

2.2.1 DFE 방식

DFE 방식은 일반적으로 12 펄스와 24 펄스 다이오드 브릿지(Bridge) 시스템을 사용하고 있다.

12 펄스 다이오드 브릿지 시스템은 선급 요구 고조파 제한 조건 5% 미만을 만족하기 위해 낮은 임피던스의 발전기를 필요로 하며, 이는 이상전류(Fault Current)의 증가를 가져온다.

낮은 이상전류의 시스템을 구현하기 위해서는 발전기의 임피던스를 높이거나 24 펄스 다이오드 브릿지 시스템을 사용하여야 한다.

그림15는 전형적인 DFE 시스템의 회로도를 나타내고 있다.

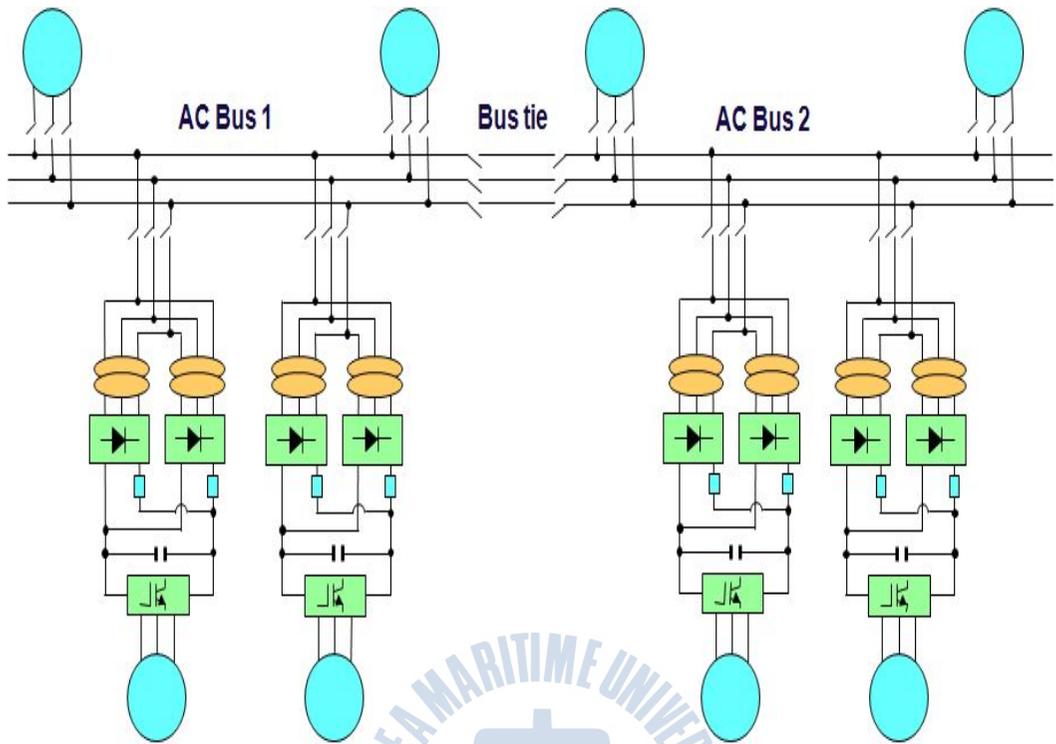


그림15 전형적인 DFE 시스템

표12는 12 펄스 DFE와 24 펄스 DFE를 비교한 것이다. 12 펄스 DFE와 24 펄스 DFE의 차이점 중에서 주목할 만한 것은 하모닉 필터의 사용 필요성이며, 종합 고조파 왜형율을 만족하기 위해 12 펄스 DFE의 경우는 고조파 필터가 필요하고, 24 펄스 DFE의 경우 고조파 필터를 사용하지 않아도 된다는 것이다.

표12 12 펄스 DFE와 24 펄스 DFE 비교

12 펄스 DFE	24 펄스 DFE
<p>배전선로 및 차단기의 개/폐가 고조파를 발생시키고, 시스템에 영향을 준다.</p>	<p>배전선로 및 차단기의 개/폐로부터 독립적이고, 시스템에 영향을 주지 못한다.</p>
<p>선급 고조파 제한 규정을 만족하기 위해 수동의 고조파 필터 설치가 필요하다.</p>	<p>고조파 필터를 설치하지 않아도 선급 고조파 제한 규정을 만족한다.</p>
<p>위상 변환(Phase-shifted) 변압기는 작고, 가볍고, 가격이 저렴하다.</p>	<p>위상 변환 변압기는 크고, 무겁고, 가격이 비싸다.</p>
<p>컨버터는 2 x 6 펄스 정류기로 구성되어 작고, 가볍고, 가격이 저렴하다.</p>	<p>컨버터는 4 x 6 펄스 정류기로 구성되어 크고, 무겁고, 가격이 비싸다.</p>
<p>정류기는 높은 평균 고장 시간(Mean Time Between Failure : MTBF)을 가지고 있다.</p>	<p>정류기는 낮은 평균 고장 시간을 가지고 있다.</p>

표13은 6 펄스, 12 펄스 및 24 펄스를 비교한 것으로 펄스 수가 커질수록 고조파 발생율이 감소되는 것을 나타내고 있다.

표13 펄스별 고조파 발생율(%)

차수	5	7	11	13	17	19
6펄스	17.5	11	4.5	3.0	1.5	1.25
12펄스	2	1.5	4.5	3.0	0.2	0.15
24펄스	2	1.5	1	0.75	0.2	0.15

그림16은 24 펄스 DFE 시스템의 회로도이다. 2 × 24 펄스 추진기용 변압기 (24 Pulse Transformer), 선충전기(Pre charge supply; DC link 전원공급), 4 × 6 펄스 정류기(24 Pulse Rectifier), 구동 접지(Drive Earthing), IGBT 인버터 스위치(IGBT Inverter), 출력 필터(Output Filter)로 구성되어 있다.

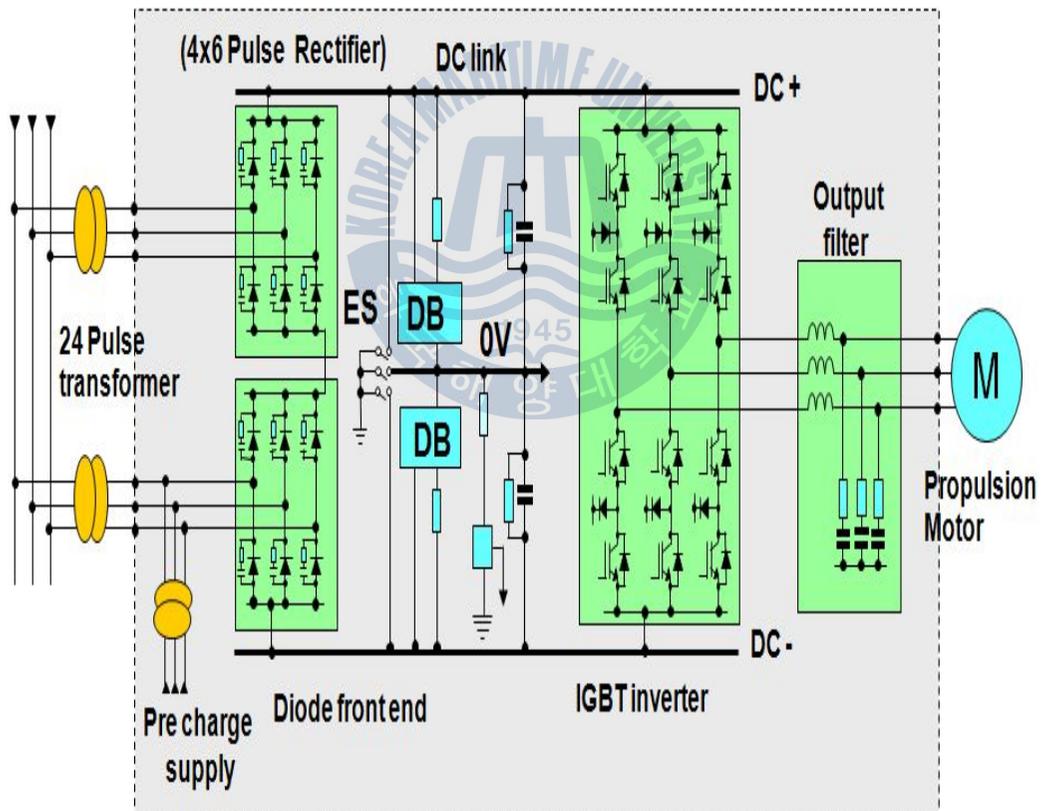


그림16 24 펄스 DFE 시스템 회로도

2.2.2 AFE 방식

AFE 방식은 완전 자립형 자동화 시스템 형식으로 추진기용 변압기가 필요하지 않고, 각 파워 블록(Power Block)에 고조파 필터와 선 충전회로를 가지고 있어 시스템 안정성이 우수하고, 고조파 영향이 낮으며, 효율이 높아 현재 전기추진방식에 많이 적용되고 있다.

그림17은 AFE 시스템의 회로도이다. 그리드 필터(Grid Filter), 2 × IGBT 인버터 스위치(IGBT Inverter), 선충전기(Pre charge supply; DC link 전원공급), 구동 접지(Drive Earthing), 출력 필터(Output Filter)로 구성되어 있다.

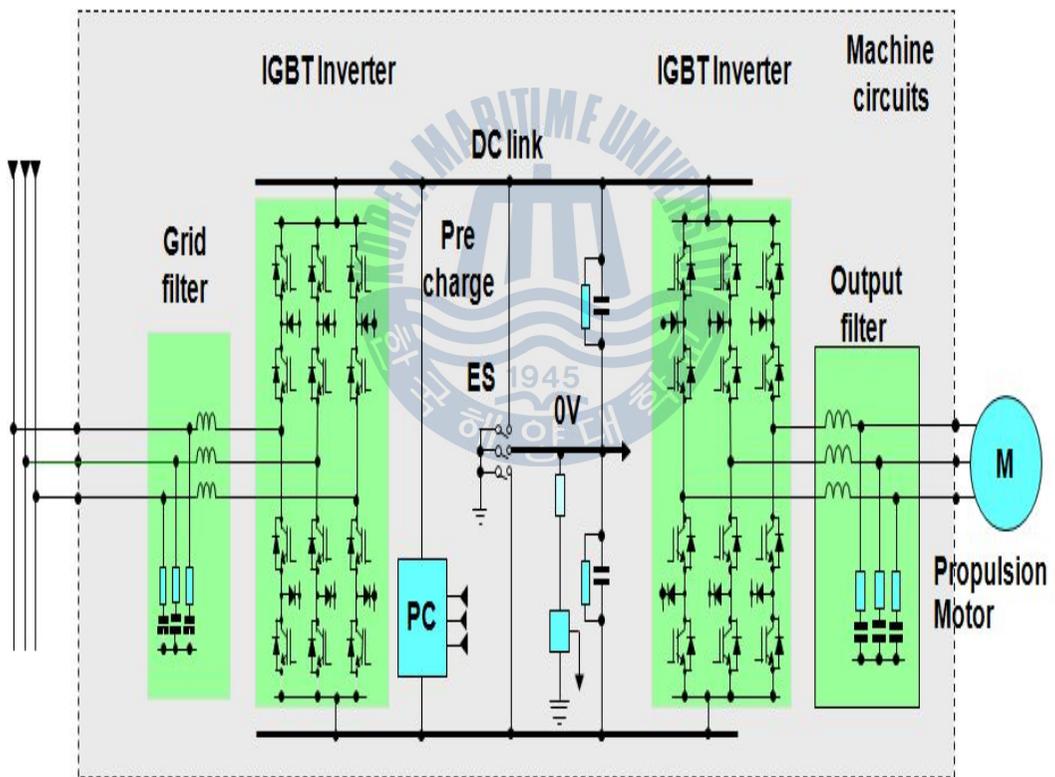


그림17 AFE 시스템 회로도

그림18은 AFE 시스템의 구성도를 나타낸다. 구성별 특징은 다음과 같다.

- 각 파워 블록은 완전 자립형이고, 추진기용 변압기가 필요하지 않다.
- 각 파워 블록은 자체 자동화 시스템으로 구성된다.
- 각 파워 블록은 고조파 필터와 선 충전회로를 가지고 있다.
- 보다 높은 전원 제한은 병렬로 연결된 파워 블록을 이용하여 구성한다.

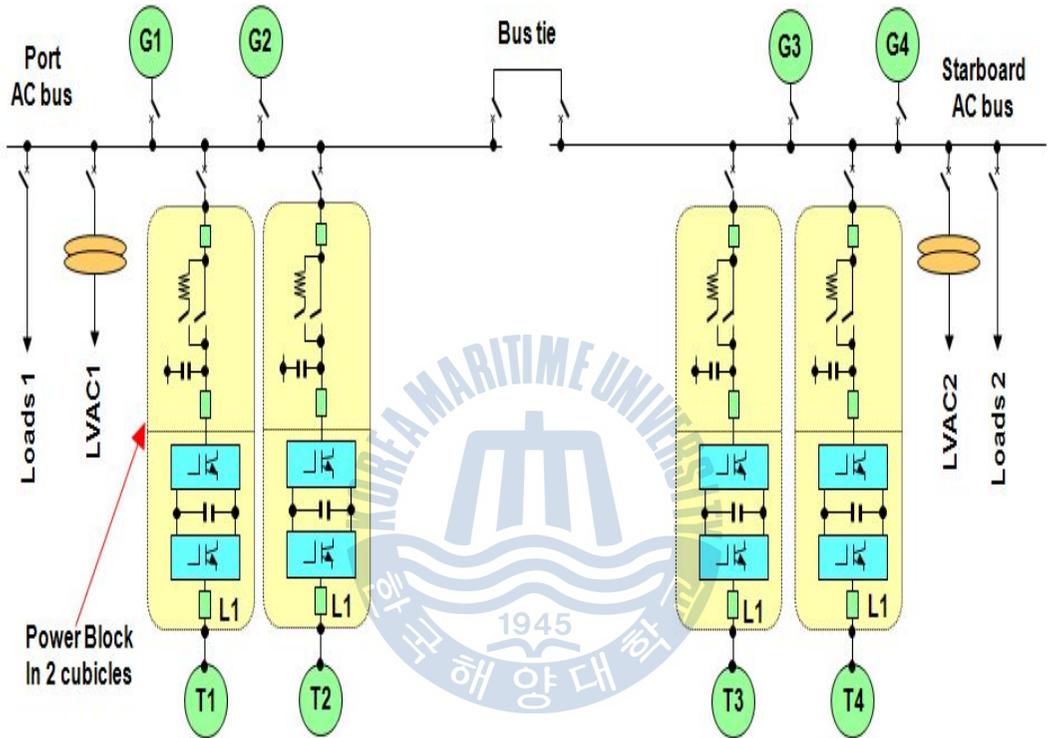


그림18 AFE 시스템 구성도

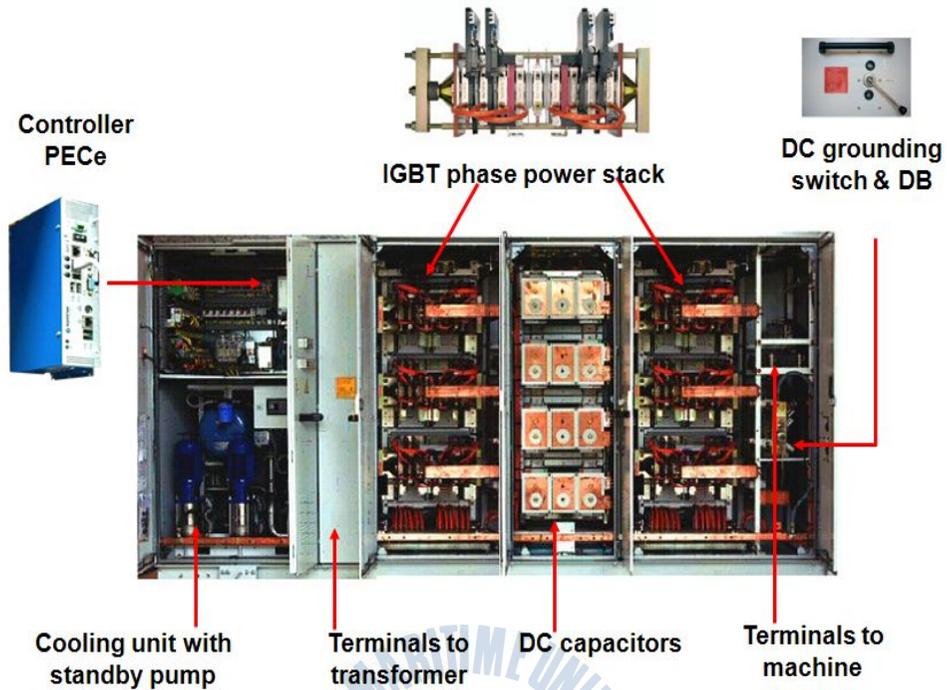


그림19 AFE 시스템 컨버터 형상

2.3 IGBT 인버터

Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT)는 금속 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)를 게이트부에 넣은 접합형 트랜지스터로 전압의 입력 신호에 의해서 On/Off가 생기는 자기소호형으로 대전력의 고속 스위칭이 가능한 반도체 소자이다. 일반적으로 고효율, 고속력의 전력 시스템에 많이 사용되고 있다.

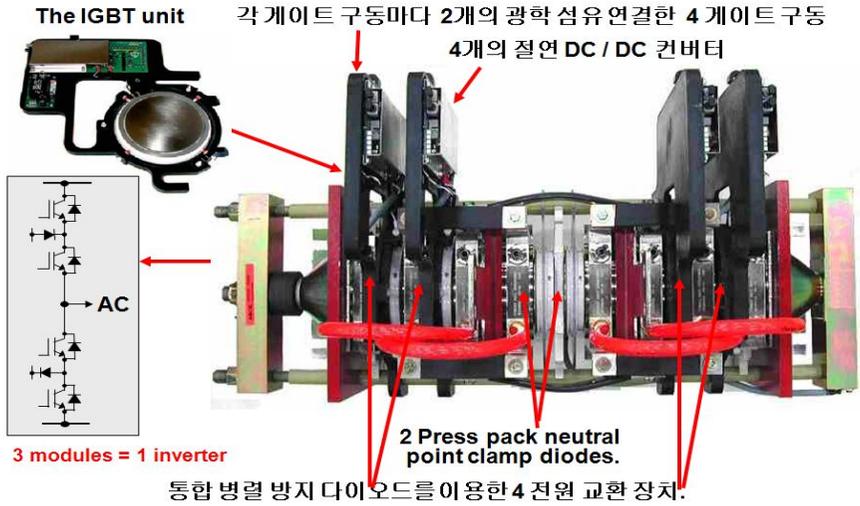


그림20 IGBT 인버터 형상

2.3.1 1.25KHz 인버터 스위칭

출력 사인과 필터가 사용되고, 인버터 작동 주파수가 1.25KHz일 경우의 전형적인 파형은 그림21과 같다. 위 그래프는 사인과 필터의 전압출력에서 1.25KHz PWM 인버터 변환의 결과를 보여주고, 아래 그래프는 전류를 나타낸다.

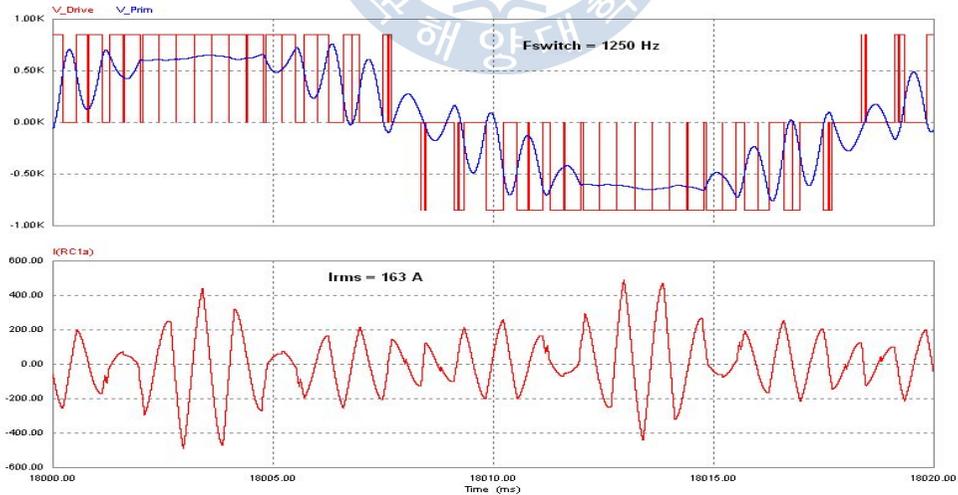


그림21 1.25KHz 인버터 스위칭

2.3.2 2.5KHz 인버터 스위칭

출력 사인과 필터가 사용되고, 인버터 작동 주파수가 2.5KHz일 경우의 전형적인 파형은 그림22와 같다. 위 그래프는 사인과 필터의 전압출력에서 2.5KHz PWM 인버터 변환의 결과를 보여주고, 아래 그래프는 전류를 나타낸다.

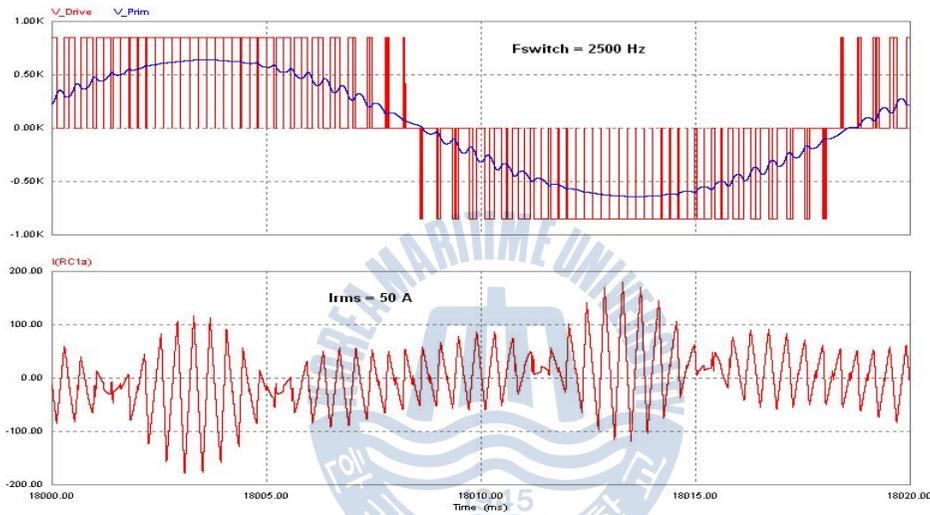


그림22 2.5KHz 인버터 스위칭

이러한 파형의 시험에서 높은 변환 주파수가 파형의 질을 높여주며, 더 높은 변환 주파수의 사용은 유도소자의 크기를 줄여 더 작은 컨버터를 제작할 수 있게 해준다.

2.4 Propulsion Converter 비교 및 선정

Propulsion Converter 방식의 24 펄스 DFE와 AFE를 비교 검토한 결과 고조파 왜곡 현상이 낮고, 장비 신뢰도가 높으며, 중량과 설치성이 용이한 AFE 방

식을 선택하는 것이 유리하다.

표14 DFE와 AFE 비교

항 목	DFE	AFE
주요장비	1) 2 x 24 펄스 추진기용 변압기 2) 2 x Propulsion Converter 3) 주 배전반	1) 2 x Propulsion Converter (Sine Wave filter 제외) 2) 주 배전반
THD	AFE 보다 높음	DFE 보다 낮음
중량	총 28,000 kg	총 20,000 kg
소음	요구사항 만족	요구사항 만족
진동	요구사항 만족	요구사항 만족
장비신뢰도	신뢰도 높음	신뢰도 높음
장비가	AFE 보다 낮음	DFE 보다 높음
운용성	양호	양호
설치성	다소 설치 공간 필요	설치 용이

3. Sine Wave Filter 적용 방안

Propulsion Converter의 Sine Wave Output Filter 기능을 알아보고, 다목적 특수선의 적용 방안을 검토하고자 한다.

3.1 Sine Wave Filter

다목적 특수선 중에서 해양연구의 목적을 갖는 해양조사선의 경우 낮은 수

중방사소음을 요구하게 된다. 이를 만족시키기 위한 다양한 기술적인 방안 중 Sine Wave의 잡음 감소를 위해 다음과 같이 사용되고 있다.

- 인버터가 표준 주파수에서 작동할 시 인버터와 전동기 사이에 Sine Wave Output Filter를 사용한다.
- 인버터가 보다 높은 주파수에서 작동할 시 인버터와 전동기 사이에 Sine Wave Output Filter를 사용한다.

3.2 Sine Wave Filter 적용 방안

사인과 필터 선정을 위해 변환 주파수, 인버터 출력저하, 손실, 컨버터 크기, 필터를 거친 전압 강하, 변환 소자의 온도 사이클과 같은 변수를 고려하여 최적의 분석을 하여야 한다.

사인과 필터는 절연이 부족한 전동기 또는 손실을 피하기 위해 낮은 고조파로 높은 스피드의 전동기를 조정하여야 할 경우 가장 많이 적용된다.

사인과 필터를 적용하지 않을 경우에는 최적의 사인과 출력을 위해 인버터 내의 Supply & Machine Bridge가 높은 주파수에서 스위칭 할 수 있도록 설정하는 방법이 있다. 예를 들어 Propulsion Converter내의 Supply Bridge에 1.25KHz, Machine Bridge에 2.5KHz 스위칭 주파수를 적용하는 방안이 있다.

3.3 Sine Wave Filter 선정

사인과 감소를 위해 Sine Wave Output Filter를 설치하는 방안과 컨버터 내에 Supply & Machine Bridge가 높은 주파수에서 스위칭 할 수 있도록 설정하는 방안 모두 효과적이다.

하지만 인버터와 전동기 사이에 Sine Wave Filter 사용은 고조파 발생에 대한 근본적인 해결책이 되지 않으며, 또한 AFE 방식의 컨버터를 사용하므로 고조파 예측에 의한 제어방식 선정 단계에서는 Sine Wave Filter는 적용하지 않을 것이다.

4. 전기추진 제어 방식 선정

DFE와 AFE를 비교 검토한 결과 24 펄스 DFE와 AFE 방식 모두 고조파 왜곡 선급 기준에 만족하는 것으로 예상되지만 고조파 왜곡 현상이 좀 더 낮고, 장비 신뢰도가 높으며, 중량과 설치성이 용이한 AFE 방식을 선택하는 것이 유리하다.

인버터와 전동기 사이에 Sine Wave Filter의 적용여부는 초기 선정 단계에서 고려하지 않을 것이다.

전기추진 제어 방식 선정 결과에 따른 개략적인 구조는 그림23과 같다.

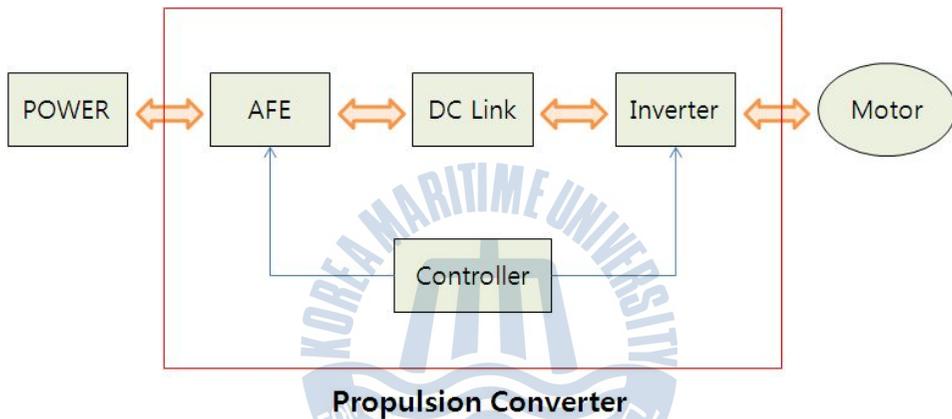


그림23 전기추진 제어 방식 구조도

V. 다목적 특수선의 고조파 예측

본 장에서는 IGBT 전력소자를 사용하는 PWM 정류기와 PWM 컨버터의 고조파 특성을 분석하고, AFE 방식의 Propulsion Converter를 적용한 다목적 특수선의 전기추진제어방식에 대하여 전 고조파 왜율 분석을 통해 선정의 타당성을 입증할 것이다.

고조파가 주로 발생하는 지점은 전력을 변환하는 장치이므로 Propulsion Converter에 대하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하고, 전기추진선의 전체 시스템에서의 전 고조파 왜율을 분석하고자 한다.

1. Propulsion Converter 모델링 및 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 파라미터 값은 표15와 같다.

표15. 시뮬레이션에 사용된 파라미터

구 분	설정치
전압	690V
전원임피던스	0.5Ω / 1mH
DC Link C	200μF
부하 임피던스	38Ω / 50mH

1.1 PWM 정류기

PWM 정류기는 IGBT 또는 MOSFET와 같은 전력용 스위치를 사용하여 펄스 폭 변조에 의해 출력 전압을 제어한다.

실제 전압형 PWM 정류기는 전류형 PWM 정류기 보다 널리 사용된다. 이는 적당한 크기의 캐퍼시티에 의해 리플 전압이 작아지게 되어 이상적인 DC 출력전압을 발생하며, 승압 특성으로 인해 정류기의 전원단에 높은 값의 출력 전압 발생이 가능하기 때문이다.

PWM 정류기의 크기제어비 M 은 변조 지수 m 에 상응한다. $M=m=1$ 일 때, 정류기의 DC 출력전압은 대략 입력 선간전압의 피크 값과 같다.

입력단에서의 전압 및 전류 파형과 고조파 스펙트럼 분석을 위해 PSIM 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 24는 전압형 PWM 정류기의 시뮬레이션을 위한 회로도이다.

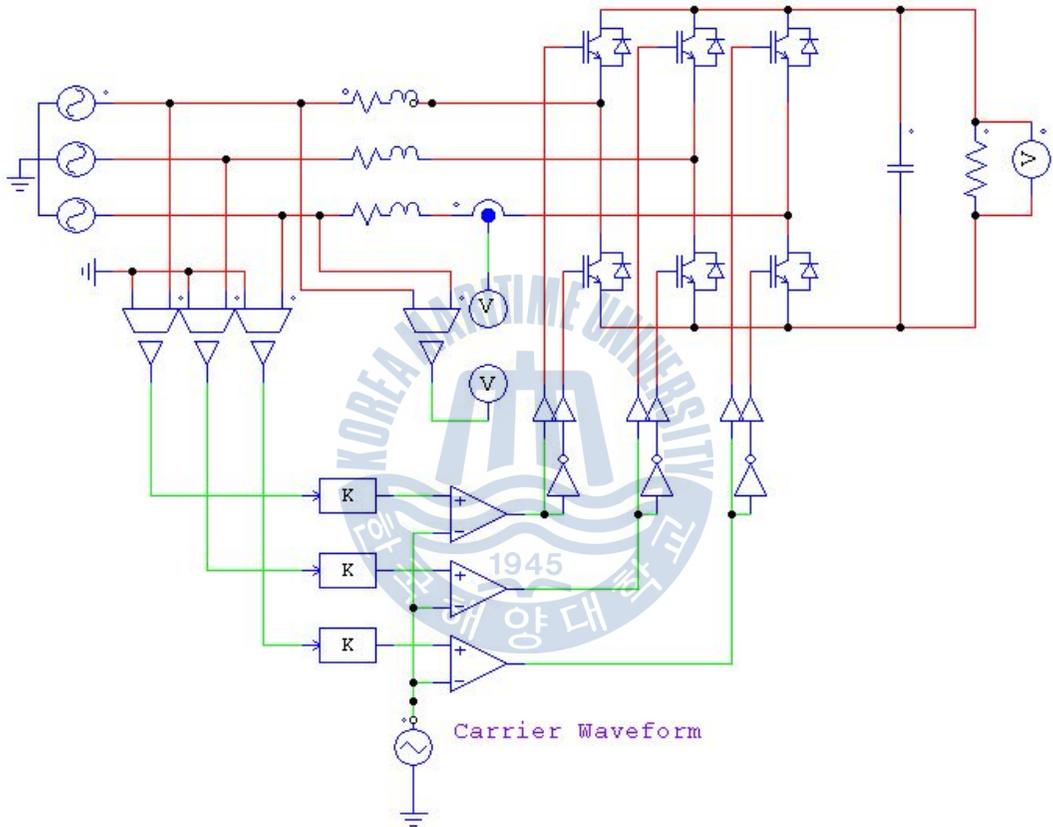


그림24 PWM 정류기 회로도

전압형 PWM 정류기의 입력 전압 및 전류 파형은 그림25와 같다.

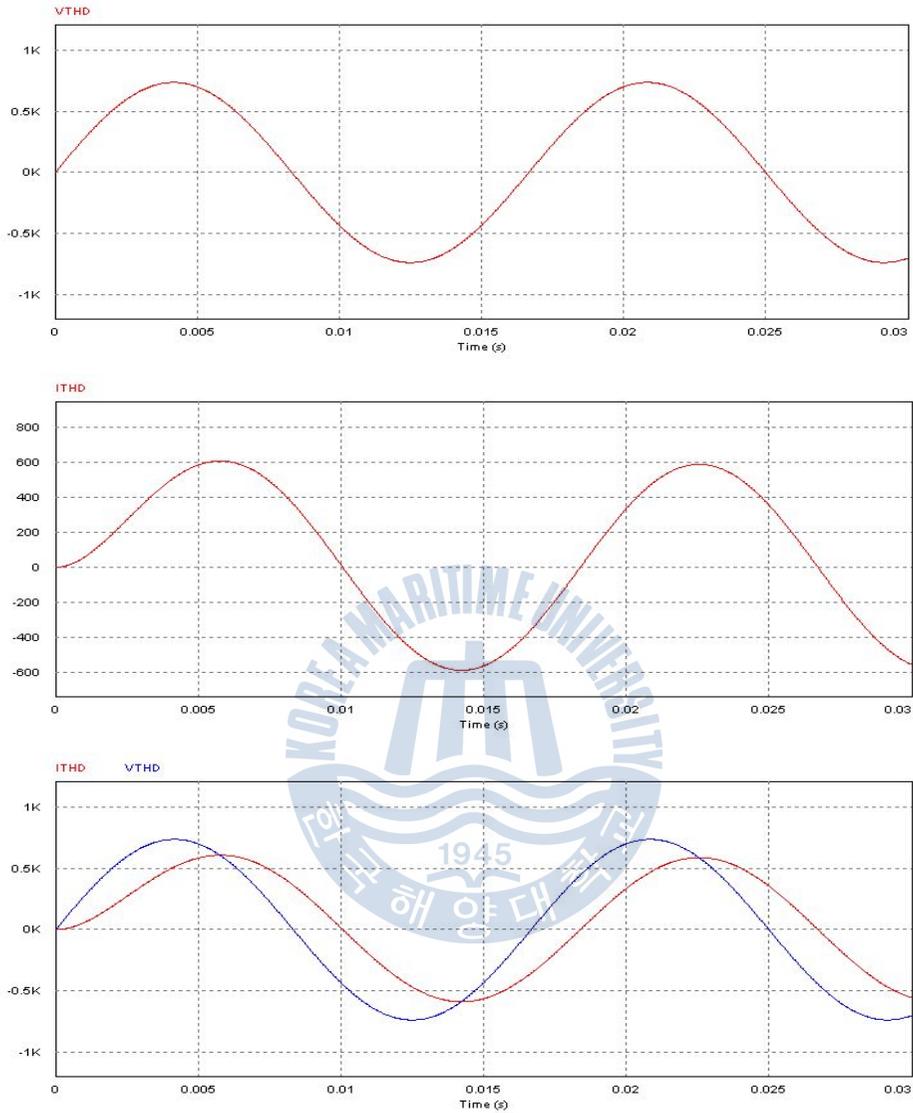


그림25 PWM 정류기 입력 전압 및 전류 파형

그림25에서 입력부에서의 전압 및 전류 파형은 깨끗한 정현파의 형태를 나타내고 있고, 이는 전압 및 전류의 특성이 양호함을 나타낸다.

1.2 PWM 인버터

PWM 인버터는 DC 전원을 AC 전원으로 변환하기 위해 IGBT(중전력용) 또는 IGCT(대전력용)와 같은 전력용 스위치 소자를 사용한다.

전압 및 전류 파형과 고조파 스펙트럼 분석을 위한 전압원 인버터의 시뮬레이션 회로도에는 그림26과 같다.

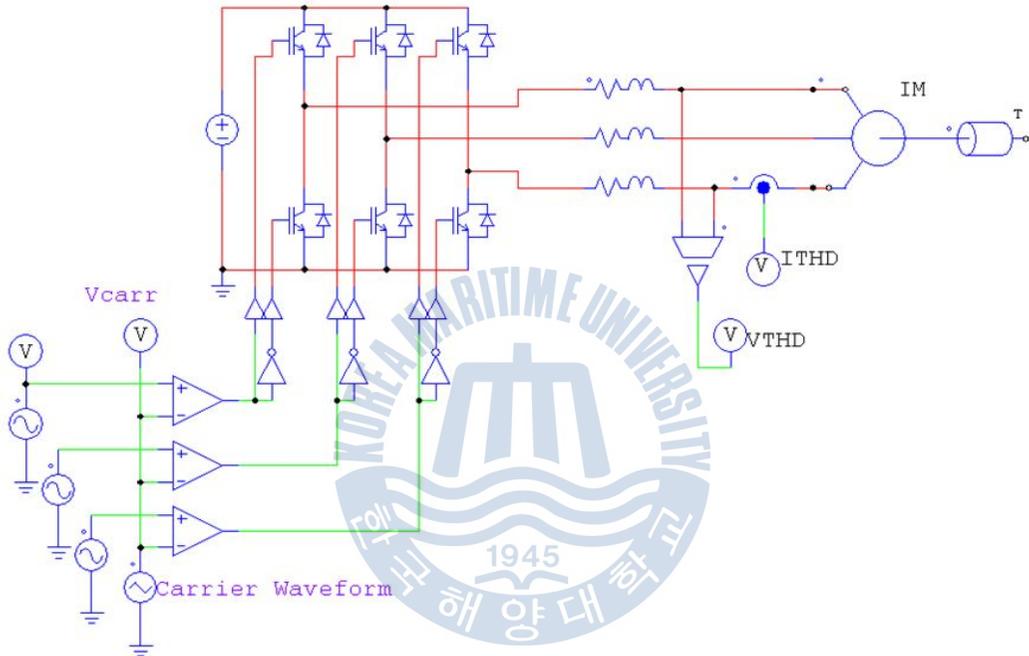


그림26 PWM 인버터 회로도

전압원 PWM 인버터의 출력 전압 및 전류 파형은 그림27과 같다.

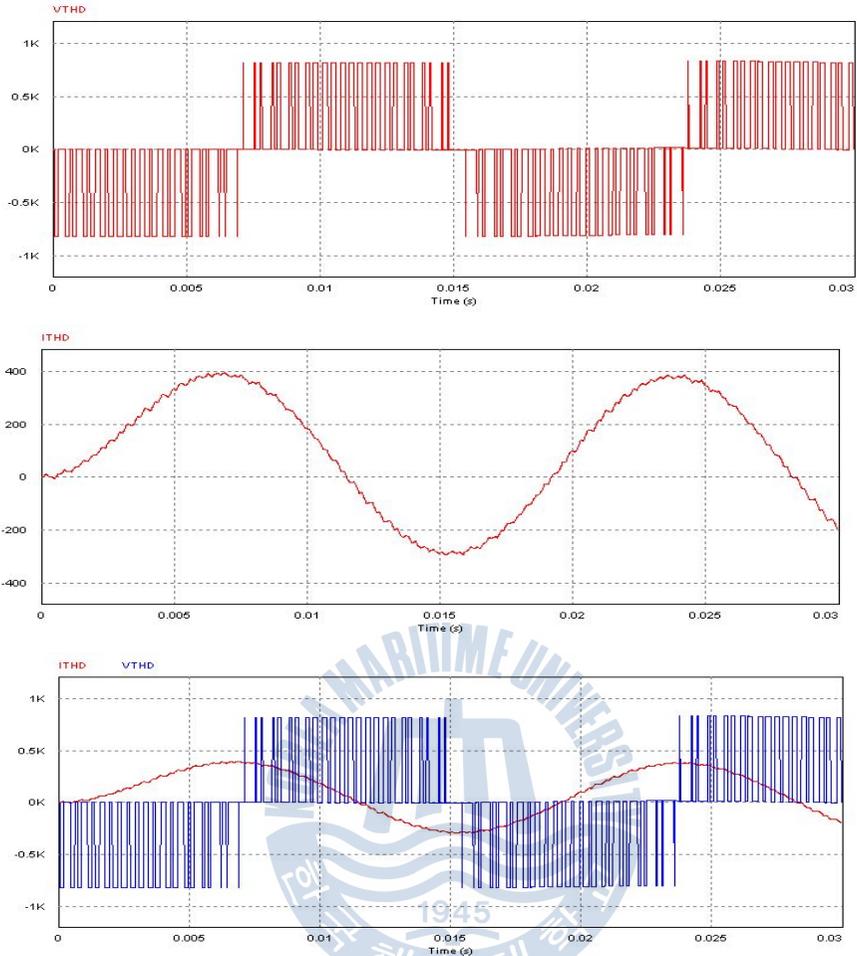


그림27 PWM Inverter 출력 전압 및 전류 파형

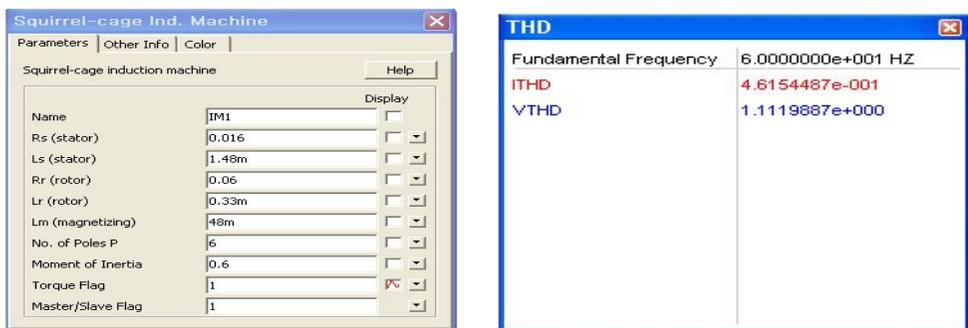


그림28 PWM 인버터 전력소자 파라미터 및 시뮬레이션 결과

그림 28에서 전 고조파 왜율은 전압 전 고조파 왜율이 1.11%, 전류 전 고조파 왜율은 0.46%이고, 기준치인 5% 이내로 양호한 특성을 나타내었다.

1.3 소결론

Propulsion Converter에서 PWM 방식의 정류기 및 인버터의 사용은 전압 및 전류 파형 분석한 결과에서 보듯이 고조파 감소 효과가 크게 개선되어 전동기에 공급되는 고조파의 제거 효과를 높여 발전기 및 전력계통의 불안정한 전력 변동을 해소할 수 있는 장점이 있다.

2. 다목적 특수선의 전기추진 시스템 모델링 및 시뮬레이션

시스템 및 발전기의 설정은 표16과 같이 가정하고, 시뮬레이션에 사용된 전력소자의 파라미터 값은 표17과 같다.

표16 시스템 설정

구 분		설정치
시스템	전압	690V
	주파수	60Hz
발전기	수량	4
	정격출력	1,200KW
	역률	0.8
	계전기 리액턴스	16%
전동기	컨버터방식	AFE
	출력	2,000KW

표17 시뮬레이션에 사용된 전력소자 파라미터

구 분	설정치
L2 / R8	180 μ H / 64 Ω
R5 / C5	0.1 Ω / 65 μ F
L6 / R6 / C6	60 μ H / 4 Ω / 25 μ F
RG / CG	1M Ω / 2 μ F
L3 / R18	180 μ H / 400 Ω

Propulsion Converter로부터의 출력전압은 고조파의 주요 원인이 된다. 이 고조파 해석을 위한 등가회로는 그림29와 같다. IGBT TM1과 IGBT TM2 모듈 사이는 DC Link로 구성되어 있다. 직병렬로 연결된 LC 성분에 의해 교류 전원에 미치는 고조파의 악영향을 저감할 수 있다.

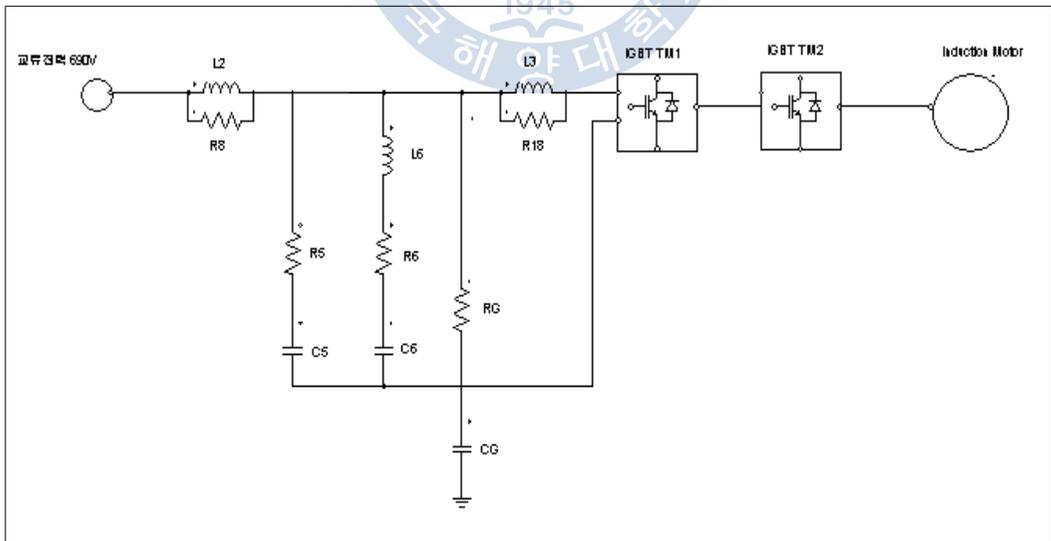


그림29 Propulsion Converter 고조파 해석 모델

전기추진 시스템의 고조파 스펙트럼 분석을 위해 상용 ETAP 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, Propulsion Converter를 적용한 고조파 해석을 위한 회로도 는 그림30과 같다.

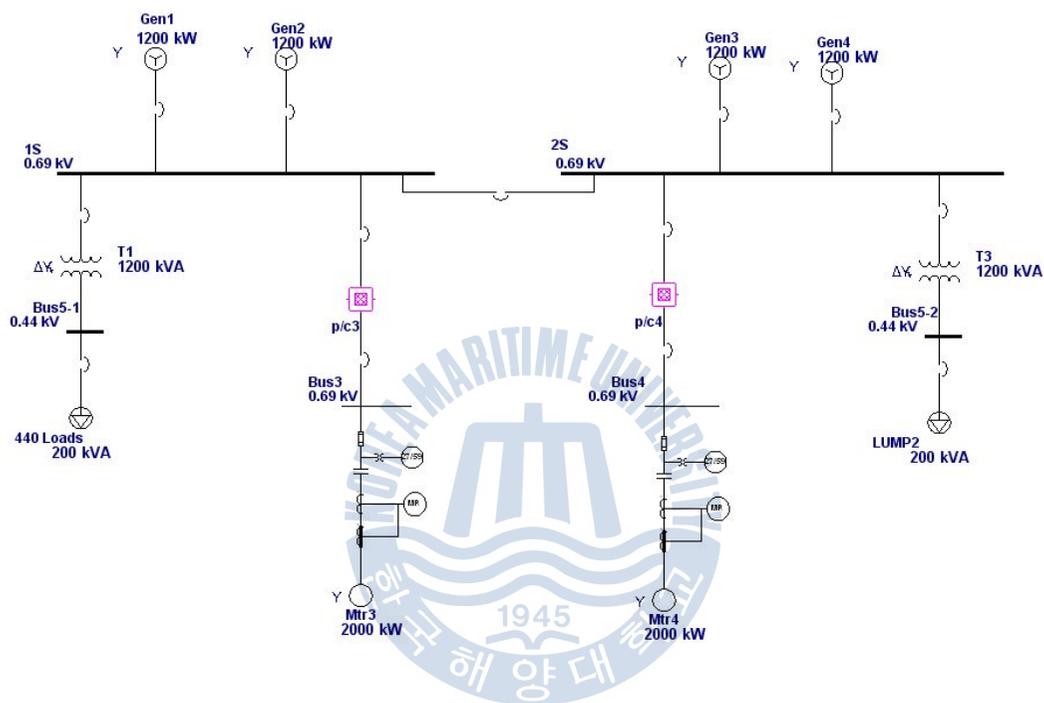


그림30 다목적 특수선의 전기추진 시스템 고조파 해석 모델

4-Generator & 2-Propulsion 운용조건 의 전 고조파 왜율 시뮬레이션 결과는 그림31에서와 같고, 690V Bus는 입력측 2.50%, 출력측 2.58%로 나타났으며, 440V Bus는 2.76%로 기준치인 5% 이내를 모두 만족하였다.

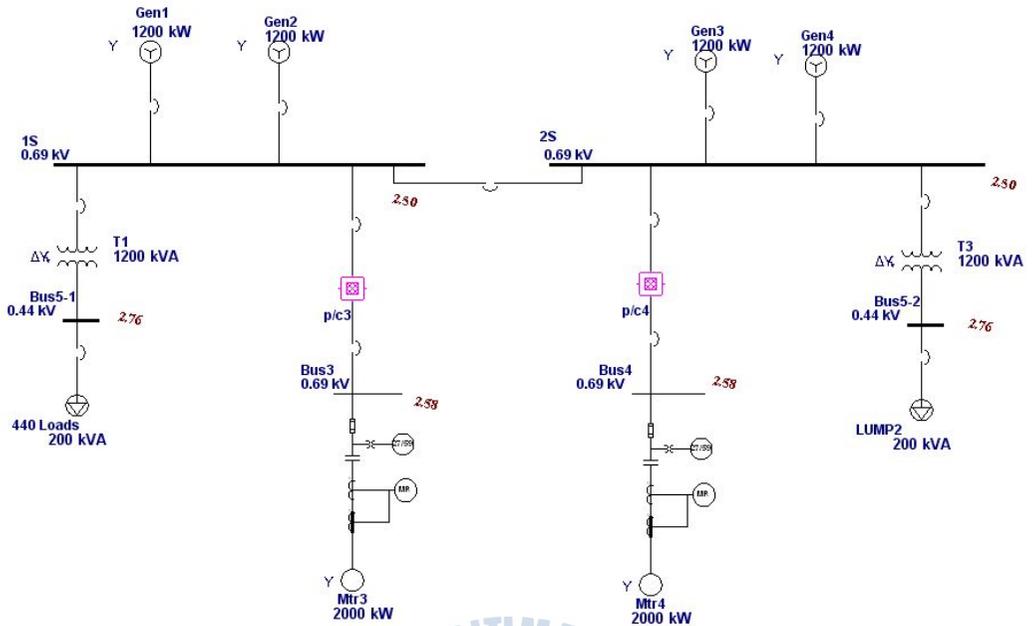


그림31 4-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과

위 시뮬레이션에 대한 결과를 정리하면 표18과 같다.

표18 4-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과

구 분	전 고조파 왜율
690V Bus 입력측	2.50%
690V Bus 입력측	2.58%
440V Bus	2.76%

각각의 고조파 차수별 스펙트럼은 그림32에서 그림34와 같다.

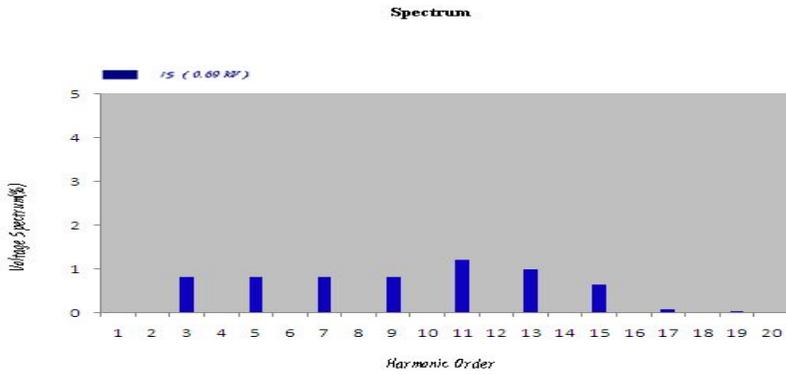


그림32 입력측 690V Bus 고조파 스펙트럼

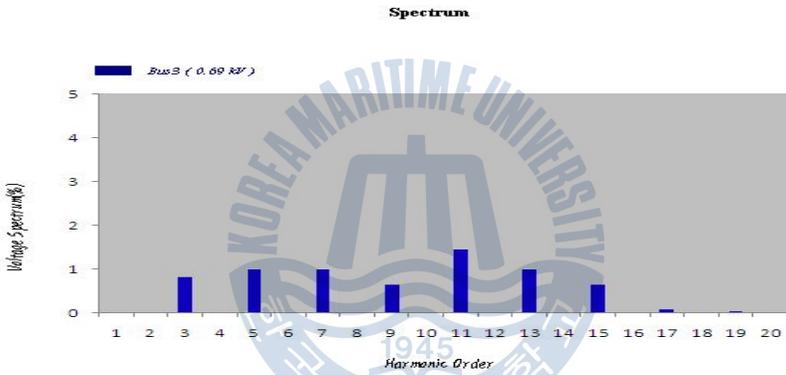


그림33 출력측 690V Bus 고조파 스펙트럼

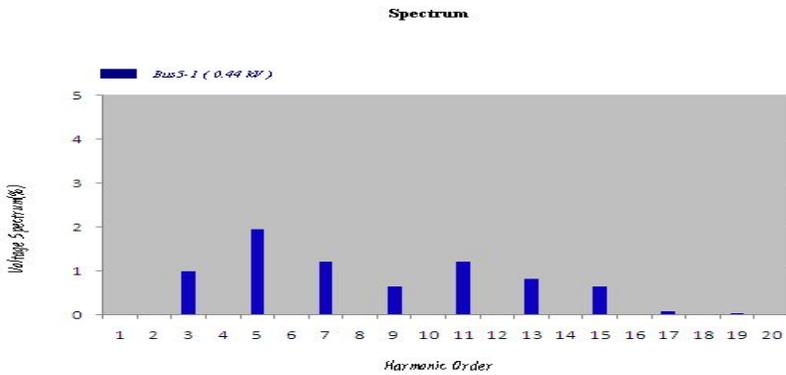


그림34 출력측 440V Bus 고조파 스펙트럼

3-Generator & 2-Propulsion 시스템의 전 고조파 왜율 시뮬레이션 결과는 그림35에서와 같고, 690V Bus는 입력측 2.55%, 출력측 2.86%로 나타났으며, 440V Bus는 3.73%로 기준치인 5% 이내를 모두 만족하였다.

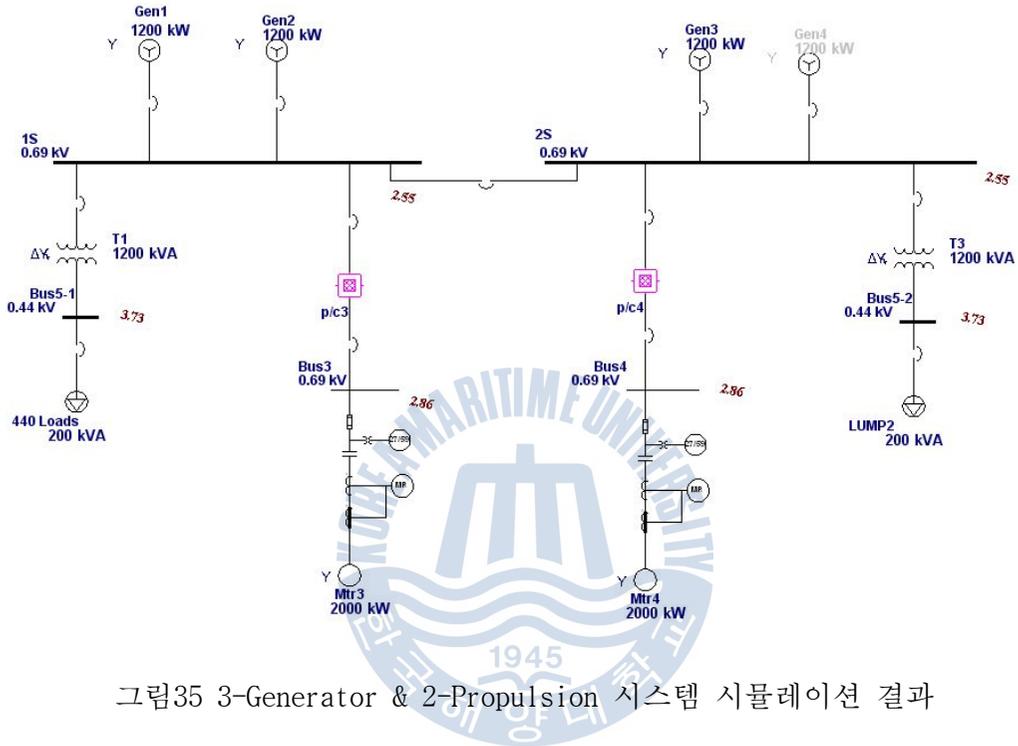


그림35 3-Generator & 2-Propulsion 시스템 시뮬레이션 결과

위 시뮬레이션에 대한 결과를 정리하면 표19와 같다.

표19 3-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과

구 분	THD
690V Bus 입력측	2.55%
690V Bus 출력측	2.86%
440V Bus	3.73%

각각의 고조파 차수별 그래프는 그림36에서 그림38과 같다.

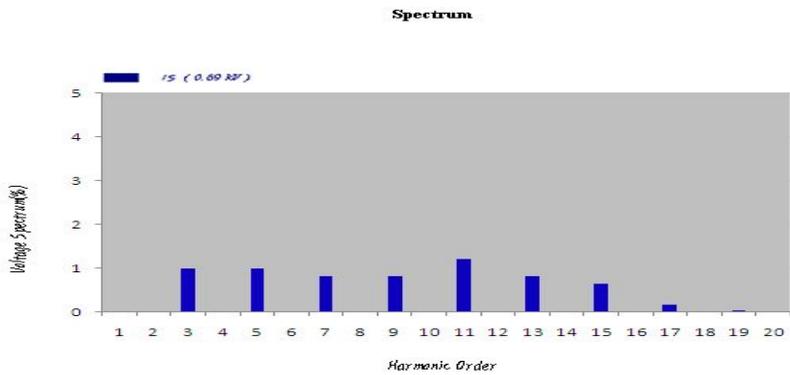


그림36 입력측 690V Bus 고조파 스펙트럼

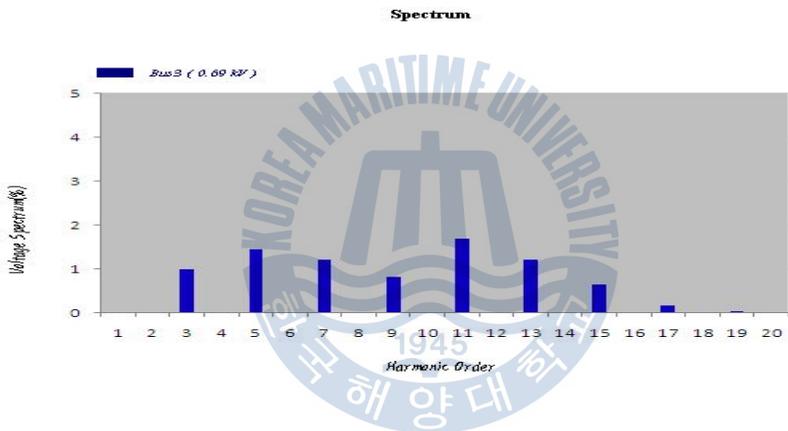


그림37 출력측 690V Bus 고조파 스펙트럼

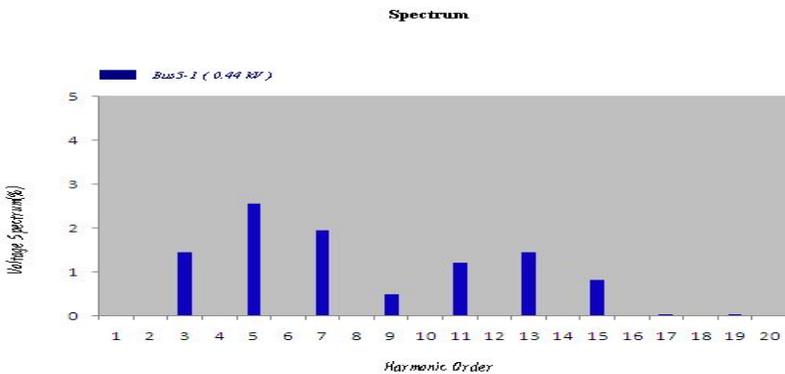


그림38 출력측 440V Bus 고조파 스펙트럼

2-Generator & 2-Propulsion 시스템의 전 고조파 왜율 시뮬레이션 결과는 그림39에서와 같고, 690V Bus는 입력측 2.72%, 출력측 3.22%로 나타났으며, 440V Bus는 4.04%로 기준치인 5% 이내를 모두 만족하였다.

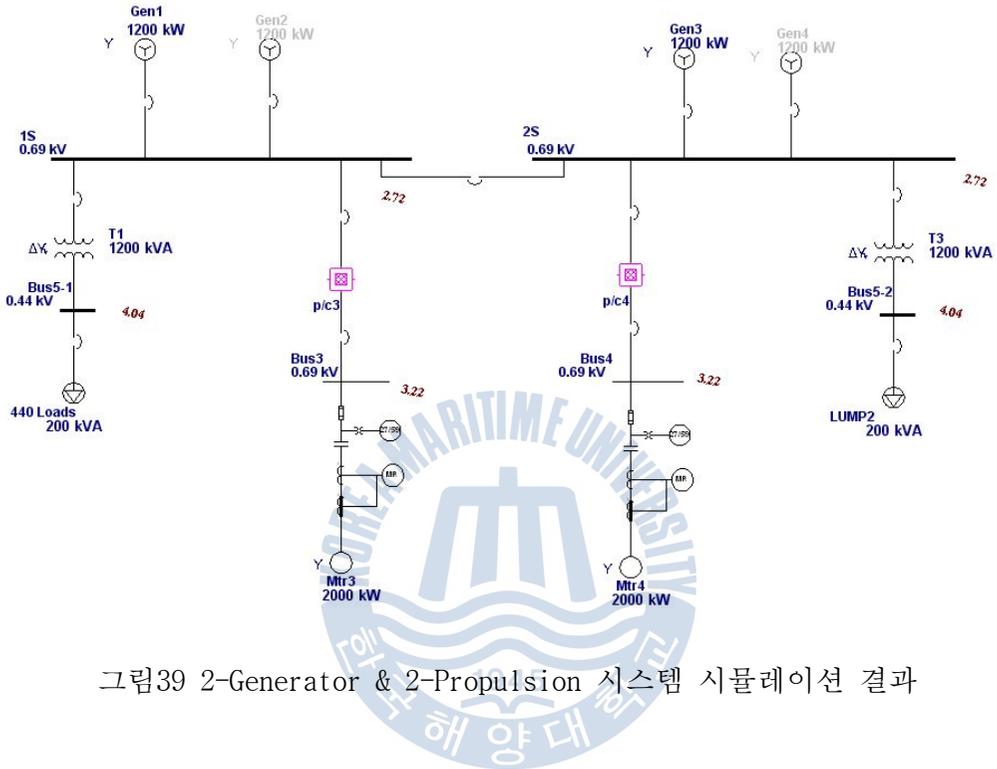


그림39 2-Generator & 2-Propulsion 시스템 시뮬레이션 결과

각각의 고조파 차수별 그래프는 그림40에서 그림42와 같다

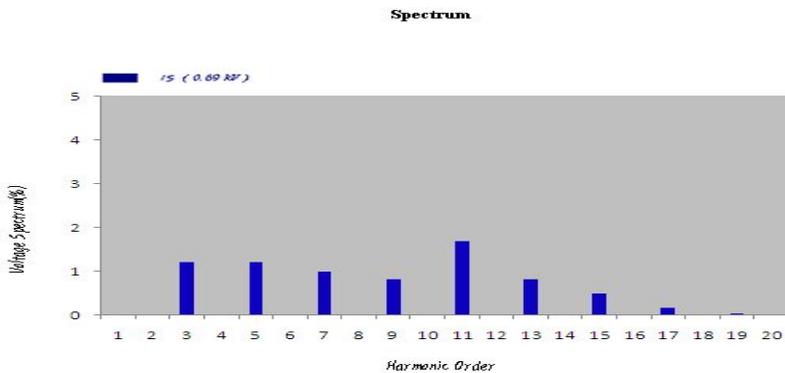


그림40 입력측 690V Bus 고조파 스펙트럼

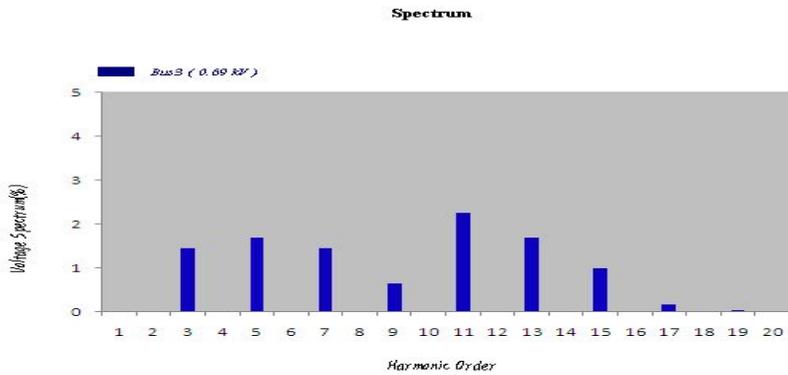


그림41 출력측 690V Bus 고조파 스펙트럼

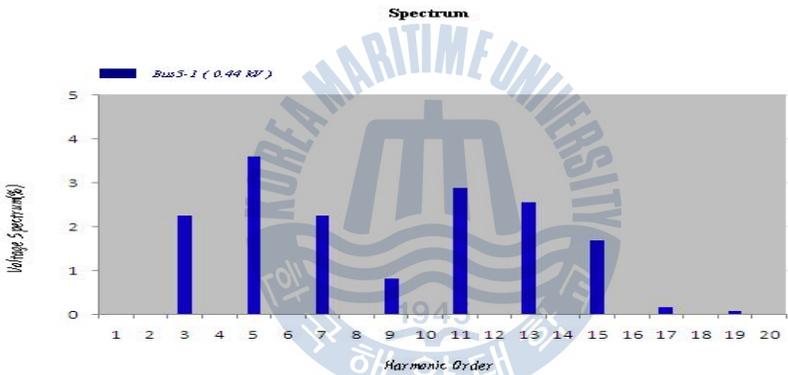


그림42 출력측 440V Bus 고조파 스펙트럼

위 시뮬레이션에 대한 결과를 정리하면 표19와 같다.

표20 2-Generator & 2-Propulsion 운용 시뮬레이션 결과

구 분	THD
690V Bus 입력측	2.72%
690V Bus 출력측	3.22%
440V Bus	4.04%

VI. 결 론

최근 전력전자 소자와 전동기 발달로 전기추진시스템을 적용하는 선박의 종류도 쇄빙선, 해양조사선, 군함 등의 특수목적 선박은 물론 여객선, LNG 등에도 사용이 증가되고 있다. 전기추진방식의 경우 복합추진 방식에 비하여 경제적인 측면(초기획득비, 운용유지비)에서 다소 고가이며(약 17~33%), 중량 또한 무거운(약 9%) 단점이 있으나, 설치 공간 및 정숙성, 조종성, 정비 유지 측면에서 유리하다. 특히 해상 및 수중 성능시험을 지원하고 해양 환경 조사 등의 목적을 갖는 다목적 특수선에서의 전기추진시스템 적용은 많은 장점을 갖는다.

본 논문에서는 우수한 조종성능과 저진동/저소음을 요구하는 다목적 특수선에서 전기추진시스템 적용의 장점과 이에 따라 필수적으로 해결해야 하는 전력변환장치의 고조파 영향을 분석하였다.

분석대상 추진기는 Propeller방식, Azimuth Thruster방식 및 POD 방식의 3가지로 대표되며 이중 Propeller방식과 Azimuth Thruster방식을 비교 분석한 결과, 운용성 측면에서 Azimuth thruster방식이 Propeller방식 보다 우수한 것으로 나타났으며, 설치성 및 정비 유지성, 경제성 측면에서는 대동소이한 것으로 나타났지만, 정숙성 관점에서는 Azimuth Thruster가 일부 저주파 구역에서 수중방사소음이 ICES 기준을 만족하지 못하므로 제한적 운용이 불가피하므로 선박운항의 주목적에 따라 세밀한 검토가 이루어져야 할 것이다.

교류 전동기를 구동하기 위한 Propulsion Converter를 선정함에 있어 PWM 방식의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한 결과 우수한 특성을 나타냈다. IGBT

전력변환 소자를 이용한 PWM 정류기와 DC Link, 그리고 PWM 인버터로 연결되는 Propulsion Converter는 고성능의 전력변환 장치를 형성하였다.

상기 펄스 폭 변조 방법으로 전압과 전류를 제어하는 AFE 방식의 Propulsion Converter를 적용한 다목적 특수선의 전기추진시스템에 대하여 운용 조건별 시뮬레이션을 수행한 결과 종합 고조파 왜형율이 IEEE 519 및 선급 규정인 5% 이내에 모두 만족함을 알 수 있었다.

향후 다양한 변수에 대한 세부 모델링 적용과 실선에서의 고조파 측정을 통한 데이터 확보를 통하여 시뮬레이션 결과와의 비교 분석을 한다면 좀 더 실질적인 시뮬레이션 모델의 개발이 가능할 것이며, 이는 설계 단계에서 성능 및 경제적 측면을 고려한 선박 특성에 적절한 추진기 제어 시스템을 선택할 수 있을 것으로 생각된다.



참 고 문 헌

- [1] Agrawal, J. P., Power Electronic Systems: Theory and Design, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001, Chap. 1.
- [2] Baliga, B. J. Power Semiconductor Devices, Boston: PWS Publishing Co., 1995.
- [3] Bose, B. K. Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001, Chap. 1.
- [4] Rashid, M. H., Power Electronics Handbook, 2nd ed., Academic Press, San Diego, CA, 2007
- [5] Hingorani, N. G., "High-voltage dc transmission: a power electronics workhorse," IEEE spectrum, Apr. 1996, pp. 63~72.
- [6] Malesani, L., and Tenti, P., "Three-phase ac/dc PWM converter with sinusoidal ac currents and minimum filter requirements," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 23, no. 1, pp. 71~77, 1987.
- [7] Malinowski, M., Kazmierkowski, M., and Trzynadlowski, A. M., "A comparative study of control techniques for PWM rectifiers in AC adjustable speed drives," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 6, pp. 1390~1396, 2003.
- [8] De Doncker, R. W., and Lyons, J. P., The auxiliary resonant commutated pole converter, Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1228~1235, 1990
- [9] Divan, D. M., The resonant dc link converter: a new concept in static power conversion, IEEE Transactions on Industry Application, vol. 25, no. 2, pp. 302~316, 1990.

- [10] Enjeti, P. N., Ziogas, P. D., and Lindsay, J. F., Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: a critical evaluation, IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 26, no. 2, pp. 302~316, 1990.
- [11] Holtz, J., Pulsewidth modulation: a survey, IEEE Transactions on Industry Electronics , vol. 39, no. 5, pp. 410~420, 1992.
- [12] Trzynadlowski, A. M., Borisov, K., Li, Y., and Qin, L., A novel random PWM technique with low computational overhead and constant sampling frequency for high-volume, lowcost applications, IEEE Transactions on power Electronics, vol. 20, n0. 1, pp. 116~122, 2005.
- [13] 이성우, “단락전류 활용 기술과 고조파해석 및 대책, 제5장 고조파 해석 및 대책,” 기다리, 2010.
- [14] Andrzej, M. Teznhadlowski, "현대 전력전자공학", 한빛미디어, 2011.
- [15] 특허청. “신기술동향조사 보고서, 기계금속분야 제6권: 선박추진기술” , 2004.
- [16] 박병주, “전력계통의 고조파 억제 기술,” 월간전기 9월호, pp. 42~53, 2009.
- [17] 김주완, 이충열, 서근경, “전기추진선을 위한 고조파 제어 사례 연구,” 대한조선학회 특별논문집, 2008년 9월, pp.38~45.
- [18] CONVERTEAM, "Electric Propulsion System Convert & Motor", Presentation, 2009.
- [19] ABB Marine & Turbocharging, "Project Guide for Azipod Propulsion System, 2003.
- [20] <http://www.abb.com>.
- [21] <http://www.converteam.com>