

전기 추진선의 기술 동향

전력전자학회 하계 학술대회
2010. 07. 06

유 안노, 김 소연, 설 승기
서울대학교 전력전자 연구실

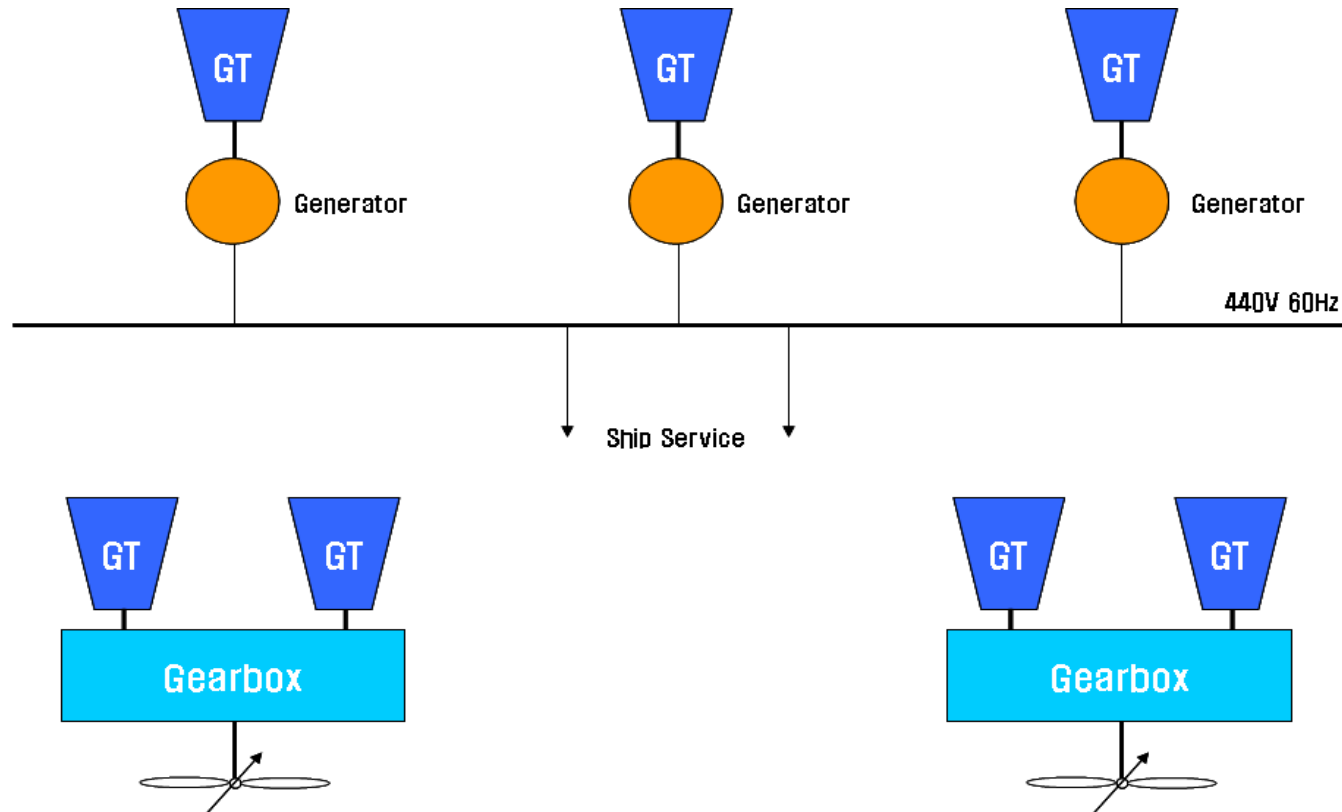
- 전기 추진선 개요
- 전기 추진선의 추진 체계
- 전기 추진선의 배전 체계
- 전동기 구동 기술 적용 예
- 결론

■ 전기 추진선의 역사

- ▶ 19세기 말 :
 - ◆ 러시아, 독일 등에서 Battery에 의해 운전되는 전기 추진 선박 개발
- ▶ 1920년 대 :
 - ◆ 대서양 횡단 선에 사용
 - ◆ 디젤 엔진의 비약적 발전에 의해 디젤 엔진 추진 선박이 대세
- ▶ 1970년 대 : 전동기 제어 기술의 발전
 - ◆ SCR을 이용한 AC/DC 정류기를 이용한 선박 개발
- ▶ 1980년 대 : 전력전자, 전동기 설계 기술의 발전
 - ◆ AC/AC 컨버터 기술 적용
- ▶ 1990년 대 : 연비 및 특수 성능(조향성, 정속성, 생존성)에 대한 요구
 - ◆ Podded propulsion 개발 (icebreaker, cruise ship등에 사용)
- ▶ 현재 :
 - ◆ Field support vessel, offshore construction vessel의 경우 연간 30~40%의 연료 절감 효과 기대
 - ◆ 영국 해군은 2000년대 초반부터 신예함정은 전부 전기추진선으로 발주 중

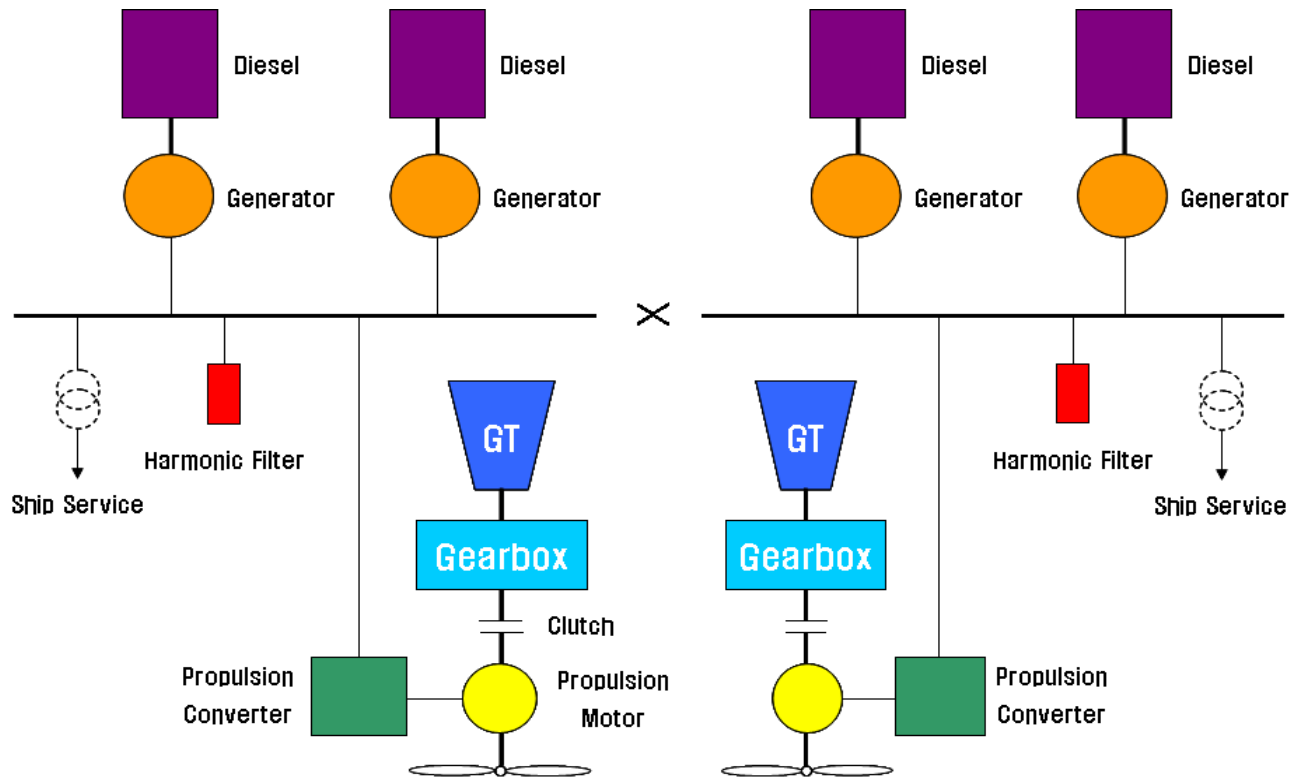
■ 선박의 추진 시스템(1)

- ▶ 기계적 추진 시스템(COGAG : Combined Gas and Gas)
 - ◆ 고속의 가스 터빈(gas turbine), 감속 기어, 발전기
 - ◆ 무게 증대, 소음 증대



■ 선박의 추진 시스템(2)

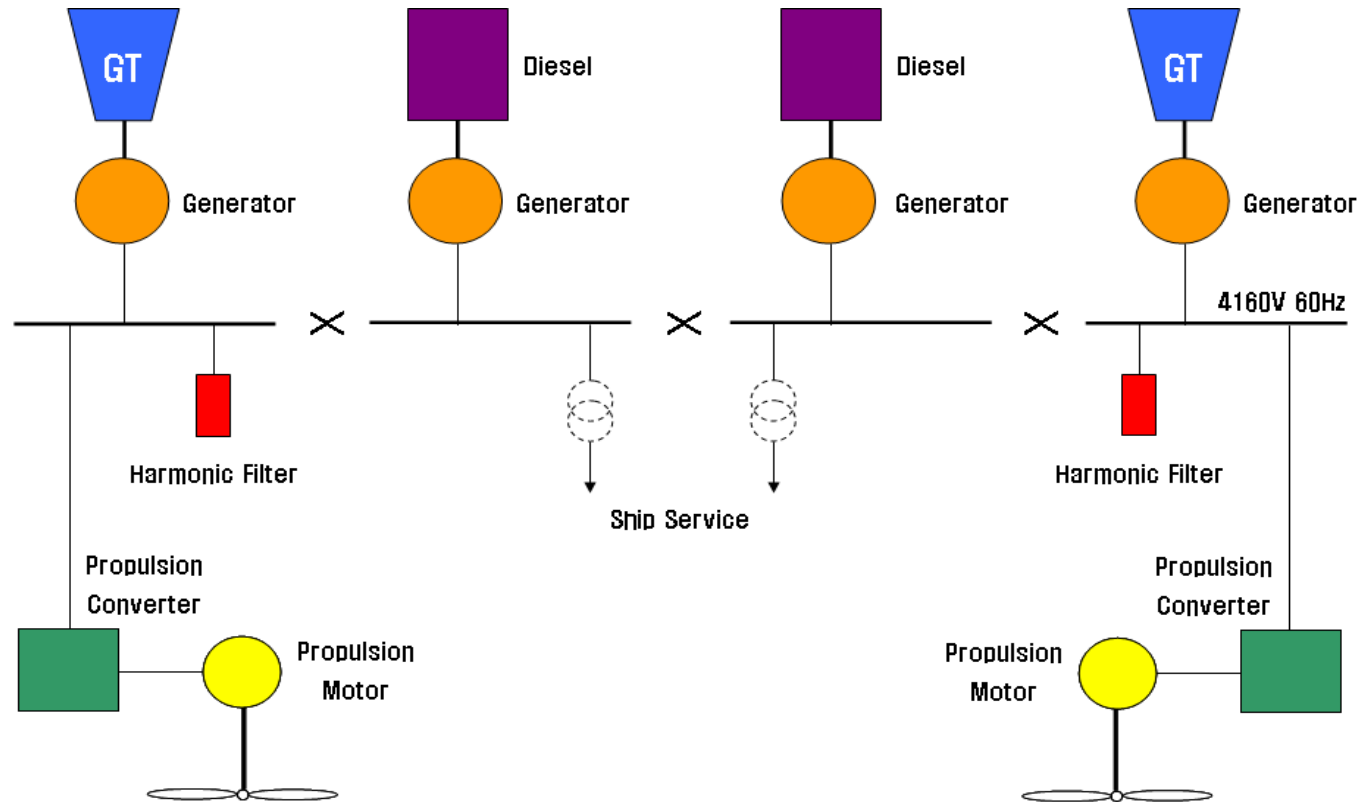
- ▶ 하이브리드 추진 시스템(CODLAG : Combined Diesel Electric and Gas)
 - ◆ 고속의 가스 터빈, 저속의 디젤 엔진, 감속 기어, 발전기, 전력변환 장치, 추진 전동기
 - ◆ 운전 상황에 따른 엔진 사용



■ 선박의 추진 시스템(3)

▶ 전기 추진 시스템(IEP : Integrated Electric Propulsion)

- ◆ 고속의 가스 터빈, 저속의 디젤 엔진, 발전기, 전력변환 장치, 추진 전동기
- ◆ 운전 상황에 따른 엔진 사용



■ 전기 추진선의 장점(1)

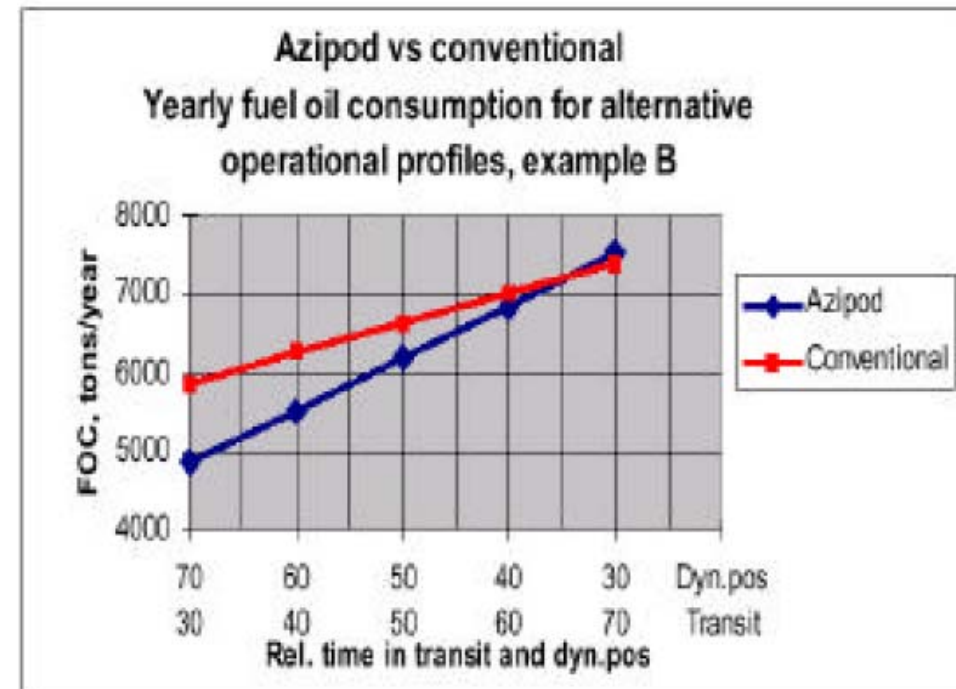
- ▶ “All Electric Ship” 개념 채택을 통한 전체 시스템의 단순화
 - ◆ 추진 엔진 시스템과 전기 부하용 엔진 시스템의 일체화
 - ◆ 신뢰성 향상: 유지보수 인력 및 비용의 절감
- ▶ 선박 설계의 유연성
 - ◆ 선박 용적률 향상
 - ◆ 생존성 향상
 - ◆ 신뢰성 향상



■ 전기 추진선의 장점(2)

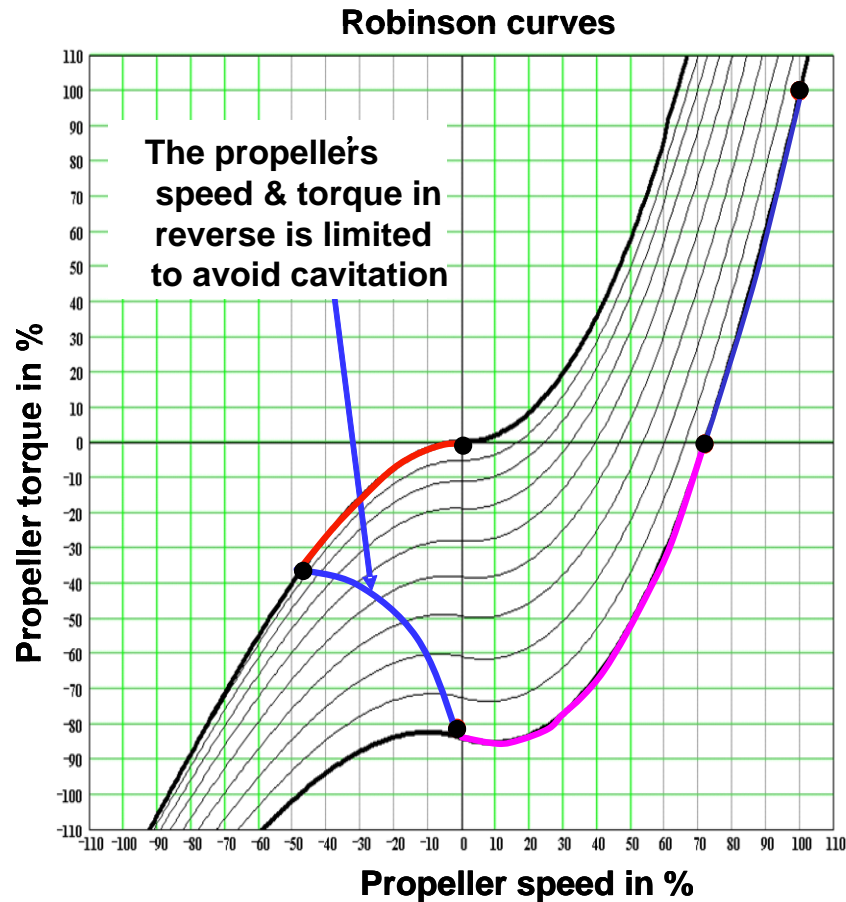
▶ 시스템 최적화

- ◆ 최적의 사양 결정 가능
 - 엔진 사양의 최적화, 연료 소모량 및 공해 물질 (Emission) 감소
- ◆ 부하 특성에 따른 시스템 운영
 - 모든 속도 영역에서 최적 운전 가능
 - 전력 제어(Power Control)의 최적화
 - 여유율(Redundancy) 확보 용이
 - 간단하고 안전한 시스템 운영 가능

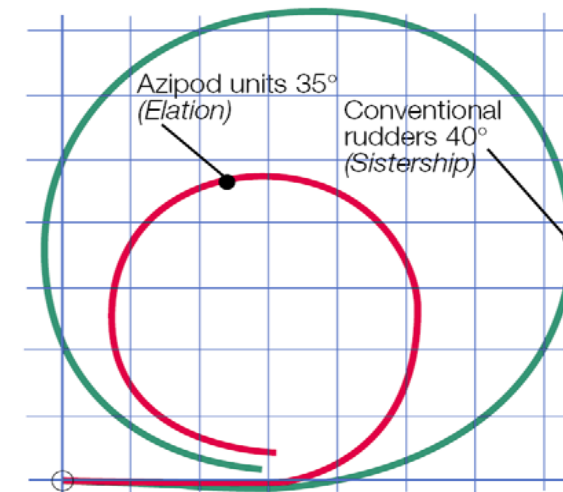


■ 전기 추진선의 장점(3)

- ▶ 조향 성능 향상
- ▶ 제동 거리(Crash stop distance)



Turning circle test at full speed



■ 전기 추진선의 장점(4)

- ▶ 진동 및 소음 억제
 - ◆ 추진 축(shaft) 제거를 통한 선체 진동 및 소음 감소
 - 엔진 발전기의 유연한 배치
- ▶ 엔진 사양의 변경 가능
 - ◆ 저속 대형 엔진
 - 중속 중형 엔진
 - ◆ 엔진의 소음 및 진동 감소
- ▶ 프로펠러 캐비테이션(cavitation) 감소
 - ◆ 능동적인 캐비테이션 제어 가능
 - ◆ 수중 소음/진동 감소
 - ◆ 프로펠러 마모 현상 감소



전기 추진선의 개요

■ 전기 추진선의 단점

- ▶ 초기 투자 비용의 증대

- ▶ 추가적인 부품
 - ◆ 추진용 전동기
 - ◆ 대용량 전력 변환기
 - ◆ 대용량 배전반 및 차단기
 - ◆ 에너지 변환 효율 저감

- ▶ 새로운 시스템에 대한 적응
 - ◆ 설계 제조를 위한 인력과 장비
 - ◆ 유지 보수를 위한 설비, 인력

■ 전기 추진선의 추진 체계

▶ 추진 전동기

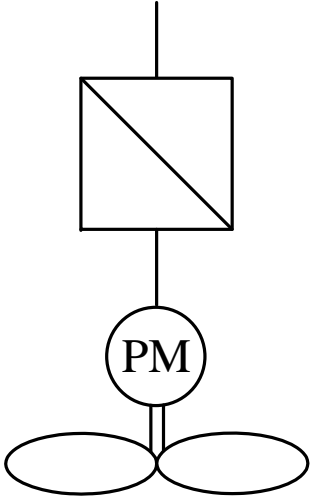
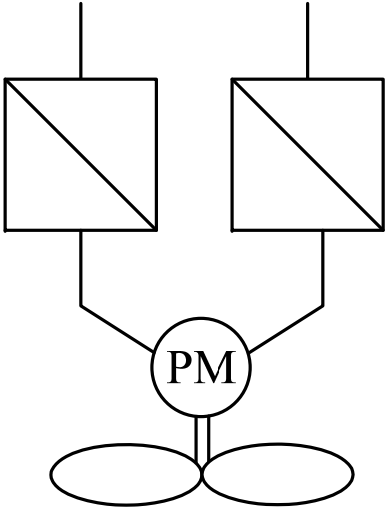
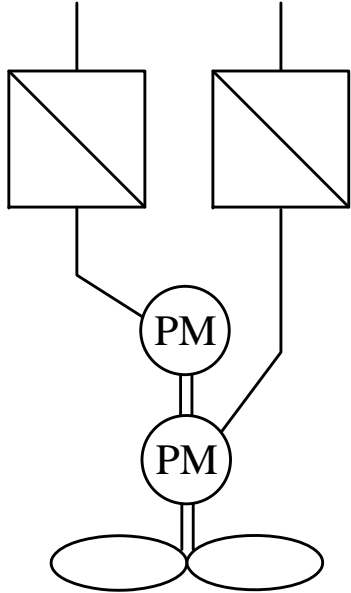
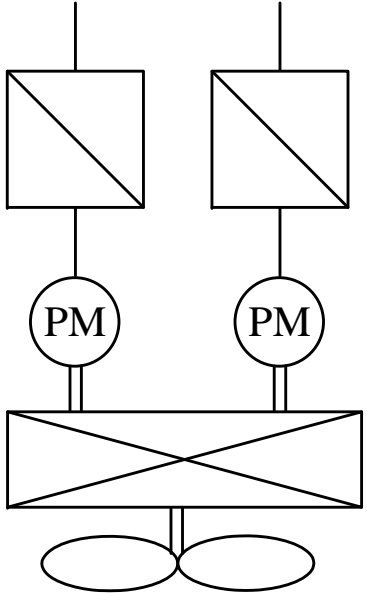
- ◆ 과거 : 직류(DC) 전동기
- ◆ 현재 : 동기(Synchronous) 전동기 또는 유도(Induction) 전동기
- ◆ 현재,향후: 영구자석(Permanent Magnet) 동기 전동기, 초전도(HTS) 전동기

▶ 전력 변환 장치

- ◆ 과거 : Load Commutated Inverter(LCI)
또는 전류형 인버터(Current Source Inverter)
- ◆ 현재 : PWM 방식의 전압형 인버터(Voltage Source Inverter)가 주로 사용

■ 전기 추진선의 추진 체계 구성 방안

▶ 전력 변환 장치와 추진 전동기 구성에 따른 방안

			
<p>전동기 단독 운전 (single motor drive)</p>	<p>전동기 병렬 운전 (two winding motor with redundant converters)</p>	<p>직렬 연결 전동기 병렬 운전 (Tandem motor with redundant converters)</p>	<p>기어와 이중 추진축을 이용한 병렬 운전 (Gear, dual shaft propulsion)</p>

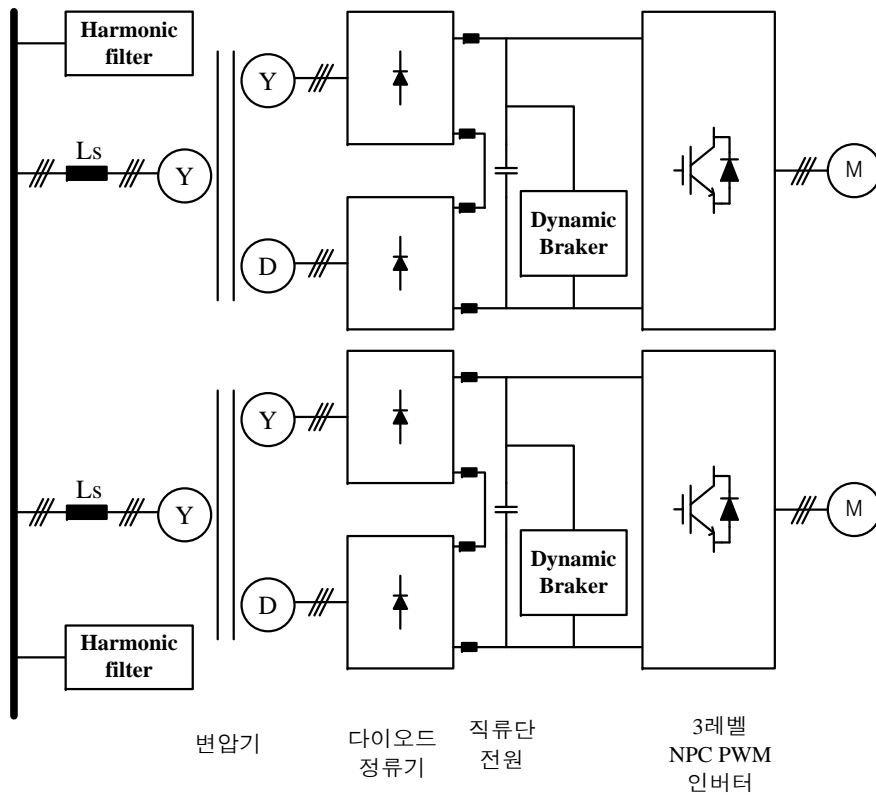
■ 전기 추진선의 고조파 규제들

- ▶ 전기 추진선의 주된 고조파 원 : 추진(propulsion) 체계
- ▶ IEEE-STD-45
 - ◆ 전압에 있어 전체 고조파 왜율은 5% 이하, 각 주파수의 최대 고조파(Maximum single harmonic)는 3%이하로 설정
- ▶ IEEE-STD-519
 - ◆ 전압에 있어 전체 고조파 왜율은 5% 이하, 각 주파수의 최대 고조파는 3%이하로 설정
- ▶ MIL-STD-1399-300B
 - ◆ 1kVA가 넘는 60Hz 시스템에서는 60Hz부터 2kHz까지 전류의 각 주파수 성분은 정격 운전 전류의 3%이하, 2kHz ~ 20kHz까지는 $6000/f$ % 이하
- ▶ AFE(Active Front-End) vs DFE(Diode Front-End)

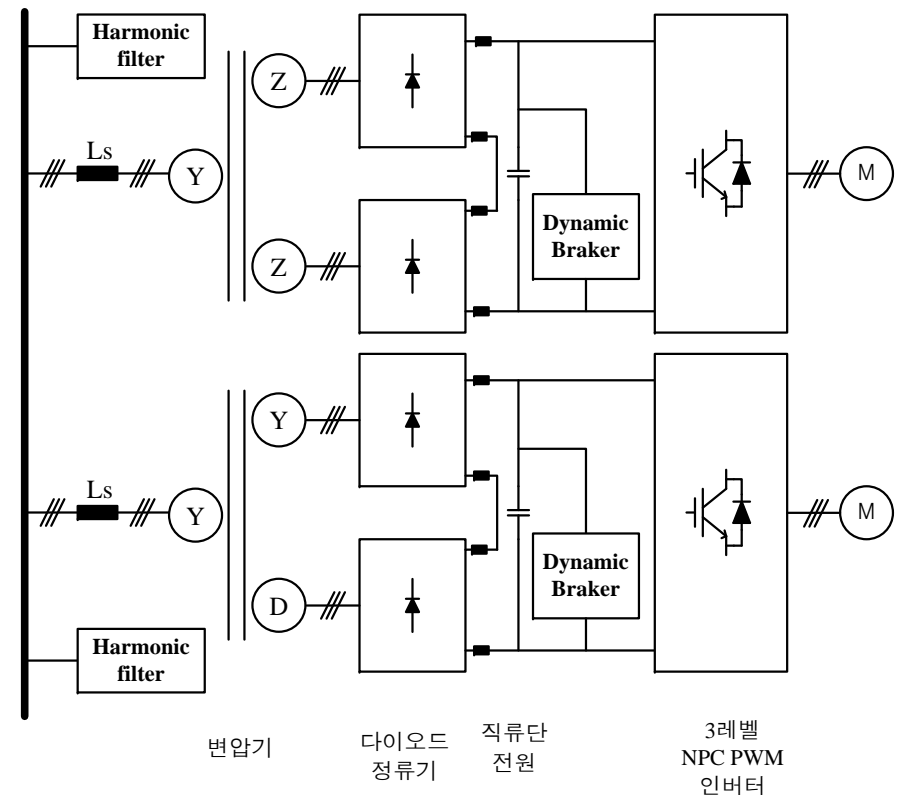
■ 전기 추진선의 추진 체계 구성안(1)

▶ DFE 방식

◆ 12펄스(pulse) 방식



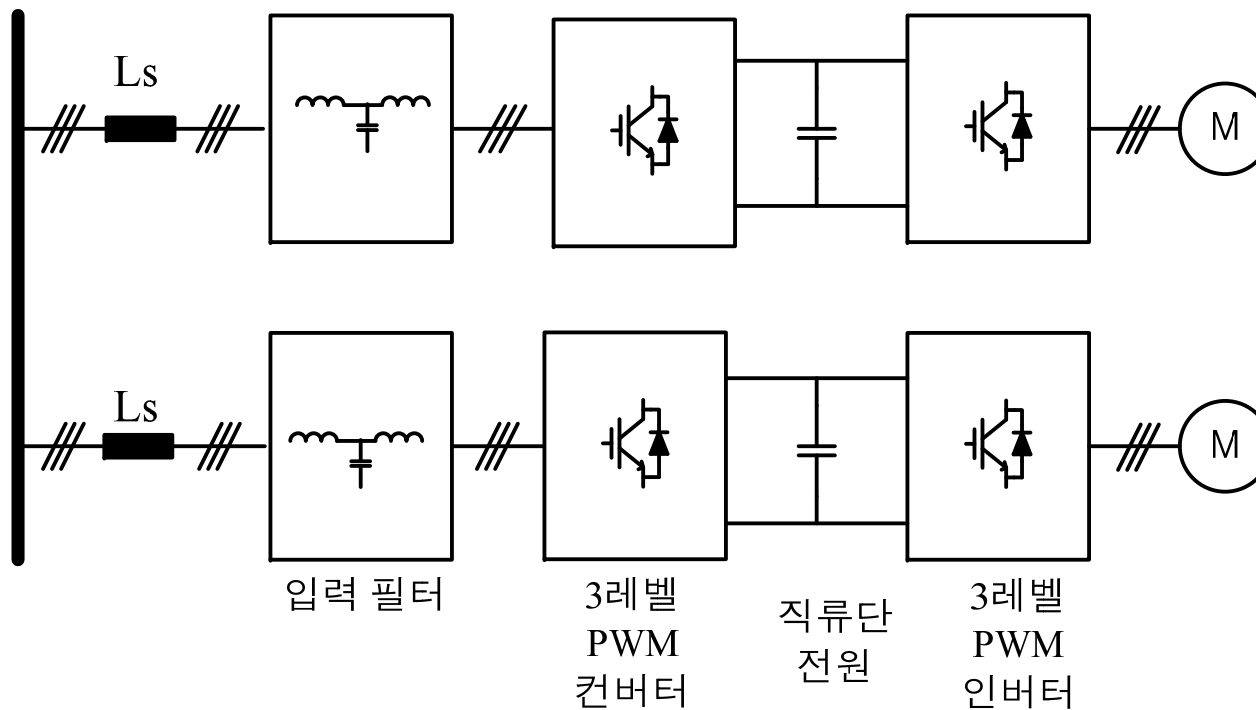
◆ 준(pseudo) 24 펄스 방식



■ 전기 추진선의 추진 체계 구성안(2)

▶ AFE 방식

- ◆ 고압(Medium Voltage : MV)에서는 입력 단에 절연용 변압기 필요
→ 접지(grounding)



■ 선박의 배전 체계 특징(1)

- ▶ 육상 배전에 비해 발전 용량이 작고 전압이 낮음
 - ◆ 전선의 낮은 임피던스로 인한 상대적으로 큰 단락전류 발생
 - 차단기(circuit breaker) 선정 시 어려움
 - ◆ 단락사고에 의한 전압강하 현상의 빠른 (수십 ms) 차단으로 시스템 보호 필요
 - 중요 부하(vital load) 보호

- ▶ 상대적으로 배전 거리가 짧고, 기기 간 상호 간섭 정도 큼
 - ◆ 빈번한 기기 시동/정지로, 기기 상호간 전압, 전류의 변동이 큰 편
 - ◆ 고조파와 공진(resonance) 현상

- ▶ 선박 환경의 취약성
 - ◆ 번개와 같은 자연재해에 쉽게 노출
 - 수백 μ s 동안의 번개가 차단기 또는 전선의 절연에 치명적 영향 초래 가능
 - ◆ 온도, 습도, 염도, 오일 먼지 등에 의한 기기 영향 큼
 - ◆ 선박 운동성능에 따른 진동(vibration) 및 경사(roll, pitch, yaw) 영향이 큼

■ 선박의 배전 체계 특징(2)

- ▶ 배전체계 구성 시 고려 사항
 - ◆ 연속적인 전원 공급 (Continuous availability of power)
 - ◆ 고장/사고 대비 신뢰성 확보 (Redundancy under certain failures)
 - ◆ 인명 안전 (Safety to personnel)
 - ➔ 적절한 IP (Ingress Protection) 선정 필요

- ▶ 선박 크기와 목적에 따라 다양한 배전체계
 - ◆ 컨테이너선 : 화물 운반 장비
 - ◆ 탱커선 : 화물 펌프 및 컴프레서
 - ◆ 여객선 : 냉방 시설, 취사 시설, 호텔부하, 횡 방향 추진기(transverse thruster) 등
 - ◆ 군함 : 통합 전기추진시스템 및 무기체계 등

- ▶ 다양한 제재 기구에 의한 규제
 - ◆ SOLAS, 선주(Flag state), 항구(harbor authorities)

■ 선박의 배전 체계 구성

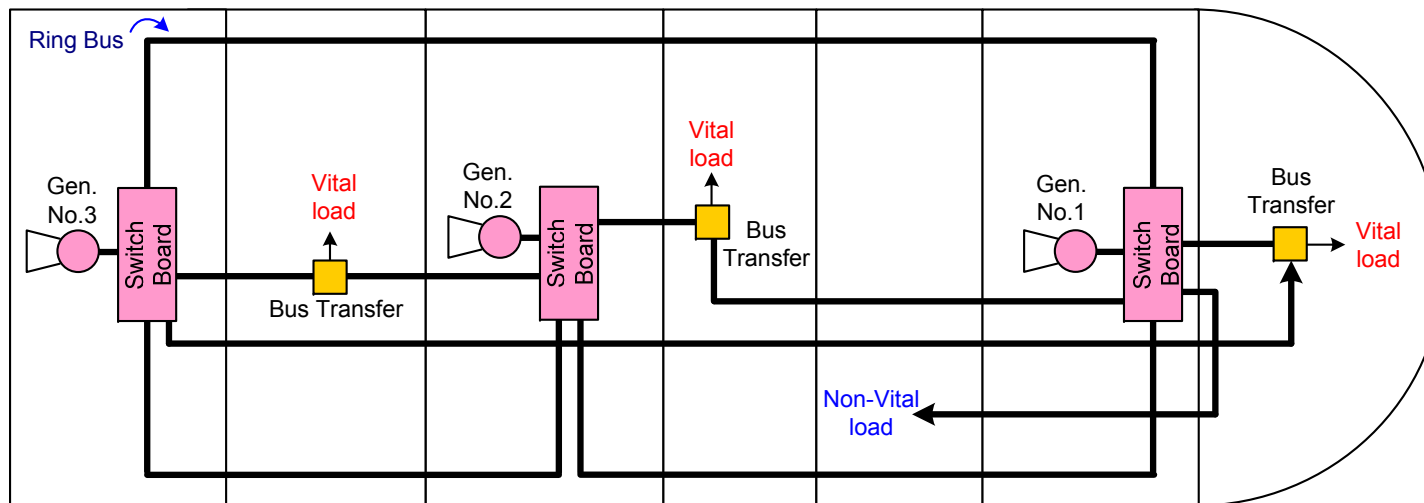
▶ 선박 배전체계의 구성 과정

- ◆ 추진방식의 결정 (Decision of the propulsion machinery type)
- ◆ 발전용량의 결정 (Maximum electrical power needed to be generated)
- ◆ 기존 동형모델(reference ship)을 참조하여 부하분석 수행
(Electric Load calculation based on reference ship's operating modes)
 - ➔ 건조과정 중 실제 부하율(MCR : Maximum Continuous Rating) 경신
- ◆ 발전기 크기와 개수 선정 (Generator size and numbers)
 - ➔ 연비/생존성 등을 고려한 최적의 조합 선정
- ◆ 주 전압과 주파수 선정 (Selection of main voltages and frequency)
- ◆ 사고전류 계산 (Short circuit calculation)
- ◆ 배전방식 선정 (Electric network selectivity)

■ 선박의 배전 방식(1)

▶ 교류 방사성 (AC-radial) 배전체계

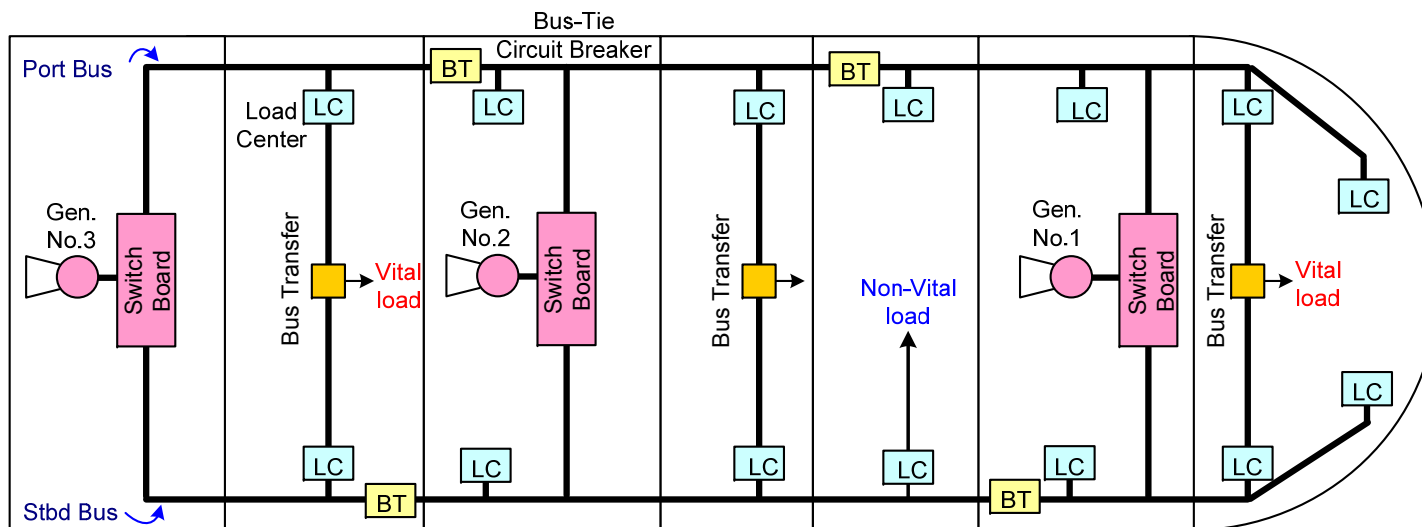
- ◆ 주 배전반에서 전력 분전반 및 개별부하에 직접공급
- ◆ 중요부하가 적은 단순한 계통
- ◆ 함 부하 증설 시, 전력 분전반(load center) 및 전선용량 증가로 고 비용 시스템
 - ➔ 최근 전력변환 기술의 발달로 전력 분전반을 전력변환 모듈로 대체



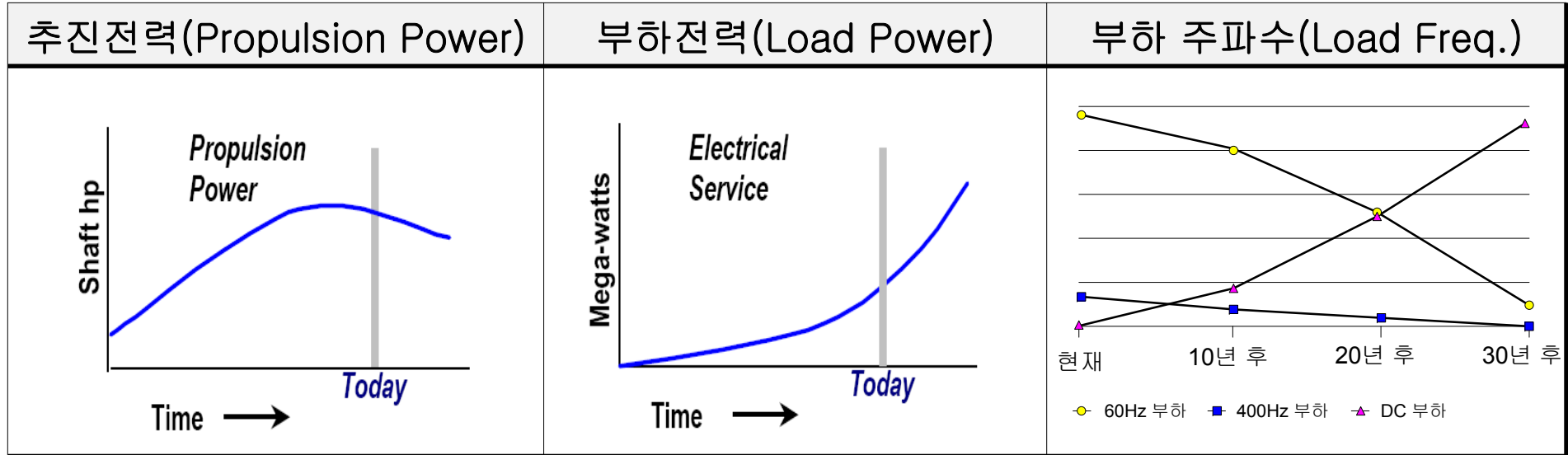
■ 선박의 배전 방식(2)

▶ 구역 (AC-zonal) 배전체계

- ◆ 좌/우현 모선 급전선(Bus Feeder)을 통한 구역(zone)별 전력 공급
 - ➔ 생존성 향상
- ◆ 계통이 복잡하고 중요부하가 많은 중/대형 선박에 적용
 - ➔ 계통의 단순화 및 다양한 통제
- ◆ 발전기 모선을 부하 집중반까지 확장시키는 분산배전방식
 - ➔ 비상 시, 함 생존성 보장을 위한 전기적/물리적 대책 강구 필요



■ 미래 전기추진선 전력변화 양상



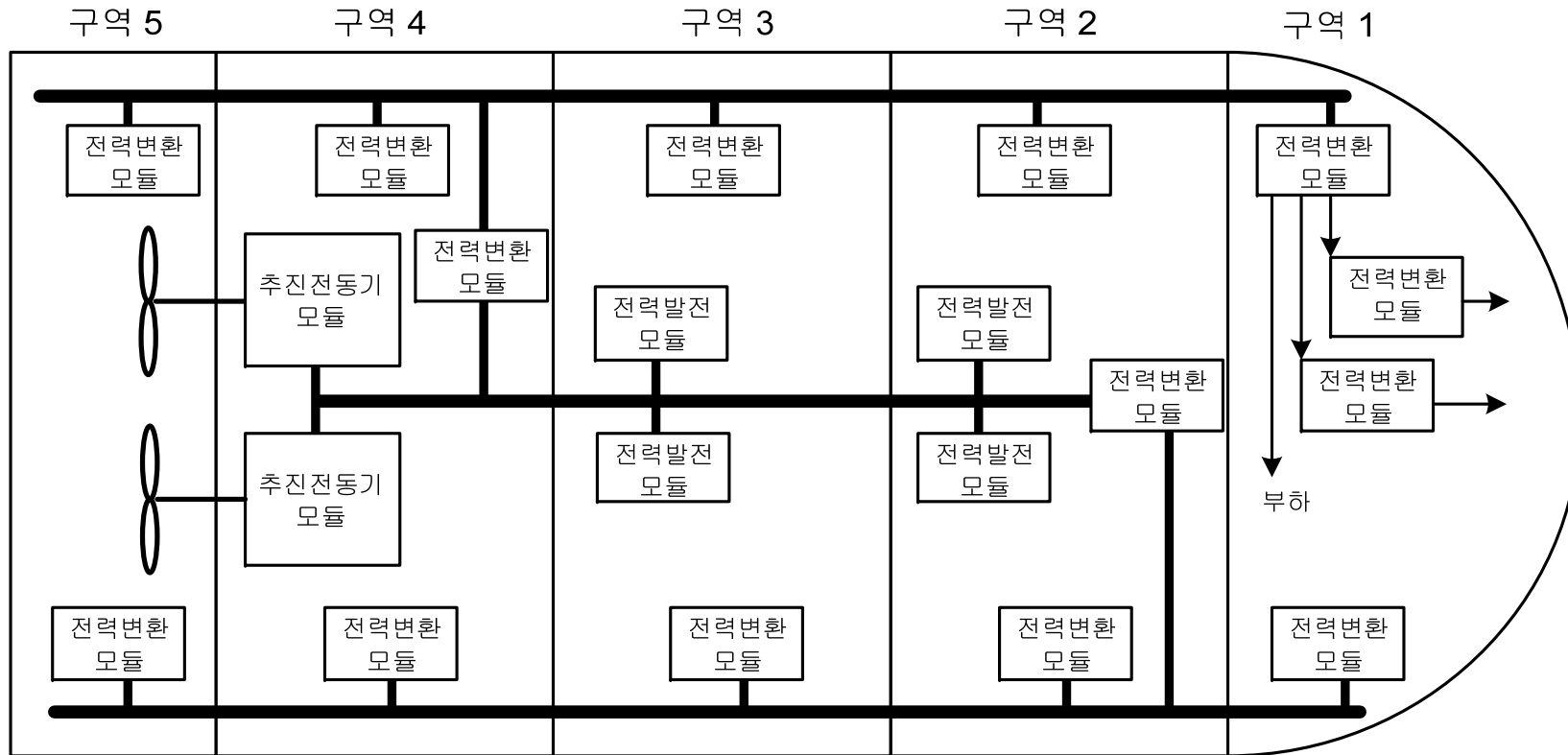
고전압 배전체계의 구현 (Medium Voltage Distribution System)

- 고전압 교류 배전체계(Medium Voltage AC Distribution System; MVAC)
 - 3.3kVac, 4.16kVac, 6.6kVac, 10.8kVac, 13.8kVac / 현재 대형 전기추진선 적용 시스템
- 고전압 직류 배전체계(Medium Voltage DC Distribution System; MVDC)
 - 3,000Vdc ~ 10,000Vdc / 전력변환기술의 발전에 따라 미래 전기추진선 적용 예상 시스템

■ 고전압(Medium Voltage) 배전체계 비교

구 분	Medium Voltage AC(MVAC)	Medium Voltage DC(MVDC)
개념도		
비 교	<ul style="list-style-type: none"> • 교류 모선 급전선(AC Bus Feeder) • 획일적으로 발전기 모선 교류전압을 전력 변환 후, 다양한 부하에 급전(bulk conversion) • 함정 부하변동에 따른 전력품질 영향 큼 • 시스템 중량 및 비용이 DC 보다 높음 <ul style="list-style-type: none"> -다수의 컨버터, 변압기, 스위치보드, 전선 등 	<ul style="list-style-type: none"> • 직류 모선 급전선(DC Bus Feeder) • 다양한 부하 특성에 적합한 급전 운영 가능 (DC, 60Hz, 400Hz) • 함정 부하변동에 따른 전력품질 영향 적음 • 시스템 중량 및 비용이 AC 보다 저렴 <ul style="list-style-type: none"> -전력변환장치 모듈이 저렴해질수록 더욱 경제적

■ 직류 구역 배전체계(DC-Zonal Electrical Distribution System; DCZED)



※ 전력 모듈 기능(Power Module Functions)

- 모듈별 발전시스템 연계, 다양한 크기의 직류전압 변환, 계통전력 품질의 효율적 제어 가능
- 함 생존성(survivability & redundancy) 향상 및 시스템 유지/보수 편이

■ 직류 구역 배전체계(DC-zonal electrical distribution system; DCZEDS) 연구 분야

▶ 연속적인 전력공급 확보 방안

- ◆ 함 생존성(survivability) 향상을 위한 직류 구역 배전체계의 배치
- ◆ 비상 시, 중요부하 작동의 신뢰성(redundancy) 확보를 위한 급전 운영방식
- ◆ 사고전류에 대한 진단 및 대책

▶ 효율적인 전력변환 장치의 개발

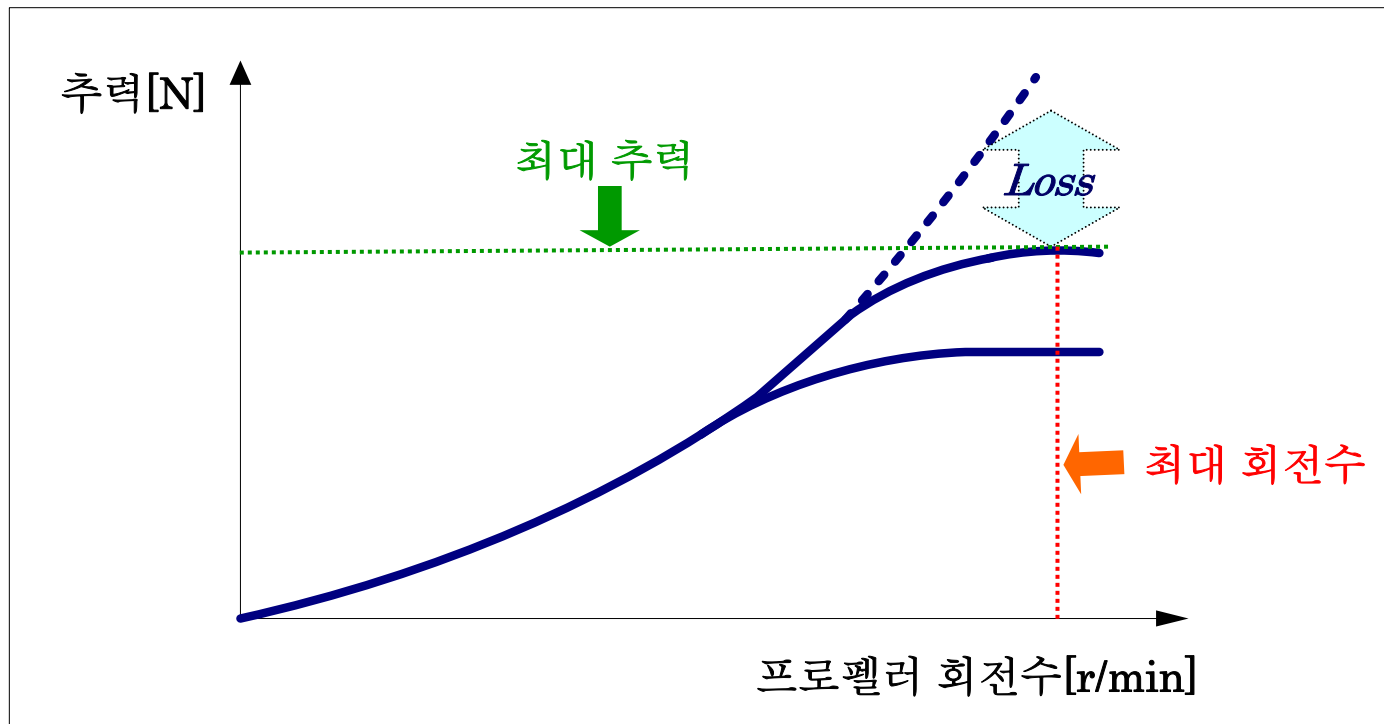
- ◆ 다양한 부하 요구전압에 고품질의 전력 공급 기술(MIL-STD-1399 300B)
- ◆ 새로운 부하 증설 시, 시스템 확장 가능성

▶ 국제규격에 부합하는 EMI/EMC 확보

- ◆ 직류 배전체계의 EMI/EMC 관련 규격과 평가 기술(MIL-STD-461F)
- ◆ 단위 부하별 전력품질 보장을 위한 전력제어 기술

■ 전기 추진선의 추력 손실(thrust loss) 제어(1)

- ▶ 고속 운항 시 캐비테이션(cavitation) 발생으로 인한 추력 감소
- ▶ 선박 운항 조건에 따라 추력 변동



S.Y.Kim, Y.D.Yoon, and S.K.Sul, "Suppression of the Thrust Loss for the Maximum Thrust Operation in the Electric Propulsion Ship", IEEE. Trans. Industry Applications, vol.45, pp. 756-762, Mar/Apr, 2009

■ 전기 추진선의 추력 손실(thrust loss) 제어(2)

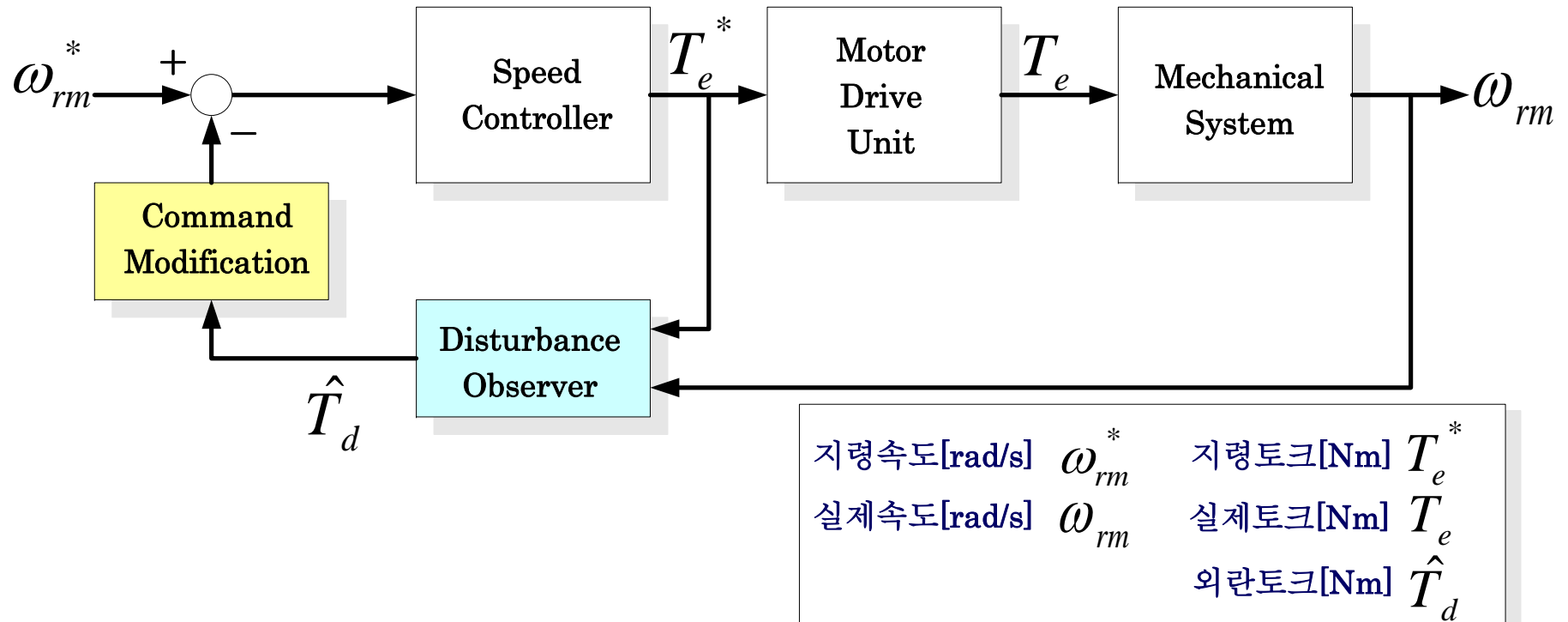
- ▶ 기계 시스템의 수학적 모델링
- ▶ 캐비테이션(cavitation) 발생 시 외란 토크 증가

$$T_e = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm} + A\omega_{rm}^2 - T_d$$

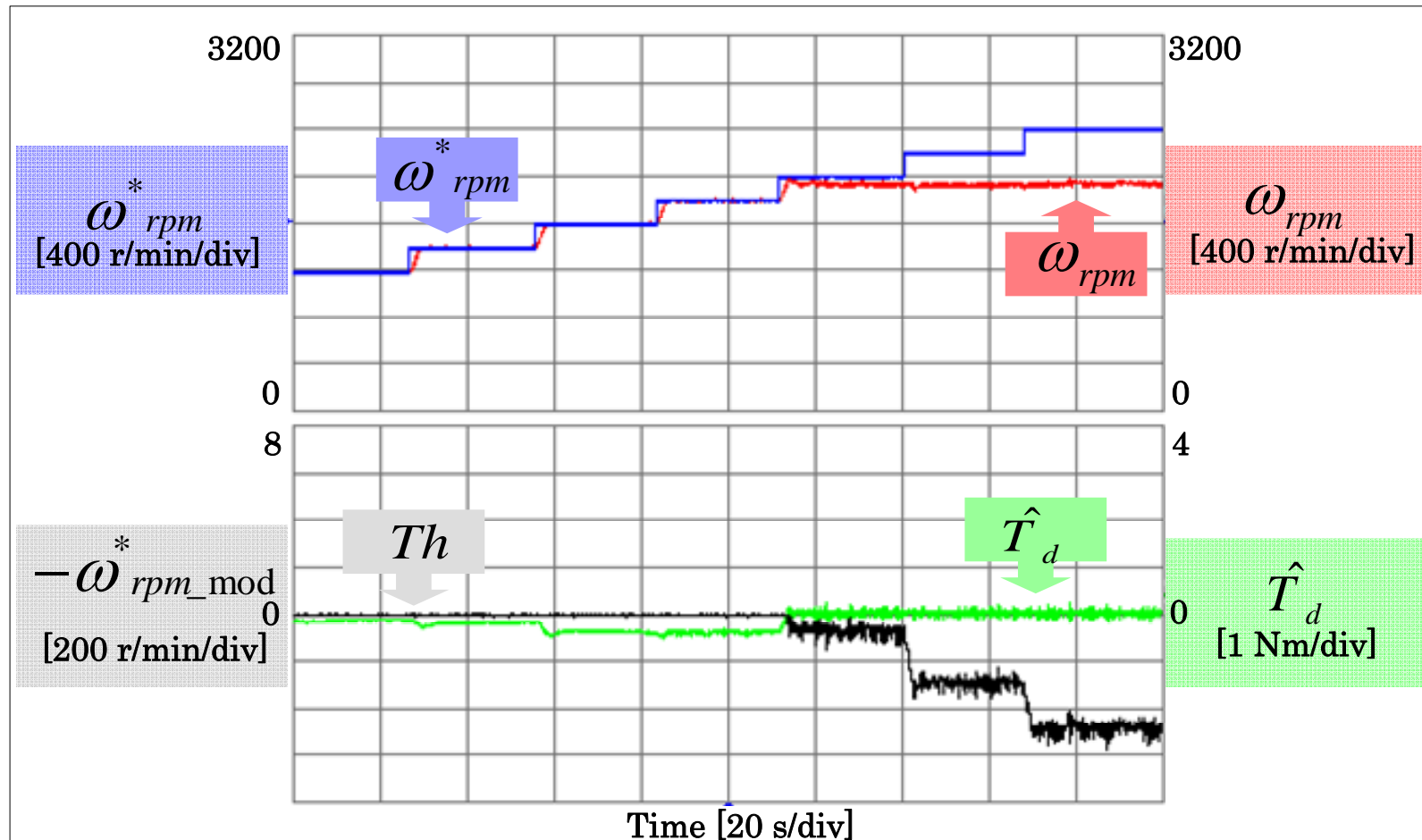
T_e	전동기의 출력 토크[Nm]
ω_{rm}	전동기의 회전속도[rad/s]
J	시스템의 등가 관성[kg-m ²]
B	시스템의 마찰 토크 계수[Nm/(rad/s)]
A	유체 이송에 필요한 토크 계수[Nm/(rad/s) ²]
T_d	시스템의 외란 토크[Nm]

■ 전기 추진선의 추력 손실(thrust loss) 제어(3)

- ▶ 부하 토크 추정(load torque estimation)을 통한 속도 지령 억제



■ 전기 추진선의 추력 손실(thrust loss) 제어(4)



■ 전기 추진선의 장점

- ▶ 시스템 단순화
- ▶ 생존성 / 신뢰성 향상
- ▶ 시스템 최적화를 통한 경제성 향상
- ▶ 소음 / 진동 감소

■ 전기 추진선의 추진 체계

- ▶ 모선의 고조파를 고려한 설계 방법 필요

■ 전기 추진선의 배전 체계

- ▶ 저압 교류에서 고압 직류 배전 체계로 발전
- ▶ 교류 방사성 배전 방식에서 직류 구역 배전 방식으로 발전

■ 전력전자 기술을 이용한 전동기 구동 기술 적용

- ▶ 캐비테이션 발생 억제를 통한 추력 손실 제어