다중펄스 드라이브에 의한 전기추진선박의 고조파 저감

김종수*

Harmonic Reduction of Electric Propulsion Ship by Multipulse Drive

Jong Su Kim*

요 약

전기추진선박에서 해결해야 할 중요한 문제점의 하나는 전력변환시에 발생되는 전류 및 전압파형에 포함된 고조파 성분에 의한 손실과 토크리플이다. 이를 제거하기 위해서 많은 방식들이 연구되고 있으며 본 논문에서는 상 천이 변압기를 갖는 다중펄스 드라이브를 사용하여 정류된 직류파형을 개선함으로서 전류 및 전압파형에 포함되는 고조파 성분을 감소시키는 방식을 사용하였다. 또한, 그 유효성을 입증하기 위해서 6펄스 및 12펄스 드라이브를 각각 전력변환장치로 사용하였으며 현재 대형 선박에서 사용중인 $6000[kW]$의 유도전동기를 추진전동기로 채택하여 시뮬레이션을 행하였다. 다중펄스 드라이브에 의한 고조파 저감은 발전기 출력측의 전류파형과 추진전동기 입력측의 전압 파형에 포함된 총고조파 왜형율을 평가하였으며 또한, 고조파에 의한 전동기측의 영향은 추진전동기의 토크리플을 측정하여 비교 분석 하였다.

Abstract

The harmonic distortion level may be significant in electric propulsion systems, as the main loads usually are variable speed propulsion/thruster drives. Distortion of currents and supply voltage waveforms may lead to: Increased power dissipation(losses) in equipment connected to the network, such as generators, motors, transformers, cables, etc., from the harmonic currents, may cause overheating and deterioration of the insulation, and reduced life time of the equipment. In this paper introduced the canceling method of harmonic currents by a multipulse drive with phase shifting transformer. The simulation results indicated a good speed response to the middle speed range of electric propulsion motor. And also, THD(total harmonic distortion) and torque ripple could be reduced in comparing the 12-pulse drive with 6-pulse drive.

키워드

고조파, 다중펄스, 상 천이, 추진전동기, 총 고조파 외형율, 토크리플

Key word

Harmonic, Multipusle, Phase shifting, Propulsion motor, THD(total harmonic distortion), Torque ripple

* 종신회원 : 한국해양대학교(jongskim@hhu.ac.kr)

접수일자 : 2010. 09. 13
심사완료일자 : 2010. 12. 06

Ⅰ. 서 론

전기추진선박은[1]-[2] 1920년대 처음 건조된 이후 꾸준히 증가되고 있는 추세이다. 전기추진선박은 많은 장점을 가지고 있으며 대표적인 것은 화물선적 공간의 증가, 운항비 감소, 진동 및 소음의 감소, 신뢰성 증가, 유용성 증가, 유지 및 보수의 편리성, 운용인력의 감소 및 오염물질 배출가스의 저감 등이 있으며 출력, 속도 및 토크를 유연하게 제어 할 수 있어 조정성과 제동능력이 뛰어나다.

하지만 전기추진시스템에서는 보완해야 할 단점도 가지고 있다. 전기추진시스템은 주파수 변환에 의해 토크 및 속도를 제어한다. 그러므로 주파수 변환을 위한 컨버터가 필요하다.[3]-[5] 컨버터는 AC의 발전기 출력을 DC로 변환한 후 다시 AC로 변환하는 과정에서 주파수 및 전압을 변환한다. 이러한 변환과정에서 전압 및 전류 파형에 고조파 성분이 포함되게 된다. 전압 및 전류 파형에 고조파가 포함되면 기관실의 부하기기, 전력케이블 뿐만 아니라 발전기 내 철손 및 동손의 증가에 의한 과열과 추진전동기의 토크리플 등의 피해를 발생 시킨다. 또한 최근 대형선박에서 사용하는 PWM 컨버터 드라이브[6]에서는 효율 개선을 위해 3300V-6600V의 고전압을 사용한다. 이러한 경우에 고조파의 영향은 더욱 크게 된다.[7]-[8]

전기추진시스템에서의 고조파에 의해 발생되는 문제점을 해결하기 위해 여러가지 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 전기추진시스템에 사용되는 변압기의 상 천이를 통한 다펄스화로 고조파를 저감하고자 하였으며[9] 그 유효성을 검증하기 위해 전력변환모듈에 6펄스와 12펄스를 발생시킬 수 있는 드라이브를 설치 하였다. 6펄스 및 12펄스 드라이브를 갖는 각각의 전력변환장치에 의해 출력된 전류파형에 포함된 고조파 성분이 부하기기 및 발전기에 미치는 영향을 발전기 출력측의 전류파형 및 추진전동기 입력측의 전압파형에 포함된 총 고조파 외형율과 추진전동기의 토크를 시뮬레이션을 통해 측정하고 비교분석하여 다펄스화의 고조파 저감성을 확인 하였다.

Ⅱ. 전기추진시스템

전기추진시스템은 3300[V] 또는 6600[V] 출력의 동기발전기의 발전기모듈(PGM), 주파수 변환을 위한 AC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터의 전력변환모듈(PCM), 구조가 간단하고 유지보수가 쉬우며 제어특성이 우수한 동기전동기 및 유도전동기가 주로 사용되는 추진전동기모듈(PMM) 및 속도 및 토크제어를 위해 직접토크제어(DTC)와 간접벡터제어(FOC) 방식이 많이 사용되는 전력제어모듈(PCON)로 구성된다.[8]] 다음의 그림 1은 전기추진시스템의 전체 구성도이다.

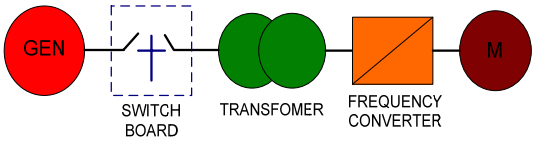


그림 1. 전기추진시스템의 구성도
Fig. 1 Schematics of electric propulsion system

전기추진시스템의 장점은 전부하 상태에서 전기추진시스템 각 부의 효율을 계산하면 통상적으로 발전기측이 0.95~0.97, 스위치보드 0.999, 변압기 0.99~0.995, 주파수컨버터 0.98~0.99, 전동기 0.95~0.97로서 우수한 효율 특성을 가짐을 알 수 있다.

Ⅲ. 고조파 특성

전기추진시스템에서 고조파 발생의 대표적인 원인은 다음과 같다. 먼저 전력변환장치에 의해 발생되는 고조파로서 2차 부하측의 DC 및 AC 변환시에 구형파가 전원으로 유입되어 발생한다. 또한, 변압기의 자화특성으로 변환전류의 위상차로 인해 여자전류내에 고조파가 함유되는 경우와 전압의 순시동요, 계통서지, 개폐기의 개폐등의 일시적인 전력의 과도현상 등에 의해서도 고조파가 발생하게 된다.

전력변환시에 왜형파의 전류 및 전압에 포함되는 고조파는 다음과 같은 특성을 가진다.

$$h = np \pm 1 \quad (1)$$

여기서, h : 고조파 차수
n : 정수
p : 주기 당 전류펄스의 수

또한, 기본파형에 정수배 되는 성분의 주파수들을 모두 합한 값과 기본파와의 비율을 나타낸 것을 총 고조파 외형율이라 하며 이 값을 통해 전류 및 전압파형의 양부를 판단하게 된다. 총 고조파 왜형율은 다음과 같이 계산된다.

$$I_{thd} = (\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} / I_1) \times 100 \quad (2)$$

$$V_{thd} = (\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} / V_1) \times 100 \quad (3)$$

전기추진시스템에서 고조파에 의한 영향은 전력케이블의 절연열화, 개폐장치의 고장과 철손, 동손의 증가에 의한 변압기의 과열, 추진전동기 및 피 전기기기의 과열, 발전기의 국부적 과열 등의 피해를 초래하게 된다. 다음 식은 고조파에 의한 각 기기에서의 대표적인 손실을 나타낸다.

$$P_{ec} = P_{ef} \sum_{h=1}^{hmax} I_h^2 h^2 \quad (4)$$

$$P_{ccl} = I_{ms}^2 R_w^2 \quad (5)$$

$$P_{cl} = I_{ms}^2 R_c^2 \quad (6)$$

단, P_{ec}:전체와류손,
P_{ef}:전부하 기본주파수에서의 와류손,
I_h:h고조파의 전류실효값, h:고조파수,
P_{ccl}:전체 동손, I_{ms}:전체 전류실효값,
R_w:권선저항, P_{cl}:케이블 동손,
R_c:케이블 저항

다음 표 1은 각 기관에서 규제하는 전압 및 전류 파형에 포함된 총 고조파 왜형율의 제한치를 나타낸다. 전압의 총 고조파 왜형율은 5~8[%] 이내로 규정하고 있으며 전류파형에 포함된 총 고조파 왜형율의 제한치는 IEEE-519에서 5[%]로 규정하고 있으며 타 기관에서도 규정화를 확대하고 있는 실정이다.

표 1. 각 표준 상호간의 정성 비교
Table 1. Qualitative comparison among standards

	STANAG 1008		GL	LRS	IEEE-519	IEC-60092
	Edition8	Edition9				
THD_V	5[%]	5[%]	8[%]	8[%]	5[%]	5[%]
THD_I	NO	?***	NO	NO	5[%]	?***

Ⅳ. 다중펄스 드라이브를 갖는 전력변환장치

전류 및 전압파형에 포함된 고조파에 의한 피해를 줄이기 위한 다양한 대책에는 필터 설치, 기기 자체의 고조파 내량 증가, PWM방식을 통한 전압 및 전류제어 방식의 사용 등이 있다.

본 논문에서는 전기추진선박의 추진시스템에서 발생되는 고조파의 영향을 저감하기 위한 방안으로 전력변환모듈에서의 다펄스화를 이용하였다. 전력변환과정에서 상 천이를 이용한 다펄스 발생 기법은 다중 입력 컨버터가 필요하며, 펄스수는 컨버터의 수에 의해 정해진다.

펄스 수 = 6 × 컨버터 내 6펄스 입력 정류기 수 (7)

다펄스화에 의해 고조파 제거가 이루어지게 되며 제거되는 고조파의 차수는 펄스 수에 비례하게 된다. 즉, 제거되는 고조파 차수는 펄스 수±1과 같으며, 12펄스 시스템에서는 12±1에 해당하는 차수의 고조파가 제거되는 경향을 가진다. 또한, 상 천이 기법에 의한 상의 천이 정도를 각으로 나타낼 수 있으며 컨버터의 수에 대한 함수로 결정된다. 다음 식은 천이되는 상의 정도를 나타낸 것이다.

상 천이각 = 60/컨버터의 수 (8)

12펄스 드라이브 시스템에서의 상 천이각은 60/2(컨버터수) = 30° 가 된다. 다음 그림은 12펄스를 발생하는 전력변환부이며 변압기의 결선이 1차측은 와이결선이며 2차측은 와이결선과 델타결선의 병렬로 연결하여 사용하게 된다. 그림 2는 상 천이 변압기를 갖는 전력변환모듈이다.

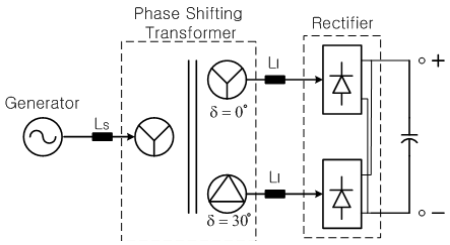


그림 2. 상 천이 변압기를 갖는 전력변환 모듈
Fig. 2 Power transfer module with phase shifting transformer

그림 2에서 3상의 전원이 변압기의 1차측 와이결선과 2차측 와이결선 및 정류기를 통해서 6개의 펄스가 출력되며, 변압기의 1차측 와이결선과 2차측의 델타결선 및 정류기를 통해서 6개의 펄스가 만들어진다. 이들 6펄스 각각의 펄스간 위상차는 30° 가 되며 또한, 변압기 2차측의 와이결선과 델타결선간의 위상차도 30° 이므로 전력변환모듈을 통한 출력 파형은 모두 30° 의 위상차를 갖는 12 펄스가 된다. 그림 2와 같은 상 천이 변압기를 갖는 전력변환모듈의 출력파형은 다음과 같다.

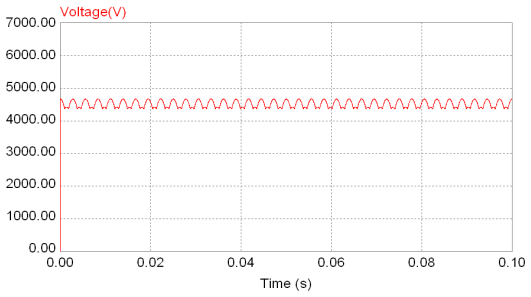
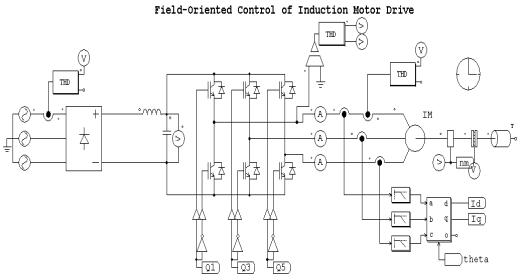


그림 3. 상 천이 변압기를 갖는 전력변환 모듈의 출력 전압 파형
Fig. 3 Output voltage wave of power transfer module with phase shifting transformer

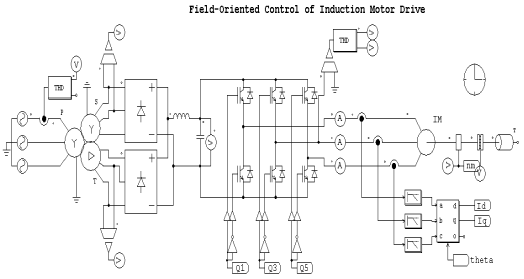
V. 시뮬레이션 결과

전기추진시스템에서 별도의 필터나 고조파 제거기법을 사용하지 않고 고조파를 저감할 수 있는 방식으로 상 천이 변압기를 갖는 전력변환장치가 적합하다고 판단되며 이 방식을 통한 전류 파형에 포함된 고조파 제거 정도의 유효성을 입증하기 위해 6펄스 및 12펄스에 의한 발전기모듈 출력측의 전류파형에 포함된 총 고조파 왜형율과 추진전동기의 토크를 시뮬레이션을 통해 비교 분석해 보았다.

시뮬레이션에 사용된 6펄스와 12펄스 드라이브를 사용하는 전기추진시스템의 구성도는 다음 그림과 같다. 본 논문의 시뮬레이션에서 속도 및 토크제어를 위해서 사용한 간접벡터제어방식의 구성도는 일반적인 사항이므로 간략화 하였다.



(a)



(b)

그림 4 전기추진시스템 블록도
(a) 6 펄스 드라이브 (b) 12 펄스 드라이브
Fig. 4 Block diagram of electric propulsion system
(a) 6 pulse drive (b) 12 pulse drive

현재 LNG운반선에 설치되어 운용중인 대형 유도전동기를 시뮬레이션에서 사용하였으며 각종 파라미터와 시스템 정수는 다음 표와 같다.

표 2 시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 파라미터 및 시스템 정수
Table 2 Parameters and system constants of induction motor used for simulation

정격출력	6000[kW]	L_s	1.49[mH]
정격전압	3300[V]	R_r	0.07[Ω]
정격전류	1200[A]	L_r	0.35[mH]
극수	6	L_m	48[mH]
R_s	0.0167[Ω]	J	169[kgm^2]

그림 5는 6펄스 드라이브의 추진시스템에서의 속도지령이 600[rpm]인 경우의 속도응답으로서 속도응답 특성은 우수함을 확인할 수 있다.

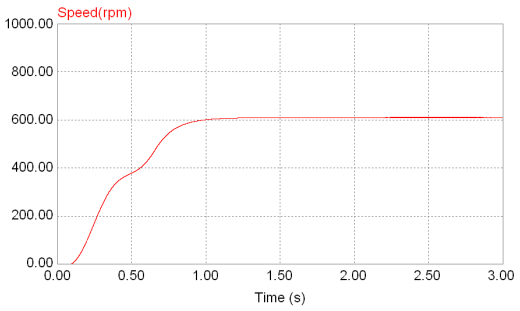
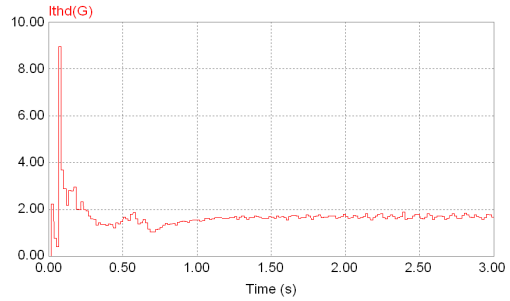
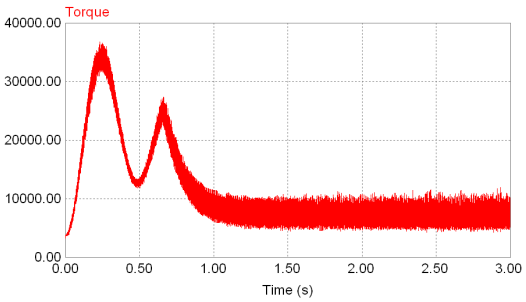


그림 5. 6펄스 드라이브 사용시 속도응답
Fig. 5 Simulation responses for step change of speed setting used 6 pulse drive(0→600[rpm])

그림 6 (a), (b)는 속도지령이 600[rpm]인 경우에 6펄스 드라이브가 설치된 전력변환장치를 갖는 추진시스템에서의 발전기 출력측의 전류 파형에 포함된 총 고조파 왜형율과 전동기의 토크파형을 나타낸다. 초기 기동시에 전류파형의 총고조파 왜형율이 최대 9[%]로 다소 크게 나타나고 있으며 토크리플 또한 기동 및 정상상태에서도 다소 큼을 알 수 있다.



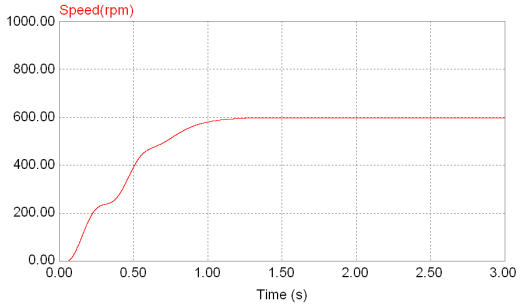
(a)



(b)

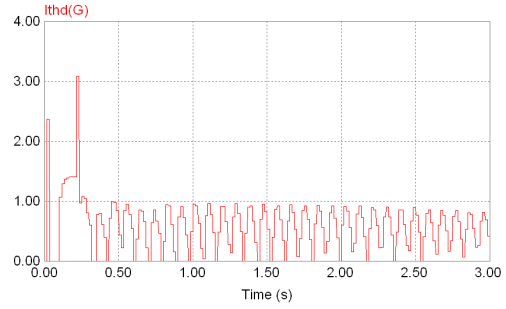
그림 6 6펄스 드라이브 사용시 THD 및 토크 응답
(a) 총 고조파 왜형율 (b) 토크
Fig. 6 Simulation results for THD and torque used 6 pulse drive
(a) THD (b) Torque

그림 7은 12펄스 드라이브를 갖는 전기 추진시스템에서의 추진전동기 속도지령이 600[rpm]인 경우에 대한 속도응답으로서 응답 특성이 우수함을 확인할 수 있다.

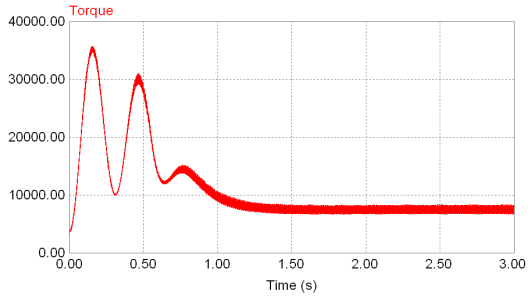


드림 7. 12펄스 드라이브 사용시 속도응답
Fig. 7 Simulation responses for step change of speed setting used 12 pulse drive(0→600[rpm])

그림 8 (a), (b)는 상 천이 변압기에 의해 컨버터의 출력이 12펄스를 갖는 추진시스템에서의 전동기 속도지령이 600[rpm]인 경우에 발전기 출력측의 전류 파형에 포함된 총 고조파 왜형율과 추진전동기의 토크특성을 나타낸다. 초기 기동시에도 총고조파 왜형율이 약 3[%] 이내로 낮으며 정상상태 운전시에는 1[%] 이내로 총 고조파 왜형율이 감소함을 볼 수 있다. 또한 전동기의 토크리플도 고조파 성분이 적게 포함되므로 6펄스 드라이브의 시뮬레이션 결과에 비해 현저히 작음을 알 수 있다.



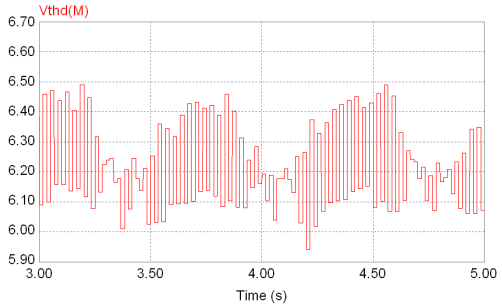
(a)



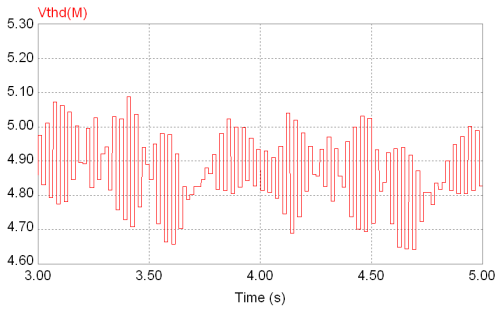
(b)

그림 8 12펄스 드라이브 사용시 THD 및 토크 응답
(a) 총 고조파 왜형율 (b) 토크
Fig. 8 Simulation results for THD and torque used 12 pulse drive
(a) THD (b) Torque

그림 9 (a), (b)는 추진전동기가 600[rpm]의 속도에서 중부하 운전시 전동기에 입력되는 전압파형에 포함된 총 고조파 왜형율을 나타낸다. 6펄스 드라이브 보다 12펄스 드라이브를 사용한 경우의 고조파 왜형율이 작음을 확인 할 수 있다.



(a)



(b)

그림 9 전압 파형의 THD
(a) 6 펄스 드라이브 (b) 펄스 드라이브
Fig. 9 Simulation results for THD of voltages
(a) 6 pulse drive (b) 12 pulse drive

VI. 결 론

대형 선박의 전기추진시스템 운용에 있어서 가장 큰 문제점으로 대두되고 있는 전류 및 전압파형에 포함된 고조파 성분의 제거를 위해서 본 논문에서는 보다 리플이 적은 직류파형을 얻을 수 있는 상 천이 변압기를 갖는 전력변환장치를 사용하였으며 그 유효성을 입증하기 위해 6펄스와 12펄스의 파형이 전력변환장치를 통해 출력될 때 가장 큰 영향을 받게 되는 발전기의 출력측 전류파형과 추진전동기 입력측의 전압파형에 포함되는 총 고조파 왜형율을 시뮬레이션을 통해 분석해 보았다 그 결과, 전부하 또는 중부하상태에서 추진전동기의 기동시나 정상상태 운전시에 6펄스의 경우에 비해 12펄스의 경우가 총 고조파 왜형율이 감소되는 개선효과를 확인할 수 있었다. 또한, 고조파의 영향을 받게 되는 토크리

플에 대한 비교분석 결과에서도 12펄스 드라이브를 사용할 경우에 6펄스에 비해서 현저히 토크리플이 작음을 입증할 수 있었다. 하지만 고조파의 발생 정도는 부하상태에 따라서 크게 차이를 보이는 경향이 있으므로 향후 연구에서는 추진전동기 운전시 부하상태의 변화가 큰 선박의 운항 조건에 따른 부하상태를 고려하여 전기추진시스템의 전력변환시스템에 포함되는 고조파의 분석이 필요하다고 하겠다.

참고문헌

[1] David Gritter, Swarm S. Kalsi, and Nancy Henderson, "Variable Speed Electric Drive Options for Electric Ships", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp. 347-354, 2005.

[2] 문양경, "LNG운반선 전기 추진 계통의 개요", 한국마린엔지니어링학회지 vol.31, No. 6, pp.16-28, 2007.

[3] N. Moham, T. M. Umdeland, et al., Power Electrics-Converters, Applications and Design, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, 2003.

[4] D. G. Holmes and T. A. Lipo, Pulse Width Modulation for Power Converters-Principle and Practice, IEEE Press/Wiley-Interscience, New York, 2003.

[5] BIN WU, High-Power Converters and AC Drives, IEEE Press/Wiley-Interscience, New York, 2006.

[6] E. A. Lewis, Power Converter Building Blocks for Multi-megawatt PWM VSI Drives, IEEE Seminar on PWM Medium Voltage Drives, pp. 4/1-4/19, 2000.

[7] 김종수, 오세진, 김성환, 김현수, 김덕기, 윤경국, "전기추진선박의 전력변환장치 성능 분석에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회지 제32권 8호, pp 190-196, 2008.

[8] 김종수, 오세진, "직접벡터제어방식을 사용하는 전기추진시스템의 고조파 제어", 한국해양정보통신학회지 제13권 12호, pp 2618-2624, 2009.

[9] W. A. Hill and C. D. Harbourt, Performance of Medium Voltage Multilevel Inverters, IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 2, pp. 1186-1192, 1999.

김종수(Jong-Su Kim)

한국해양대학교 기관시스템공학부 공학박사.
한국해양대학교 해사산업대학원 전임연구원.
한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 부교수.
※관심분야 : 전기기기 속도 및 토크제어, 전기추진시스템, 전력전자