
새로운 정류방식을 이용한 전기추진선박의 고조파 저감

김종수* · 최재혁** · 윤경국*** · 서동환****

Harmonic Reduction of Electric Propulsion Ship using New Rectification Scheme

Jong-Su Kim* · Jae-Hyuk Choi** · Kyoung-Kuk Yoon*** · Dong-Hoan Seo****

요 약

현재 대형선박에서 다이오드 정류기를 이용한 AC-DC 전력변환장치를 주로 사용하고 있으며 이는 총고조파왜형율을 줄이기 위하여 다중펄스를 출력할 수 있는 상치환변압기가 추가적으로 설치되어야 한다. 이 경우 상치환변압기의 설치로 인해 공간적, 경제적 손실이 발생한다. 본 논문에서는 LNG 운반선 등과 같은 대형선박에서 현재 운용중인 다이오드 정류기를 대신하여 SCR, IGBT 등의 소자를 이용하는 새로운 능동형 정류방식을 제안하여 저전압 전원의 이용이 가능하고 전력선 부하에 의해 발생하는 고조파 발생을 줄이며 또한, 기존의 방식에서 사용하는 상치환변압기를 제거하여 경제적인 이점도 얻고자 하였다. 현재 대형선박에서 운용중인 전기추진시스템에 제안한 시스템을 시뮬레이션 한 결과, 추진전동기 입력 전류 및 전압 파형에 포함된 총고조파왜형율이 개선됨을 나타내었다.

ABSTRACT

Currently, the AC-to-DC power conversion system using diode rectifiers is mainly used in large vessels. Also, to reduce the total harmonic distortion(THD) of current and voltage, this system requires an additional phase-shifting transformer which can be powered multi-pulses. In this case, due to the installation of the transformer, the spatial or economic loss occurs. This paper presents a novel active rectification scheme using silicon controlled rectifier(SCR) or insulated gate bipolar transistor(IGBT) devices on behalf of the diode rectifiers which are currently operating in large vessels such as LNG Carrier(LNGC). The proposed system can use the low voltage source and reduce current and voltage harmonics generated by nonlinear loads connected to the power distribution bus and save economic costs by removing the phase-shifting transformers which are used in conventional system. Computer simulations are performed under the electric propulsion system which is operating in current large vessel. The results are shown in support of the improvement of THD included in the current and voltage wave forms of propulsion motor.

키워드

전력변환장치, 총고조파왜형율, 상치환변압기, 다이오드 정류기, 능동형 정류방식

Key word

Power conversion system, Total harmonic distortion, Phase-shifting transformers, Diode rectifier, Active rectification scheme

* 종신회원 : 한국해양대학교 기관시스템공학부

접수일자 : 2012. 05. 14

** 정회원 : 한국해양대학교 기관시스템공학부

심사완료일자 : 2012. 06. 05

*** 정회원 : (주) 씨넷

**** 종신회원 : 한국해양대학교 전기전자공학부 (교신저자, dhseo@hhu.ac.kr)

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.10.2230>

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

1960년대부터 전형적인 LNG 운반선은 스탬터빈추진기를 사용하였다. 하지만 운송 중 버려지는 LNG 가스를 연료로 이용하는 DFE(Dual Fuel Engine)의 개발로 인해 LNG 운반선에 전기추진시스템이 주로 사용되게 되었다 [1][2]. 초기의 LNG 운반선의 전력시스템은 저전압 전력시스템이었으나 선박이 대형화 되고, 화물 이송장치, 재액화장치 및 추진전동기의 출력 증가로 인해 고전압의 전력시스템이 필요하게 되었다. 최근의 LNG 운반선의 고전압 전원은 3,300[V], 6,600[V] 및 11,000[V]가 사용되고 있다.

또한, 추가적인 전기추진시스템의 장치인 변압기, 정류기 및 주파수 변환장치의 용량과 대수도 증가하고 있다. 추진축계는 2대의 추진전동기와 기어박스를 이용하는 형태와 추진전동기와 프로펠러를 직접 연결하는 방식이 이용되고 있다.

미래 선박의 추진시스템은 전기추진시스템으로 발전할 수밖에 없는 여러 가지 상황에 직면해 있으며 전기추진시스템의 개발 기술 또한 비약적으로 발전하고 있는 실정이다.

전기추진시스템에서의 전기적인 문제점 중에서 가장 큰 관심사는 전력변환장치에서의 전력 소비와 고조파에 의한 각 장치의 악영향이며 전력변환장치 규모의 대형화에 따른 부피 및 건조비용의 증가이다 [3][4][5]. 이러한 관점에서 본 논문에서는 고조파의 저감 효과와 대규모의 전력변환장치 제거를 통해 추진시스템의 구성, 공간 및 경제적인 측면의 효율성과 고조파 저감효과와 기술적 측면의 이점을 얻고자 하였다.

대전압을 사용하는 기존의 LNG 운반선에서 고조파 저감 대책으로 사용하는 상치환변압기를 제거하고도 고조파 저감 효과를 얻을 수 있으며, 발전기 출력의 교류 전원을 스위칭이 가능한 전력용 소자와 제어를 통해 능동적으로 직류 전원으로 변환하는 컨버터를 사용하여 전력변환장치를 구성하였다. 그 효율성은 기존의 상치환변압기와 다이오드 정류기를 사용하는 컨버터로 구성된 전력변환장치를 사용하는 전기추진시스템과 제안된 전기추진시스템을 전력시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다.

II. 전기추진시스템의 고조파

전기추진시스템에서 고조파는 선박의 가변속도에 의한 주파수 변환장치에서 컨버팅과 인버팅 시에 이상적인 직류성분의 정류와 정현파의 인버터 출력이 이루어지지 못하는 이유와 스위칭 때문에 전력변환장치에서 가장 크게 발생한다.[4]-[5] 주파수 변환장치에 의해 발생하는 고조파는 다음과 같은 특성을 가진다.

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

여기서, h : 고조파 차수

n : 정수

p : 주기 당 전류펄스의 수

또한, 입력전류 및 전압의 기본파형의 크기에 대한 고조파 성분들의 총 합을의 비율로 표현이 되는 총고조파왜형율의 크기로 전류 및 전압파형의 양부를 판단하게 된다. 총고조파왜형율은 다음과 같이 계산된다.

$$X_{thd} = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_h^2} / X_1 \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, X_{thd} : 총고조파왜형율

X_h : n 차 고조파 성분

X_1 : 기본파 성분

전기추진시스템에서 고조파는 여러가지 요인에 의해 발생하게 되지만 선박 부하에 대한 추진전동기의 속도 및 토크 추종시에 주파수변환이 이루어지는 전력변환장치에 의해 주로 생성된다. 현재 총고조파왜형율에 대한 제한은 IEEE 519- 1992, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 등에서 5[%] 이하로 정하고 있다.

III. LNG 운반선의 전기추진시스템

LNG 운반선의 전기추진시스템은 주로 이중 연료를 사용하며 3,300[V] 또는 6,600[V]의 출력을 발생시키는 발전기모듈, 고조파 저감을 위한 12펄스 및 24펄스 발생을 위한 상치환변압기모듈[3], 다이오드 정류기를 사용

하여 직류전원으로 변환 후 추진전동기의 토크 및 속도 제어를 위한 교류전원으로 변환되는 AC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터의 전력변환모듈, 구조가 간단하고 토크 및 속도제어특성이 우수한 동기전동기 및 유도전동기가 주로 사용되는 추진전동기모듈로 구성된다. 또한, 속도 및 토크제어를 위한 제어알고리즘은 직접토크제어 방식이 주로 사용되고 있다. 그림 1은 LNGC의 전기추진 시스템이다.

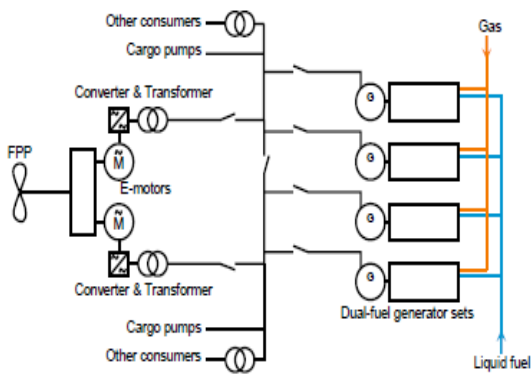


그림 1. LNGC의 전기추진시스템
Fig. 1 Electric propulsion system of LNGC

LNG 운반선의 일반적인 전력변환장치는 입력전원을 직류성분으로 변환하기 위해서 다이오드를 이용한 정류기와 평형용 캐패시터, 가변 전압 및 주파수 출력을 위해 트랜지스터나 사이리스터로 구성된 PWM인버터로 구성된다.

또한, 다이오드를 이용한 정류기의 단점인 고조파 저감을 위해 상치환변압기가 추가로 설치된다. 그림 2는 현재 대형선박의 전기추진시스템으로 주로 사용하는 전력변환장치의 계통도이다.

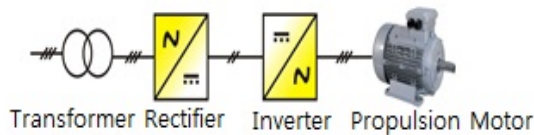


그림 2. 전력변환시스템의 구성도
Fig. 2 Schematics of power conversion system

IV. 새로운 정류방식을 사용하는 전력변환장치

다이오드를 사용하는 정류기가 장착된 전력변환장치에서는 상치환변압기를 사용하여 정류기 출력 파형을 12펄스, 18펄스 및 24펄스로 출력함으로써 보다 직류성분에 가까운 정류를 통해 고조파를 제거한다. 현재 운용중인 LNG 운반선의 경우도 12펄스 및 24펄스 출력을 위한 상치환변압기가 설치되어 사용하고 있다.

반면에 제한한 SCR, IGBT 등의 소자를 사용하고 제어기를 통하여 지령속도 및 부하에 따라 변하는 전압을 기준값과 비교하여 능동적으로 컨버팅 행하는 방식은 정류 출력을 개선하고 추진기 입력전류가 완전한 정현파의 형태가 되어 총고조파왜형율이 매우 작게 되는 특성을 가질 뿐만 아니라 690[V]의 저전압 전원의 사용이 가능하게 되어 전력계통간의 전기적 안전성도 높여준다. 초기 비용이 증가되는 면은 있지만 상치환변압기를 설치하지 않게 되어 그 만큼의 공간과 비용이 감소하게 되므로 큰 장점을 기대할 수 있다. 그리고 전력 회생을 통해 전력 비용을 절약할 수 있게 된다는 점을 고려할 경우 더욱 경제적인 방법이 될 수 있다고 본다. 그림 3은 새로운 정류방식을 사용하는 전력변환장치의 부분 구성도로서 정류기 입력전압 제어기와 IGBT 소자를 이용한 능동형 정류기를 보여준다.

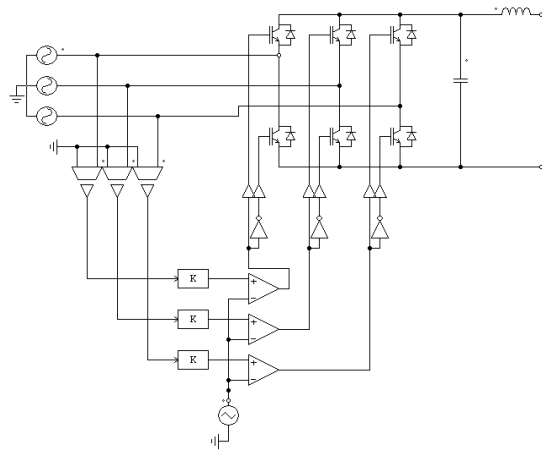


그림 3. 새로운 정류방식
Fig. 3 Rectifier of new method

V. 다이오드 정류기와 능동형 소자를 이용한 정류기의 사용 시 특성 비교 분석

다이오드를 사용한 정류기는 고조파 저감을 위한 상치환 변압기가 4대 설치되는 것이 일반적이며 별도의 공간도 필요하게 된다. 대용량 고압변압기의 경우에 있어서 가격도 고가이다. 162,000[cbm]의 LNG 운반선에 설치되는 상치환변압기의 부피, 중량 및 가격을 표 1에 나타내었다.

표 1. LNGC의 데이터
Table. 1 Data of LNGC

구분	내용
LNGC 크기	162,000[cbm]
변압기 부피	4,200(L)×2,000(B)×2,810(H)[mm]
변압기 중량	12,000[kg]
설치 대수	4[sets]
가격(1set)	\$100,000

하지만 능동형 소자를 이용하는 전력변환장치의 경우는 상치환변압기가 필요하지 않으므로 표 1에 나타난 사항들이 필요하지 않으므로 공간적인면과 경제적인면에서 상대적으로 큰 이점을 갖게 된다. 발전기 출력도 690[V]의 저전압을 이용하므로 전기적인 안전성을 확보할 수 있다.

본 논문에서는 상치환변압기를 사용하는 기존 방식에 비해 부피 및 경제적인 측면의 장점과 고조파 저감의 기술적 효과를 가지고 있는 IGBT 소자를 이용한 능동형 정류기를 사용하는 전력변환장치를 현재 운용중인 대형 LNG 운반선에 적용하여 추진전동기의 입력전류 및 전압에 포함된 총고조파왜형율과 출력토크 특성을 시뮬레이션을 통해 분석함으로써 대형선박에서의 새로운 전력변환장치의 사용에 대한 효율성과 타당성을 검증해 보고자 하였다.

다이오드 정류기를 사용하는 시스템에서는 3,300[V]의 발전기 출력 전압을 상치환변압기를 통해 변압한 후 다이오드 정류기를 통해 12펄스의 출력을 인버터를 통해 추진전동기에 입력한다. 그림 4는 다이오드 정류기를 사용하는 전력변환장치의 시뮬레이션을 위한 회로도이다. 새로운 방식은 상치환변압기를 사용하지 않

며, 발전기 출력도 690[V]의 저전압을 통해 추진전동기를 구동하는 시스템이다. 그림 5는 시뮬레이션을 위한 회로도이다. 실선에서는 상치환변압기를 12펄스 출력을 위해서는 2대, 24펄스 출력을 위해서는 4대가 필요하다.

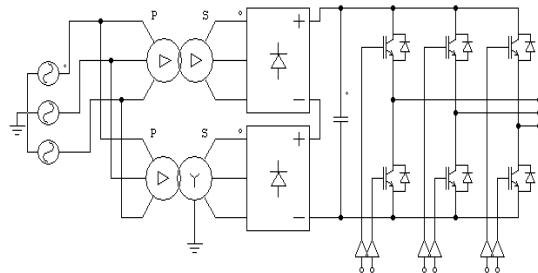


그림 4. 다이오드 정류기를 사용하는 전력변환시스템
Fig. 4 Power conversion system using diode rectifier

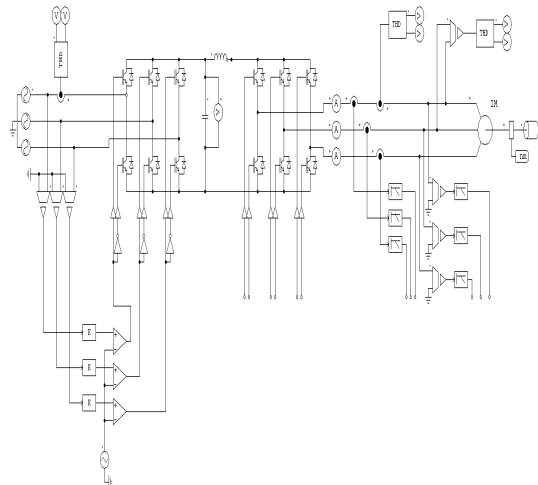


그림 5. 새로운 정류방식을 사용한 전기추진시스템
Fig. 5 Electric propulsion system using new rectification method

시뮬레이션을 위한 선박의 전기추진시스템은 대형 유도전동기를 추진전동기로 사용하는 LNG 운반선을 대상으로 하였으며 시뮬레이션에서 사용한 추진전동기의 각종 파라미터와 시스템 정수는 다음 표와 같다.

표 2. 시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 파라미터와 시정수

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]

추진전동기 토크 및 속도제어를 위한 제어기법은 대형 전기추진선박에서 현재 주로 사용하고 있는 직접벡터제어방식을 사용하였으며 추진전동기의 속도는 200[rpm]으로 설정하였다.

그림 6과 그림 7은 다이오드 정류기를 사용한 경우의 추진전동기 속도응답과 출력토크 특성으로서 속도응답은 양호하나 토크의 변동은 다소 큼을 알 수 있다.

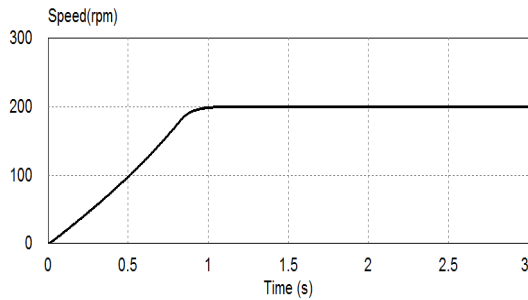


그림 6. 속도응답 시뮬레이션
Fig. 6 Simulation responses for speed setting

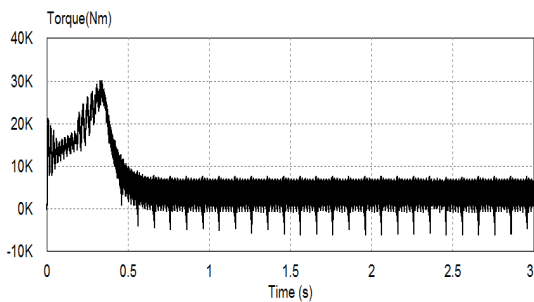


그림 7. 토크응답 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation responses for torque

그림 8과 그림 9는 전동기 입력 전류 및 전압파형의 총고조파왜형율이다. 전류파형에 대한 총고조파왜형율은 5[%] 이하로서 규제치를 만족함을 알 수 있다. 하지만 전압의 총고조파왜형율은 7[%] 정도로서 규제치를 만족하지 못하는 것을 알 수 있다.

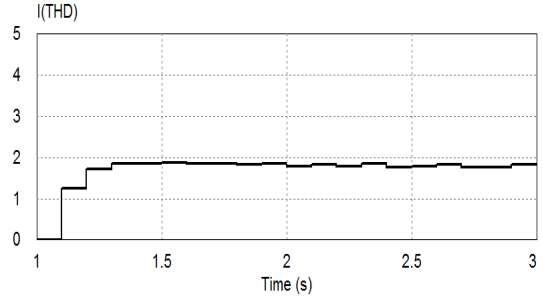


그림 8. 전류의 총고조파왜형율
Fig. 8 Simulation results for THD of current

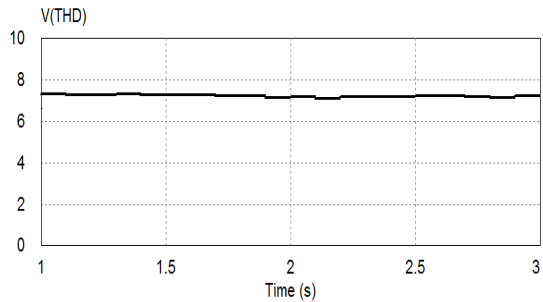


그림 9. 전압의 총고조파왜형율
Fig. 9 Simulation results for THD of voltage

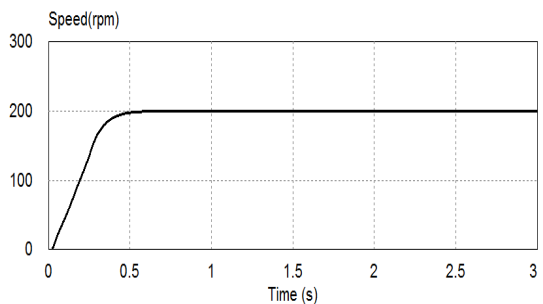


그림 10. 새로운 정류방식을 사용하는 경우의 속도응답
Fig. 10 Simulation responses for speed setting using new rectification scheme

그림 10과 그림 11은 새로운 정류방식을 사용하는 경우의 추진전동기 속도응답과 출력토크 결과이며 응답특성이 양호함을 알 수 있다. 그림 12와 그림 13은 추진전동기 입력 전류 및 전압파형의 총고조파왜형율로서 모두 규제치인 5[%] 이하를 만족하고 있음을 알 수 있다.

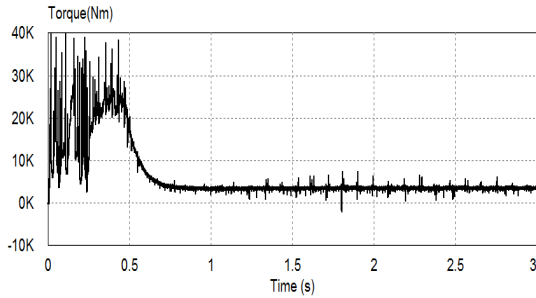


그림 11. 새로운 정류방식을 사용하는 경우의 토크응답
Fig. 11 Simulation responses for torque using new rectification scheme

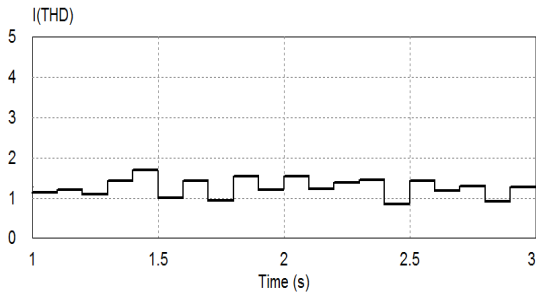


그림 12. 전류의 총고조파왜형율
Fig. 12 Simulation results for THD of current

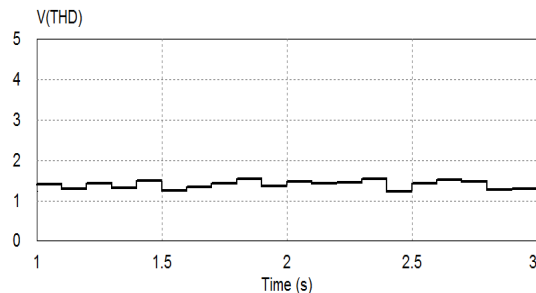


그림 13. 전압의 총고조파왜형율
Fig. 13 Simulation results for THD of voltage

VI. 결 론

근래의 전기추진시스템은 다이오드를 사용하는 정류기를 포함한 전력변환장치를 주로 사용하고 있으며 전력변환과정에서 발생하는 고조파를 저감하기 위한 방법으로 상치환변압기를 사용하여 정류기의 출력을 다중펄스로 출력 한다. 그로인해 대형 선박에 있어서는 상치환변압기의 사용 대수와 부피 및 비용면측면에 있어서 그 손실 정도를 고려하지 않을 수 없다.

본 논문에서는 상치환변압기의 사용으로 인한 단점을 보완하기 위한 방법으로 SCR, IGBT 소자를 사용하는 능동형 정류방식을 이용하여 선박의 부하토크 변화에 의해 변동하는 전압을 제어하는 새로운 정류방식을 대형 LNG 운반선의 전력변환장치에 적용하여 고조파 저감효과에 대한 기술적 타당성을 분석하였다.

유효성은 제안된 방식과 기존의 LNG 운반선에서 사용중인 추진시스템을 전력시뮬레이션 전용 프로그램인 PSIM을 이용하여 분석하였다. 속도응답 특성, 출력토크 특성, 추진전동기 입력 전류 및 전압파형의 총고조파왜형율의 크기를 비교 분석한 결과에서 기존의 방식에 비해 출력토크 특성과 추진기 입력 전류 및 전압파형의 총고조파왜형율이 새로운 정류방식을 사용한 경우가 보다 우수함을 확인할 수 있었다. 저전압을 전원으로 이용함으로써 전기적인 안전성도 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 분석을 종합한 결과 공간 및 경제적인 장점과 더불어 기술적인 측면인 고조파 저감효과에 있어서도 우수한 새로운 정류방식을 사용하는 전력변환장치의 대형선박 적용은 그 타당성과 유효성이 충분하다고 판단 된다.

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] F.C. Lee, P. Barbosa, "The state of the art power electronics technologies and future trends", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES, Vol. 2, pp. 1188-1193,

- 2001.
- [3] BIN WU, "High-Power Converters and AC Drives", IEEE Press/Wiley-Interscience, New York, 2006.
 - [4] S. Bernet, "Recent developments of high power converters for industry and traction applications", IEEE Trans. on Power Electron, Vol. 15, pp. 1102-1117, Nov., 2000.
 - [5] Derk A. Paice, "Power Electronic Converter Harmonics-Multipulse Methods for Clean Power", IEEE Press, 1996; ISBN 0-7803-1137-X.



서동환(Dong-Hoan Seo)

1999년 경북대학교
전자공학과(공학석사)
2003년 경북대학교
전자공학과(공학박사)

2004년~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수
※관심분야: 전기전자제어, 신호처리, 패턴인식

저자소개



김종수(Jong-Su Kim)

1998년 한국해양대학교
기관공학과(공학석사)
2002년 한국해양대학교
기관공학과(공학박사)

2005년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수
※관심분야: 전동기속도제어, 전력변환, 전기추진



최재혁(Jae-Hyuk Choi)

2000년 한국해양대학교
기관공학과(공학석사)
2005년 일본북해도대학교
기계우주학과(공학박사)

2009년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수
※관심분야: 전기추진, 신호처리, 전력제어



윤경국(Kyoung-Kuk Yoon)

1997년 한국해양대학교
기관공학과(공학석사)
2010년 한국해양대학교
기관시스템공학과(공학박사)

2012년~현재 (주)씨넷 기술이사
※관심분야: 전동기제어, 전력제어, 전력변환