

전기 추진선박의 전력변환장치 성능 분석에 관한 연구

김종수† · 오세진** · 김성환** · 김현수*** · 김덕기**** · 윤경국****
(원고접수일 : 2008년 9월 8일, 원고수정일 : 2008년 11월 12일, 심사완료일 : 2008년 11월 21일)

A Study on the Performance Analysis for Power Converters of Electric Propulsion Ship

Jong-Su Kim† · Sae-Gin Oh** · Sung-Hwan Kim** · Hyun-Soo Kim*** ·
Deok-Ki Kim**** · Kyoung-Kuk Yoon****

Abstract : Electric propulsion motors are operated from a variable frequency drive, which supplies power to motors at a frequency appropriate to the desired speed. The objective of this study was to evaluate power converters for shipboard applications and to recommend converters that meet lower harmonic distortion levels and torque ripples. Two systems were studied in detail : Cyclo-converters and PWM-converters. Cyclo-converters are the obvious choice where size, weight and efficiency are the most critical issues. However they have a disadvantage in power factor and they produce severe torque ripples in the motor which makes them unacceptable without special systems. PWM-converters produces better motor current waveform and eliminates common mode voltage issues at the motor, but suffers a multiple stages of power conversion and the isolating transformer. Results of this case study show that PWM-converters are more advanced and efficient drives for induction motor of electric propulsion ship.

Key words : Electric propulsion ship(전기 추진선박), Power converters(전력변환기), Harmonic distortion(고조파 왜곡), Torque ripple(토크 변동), Cycloconverter(싸이클로컨버터), PWM-converetr(PWM컨버터), Induction motor(유도전동기)

1. 서 론

최근에 대형 LNG선박에서 기존의 디젤기관 대신에 전기 추진시스템이 많이 적용되고 있다^{[1]-[3]}.

전기 추진시스템의 가장 큰 장점은 연료비 절감을 통한 효율의 향상이며 이외에도 설치전력의 감소와 추진기로 전동기를 사용함으로써 저속에서의 속도 및 토크 제어 성능이 뛰어나다. 하지만 전기

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학과, E-mail:jongskim@hhu.ac.kr, Tel:051)410-4831)
** 한국해양대학교
*** 목포해양대학교
**** 한국해양대학교 대학원

추진시스템에서 해결해야 할 사항이 있는데 이는 전력변환장치에서의 스위칭에 의한 고조파 발생이다. 고조파 발생은 전력계통과 제어장비 및 주변기에 좋지 않은 영향을 미친다^{[6]-[8]}.

본 논문에서는 전기 추진시스템에서 추진전동기의 속도 및 토크 제어를 위한 전력변환장치의 전기적 특성에 대하여 고찰하고자 한다.

기존의 전기 추진시스템에 가장 많이 사용되었던 사이클로컨버터와 근래에 추진전동기로 제안되고 있는 유도전동기의 전력변환장치로 적합한 PWM 컨버터의 성능을 분석하였다^{[4]-[5]}.

성능 분석은 두 컨버터에 의한 추진전동기의 토크리플과 컨버터 출력 전류에 포함된 고조파의 총 왜형률을 통하여 비교 분석하였다. 결론적으로 사이클로컨버터에 비하여 PWM컨버터의 성능이 토크리플과 고조파 발생도 측면에서 우수하므로 최근에 전기 추진시스템에 사용이 제안되고 있는 유도전동기의 전력변환장치로 보다 적합함을 알 수 있었다^{[4],[6]-[8]}.

2. 선박의 전기추진 시스템

2.1 전기추진시스템의 특성

기존의 디젤엔진 추진방식에 비해 전기 추진시스템은 선박의 설계, 기관의 배치, 진동 및 소음의 감소, 신뢰성 증가, 유용성 증가, 유지 및 보수의 편리성 등에서 장점을 가지고 있다.

또한, 전기 추진시스템은 출력, 속도 및 토크를 유연하게 제어 할 수 있어 조정성과 제동능력이 디젤기관에 비해 우수하며 특히 저속에서의 운전 특성이 뛰어난 성능을 보인다^{[3],[4]}.

Fig. 1은 주파수 변환 컨버터를 사용하는 전기 추진시스템의 블록도이다.

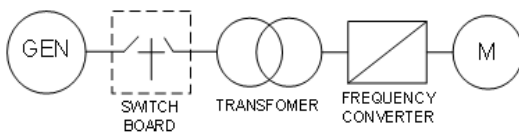


Fig. 1 Block diagram of electric propulsion system

Fig. 2와 Fig. 3은 현재 선박에서 적용되고 있는 전기 추진시스템인 중속(650[rpm])의 전동기를 기어박스에 연결하여 원하는 추력을 얻는 구조와 저속(50 ~ 100 [rpm])의 전동기를 프로펠러와 직접 연결하여 추력을 얻는 구조를 보여주고 있다^{[3],[4]}.

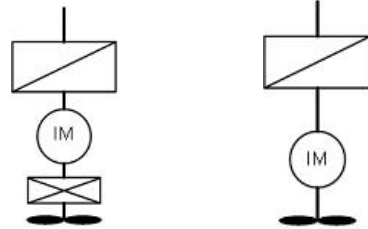


Fig. 2 Geared shaft line Fig. 3 Gearless shaft line

본 논문에서는 Fig. 3과 같이 추진전동기를 프로펠러에 직접 연결하는 전기 추진시스템에 사용되는 고휘력(6,000[kW]), 저속(50 ~ 100[rpm]) 유도전동기를 대상으로 하였다.

전기 추진시스템이 가지고 있는 문제점은 추진전동기의 속도 및 토크 제어를 위해 전압, 전류의 제어장치 및 전력변환장치의 스위칭에 의한 고조파 발생으로 비선형 부하가 증가되어 전원측으로 많은 고조파 전류가 유출되어 이 전류와 전원측 임피던스에 의한 전압 외형이 발생하여 전력계통에 좋지 않은 영향을 미친다^{[6],[7]}.

2.2 추진전동기

전기 추진시스템에서 추진 전동기는 동기전동기가 주로 사용되어 왔다. 동기전동기는 구동이 비교적 쉽고 소음이 작은 장점을 가지고 있으나 발생 토크가 작고 고휘력이 어려우며 회전자 구성을 위한 구조가 복잡하다.

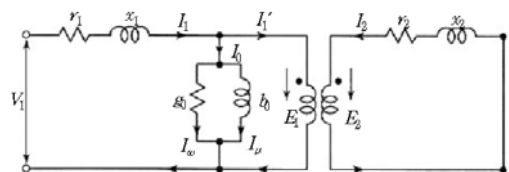


Fig. 4 Equivalent circuit of induction motor

또한, 기동을 위한 별도의 구동시스템이 설치되어야 하는 단점이 있다. 이러한 동기전동기의 한계 때문에 최근에는 동기전동기와 달리 여자기와 회전정류기가 필요없는 간단한 구조를 가지고 있어서 유지 및 보수가 용이하며 발생 토크가 큰 장점을 가진 유도전동기가 사용되고 있다^[4]. Fig. 4는 유도전동기의 등가회로도이다.

3. 싸이클로컨버터와 PWM컨버터

기어박스가 필요 없이 샤프트와 프로펠러를 직접 연결하는 추진시스템에 사용되는 고출력, 저속 추진전동기의 속도 및 토크 제어를 위해서는 전력변환장치로서 주파수 변환 컨버터가 사용된다. 기존의 동기전동기를 추진전동기로 사용 시에는 싸이클로컨버터를 주로 이용하였으나 최근에는 유도전동기를 사용함에 따라 제어 성능이 우수한 PWM 컨버터의 사용이 늘어나고 있다^{[4],[5]}.

하지만 주파수 컨버터는 고조파 발생의 원인이 되는 장치이며 추진전동기 뿐만 아니라 제어장치 및 전력계통에 영향을 미치므로 적정한 주파수 컨버터의 선택을 위해 주파수 컨버터의 전기적 특성을 분석할 필요가 있다^{[6]-[8]}.

본 논문에서는 근래의 추세에 따라 전기 추진선박에서 추진전동기로 유도전동기를 사용할 경우에 속도 및 토크 제어용으로 선택 가능한 주파수 컨버터인 싸이클로컨버터와 PWM 컨버터의 제어 성능을 속도응답을 통한 토크리플 발생정도와 출력 전류 파형에 포함된 고조파의 총 왜형률을 비교 분석하였다.

3.1 싸이클로컨버터

싸이클로컨버터는 어떤 주파수의 교류전력을 다른 주파수의 교류전력으로 직접 변환하는 장치이며 선박에 적용시에는 주로 동기전동기 및 농형 유도전동기의 주파수 변환장치로 사용된다.

싸이클로컨버터는 저속에서 토크가 크고 제어가 간단하다는 장점을 가지고 있으나 반면에 많은 전력소자를 사용함으로써 복잡한 개폐회로를 가지며

스위칭에 의한 전력손실이 크고 출력에 큰 고조파가 발생하는 단점이 있다.

Fig. 5는 6펄스 회로의 3상 싸이클로컨버터이며 3개의 유니트로 구성되어 있다. 각 유니트는 두개의 3상 전파 SCR 브릿지 회로로 구성되어 있다. 하나는 양의 방향으로 전류를 도통시키고, 다른 하나는 음의 방향으로 전류를 도통시킨다.

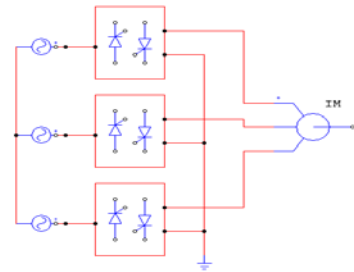


Fig. 5 Circuit diagram of cycloconverter

3.2 PWM 컨버터

PWM 컨버터는 기본적으로 부하에 공급되는 전류에 포함된 고조파의 총 왜형률을 낮추기 위해서 사용되는 방식이며, 싸이클로컨버터와 달리 교류전력을 정류기를 통해 직류전력으로 변환한 후 인버터부의 점호각을 조정하여 펄스폭을 제어함으로써 크기와 주파수가 다른 교류전력으로 변환하는 장치이다. 펄스폭의 변조를 위해서는 두개의 신호가 필요한데 하나는 변조신호 또는 제어신호라고 하는 정현파의 기준신호와 스위칭 주파수를 결정하는 삼각파인 운송신호이다. 인버터의 스위칭은 기준신호와 운송신호의 비교에 의해서 결정되며 보다 나은 정현파 출력을 위해서는 스위칭 횟수가 많아야 한다. 또한, 빠른 스위칭을 위해서는 대전력의 높은 주파수 소자가 필요하며 주로 GTO 싸이리스터, 전력용 트랜지스터, IGBT 등이 사용된다. 다음 그림은 PWM 컨버터의 회로도이다.

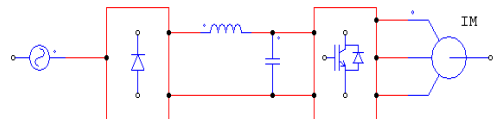


Fig. 6 Circuit diagram of PWM converter

4. 고조파의 전기적 특성

일반적으로 고조파는 전압 및 전류의 기본파에 대한 정수배의 주파수이고 컨버터나 인버터 등의 전력변환장치에 의해 부하에 공급되는 전류파형은 왜형파가 되며 왜형파는 기본파와 고조파로 분해된다. 또한, 왜형파의 왜곡은 고조파의 크기와 기본파에 대한 편위각의 크기에 따라 결정된다.

전력변환장치에 의해 전동기에 공급되는 전류에는 고조파가 포함되어 있는 왜형파가 되며 이 전류를 푸리에 변환에 의해 분석하면 다음과 같이 표현된다.

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

여기서, I_1 은 기본파 전류, I_n 은 n 차 고조파

또한, 고조파 레벨의 수준을 평가하기 위해서 고조파의 특성을 적절히 표현할 수 있는 지수가 필요하다. 이 지수가 고조파 총 왜형률(THD: Total Harmonic Distortion)이며, 기본파에 대한 고조파의 함유율이므로 이 값이 클수록 부하에 공급되는 전류에 고조파가 많이 포함되었음을 알 수 있다. 식 (2)는 전류파형의 고조파 총 왜형률을 나타낸다.

$$i_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

5. 시뮬레이션 결과

전기 추진시스템에서 추진전동기에 공급되는 전류에 포함된 고조파의 주요 발생 원인인 주파수 컨버터의 성능을 출력 파형에 포함된 고조파의 총 왜형률을 통해 분석하였다.

추진기는 농형유도전동기를, 주파수 컨버터는 기존의 전기추진시스템에서 주로 사용하였던 사이클로컨버터와 최근에 사용이 많이 제안되고 있는 PWM 컨버터를 대상으로 하였다.

그림 7은 사이클로컨버터를 이용한 추진전동기의 시뮬레이션을 위한 시스템 모델이며, 그림 8은 PWM컨버터를 이용한 시스템 모델이다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 소프트웨어는 상용툴인

PSIM을 사용하였다.

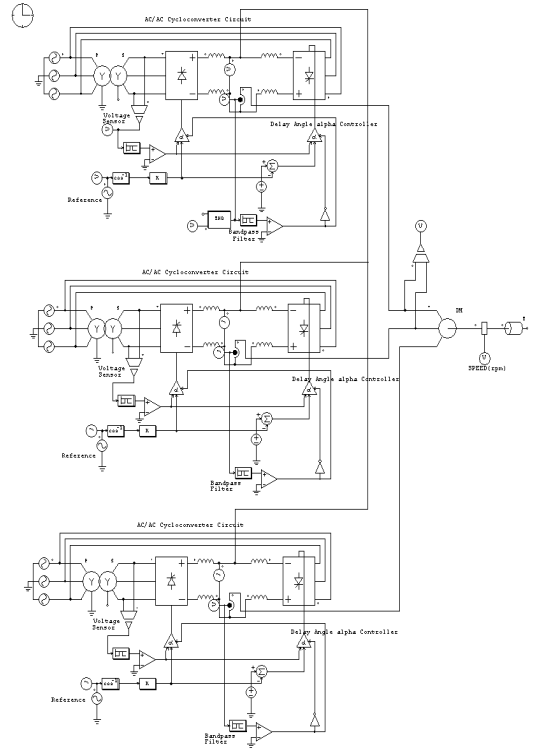


Fig. 7 The system block diagram for cycloconverter

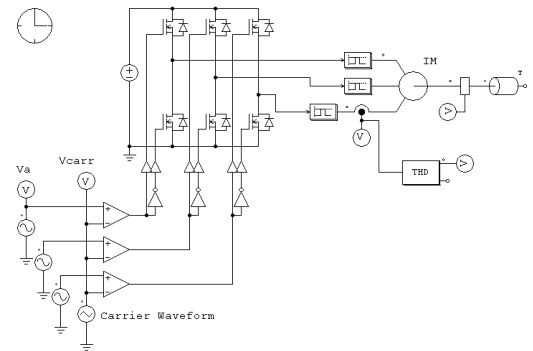


Fig. 8 The system block diagram for PWM-converter

두 전력변환장치의 일반적인 제어 성능을 비교분석할 수 있는 페루프 속도제어는 시뮬레이션하지 않았다. 또한, 전기 추진시스템에서 샤프트와 추진전동기를 직접 연결하는 방식의 경우이므로 전동기의 구동속도는 50[rpm]과 100[rpm]의 저속을 설정치로 삼았으며, 부하인가는 속도를 고려한 전부

하 상태에서 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션에 사용된 추진전동기인 유도전동기의 각종 파라미터는 Table 1 과 같다.

Table 1 Parameters and system constants of induction motor used for simulation

Rated power	6000[kW]	L_s	1.49[mH]
Rated voltage	3300[V]	R_r	0.07[Ω]
Rated current	1200[A]	L_r	0.35[mH]
Pole	6	L_m	48[mH]
R_s	0.0167[Ω]	J	169[kgm ²]

Fig. 9와 Fig. 10은 속도지령이 50[rpm]인 경우에 주파수컨버터로 싸이클로컨버터와 PWM컨버터를 사용할 때의 응답속도로서 싸이클로컨버터 보다 PWM컨버터를 사용할 경우에 속도응답 파형의 변동이 적은 것으로 보아 토크리플이 PWM컨버터를 사용하면 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

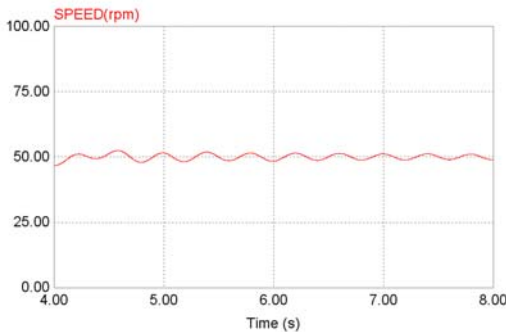


Fig. 9 Simulation responses for speed setting (50[rpm]) by cycloconverter

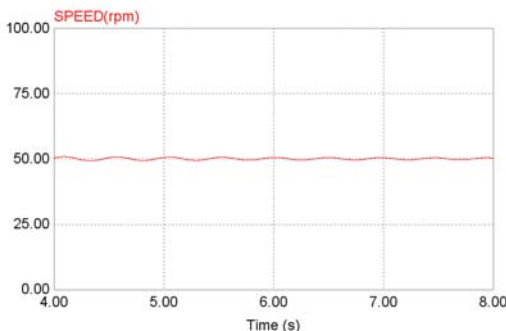


Fig. 10 Simulation responses for speed setting (50[rpm]) by PWM-converter

Fig. 11과 Fig. 12는 속도지령을 50[rpm]으로 하였을 경우의 싸이클로컨버터와 PWM컨버터의 출력 전류파형에 포함된 고조파 총 왜형률이다. PWM컨버터를 사용할 경우에 전동기에 공급되는 전류에 포함된 고조파가 제거되어 고조파 총 왜형률도 싸이클로 컨버터를 사용할 때 보다 작음을 볼 수 있다.

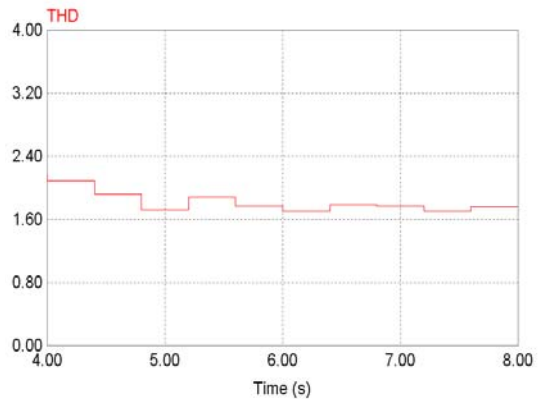


Fig. 11 THD of phase current by cycloconverter

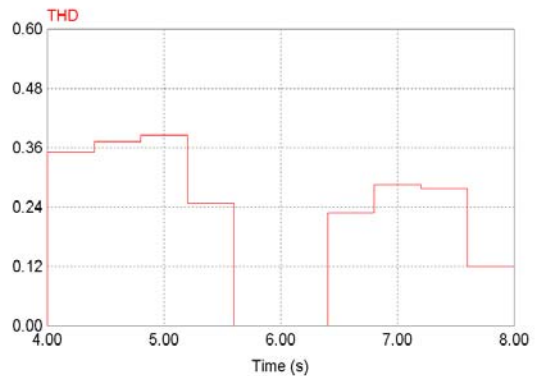


Fig. 12 THD of phase current by PWM-converter

Fig. 13과 Fig. 14는 속도지령이 100[rpm]인 경우에 싸이클로컨버터와 PWM컨버터를 주파수컨버터로 사용할 때의 응답속도로서 PWM컨버터를 사용할 경우에 속도응답 파형의 변동이 적음을 볼 수 있다.

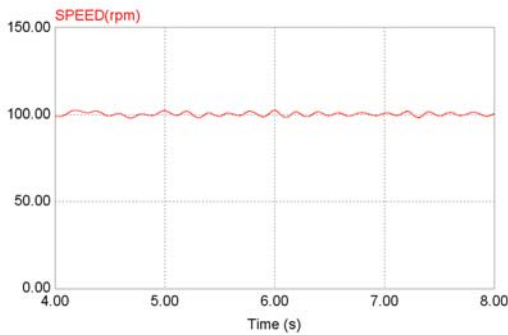


Fig. 13 Simulation responses for speed setting (100[rpm]) by cycloconverter

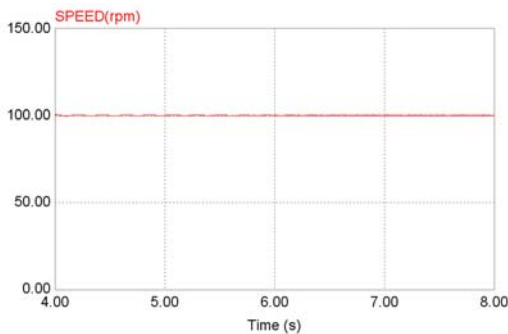


Fig. 14 Simulation responses for speed setting (100[rpm]) by PWM-converter

Fig. 15와 Fig. 16은 속도지령을 100 [rpm]으로 하였을 경우의 싸이클로컨버터와 PWM컨버터의 출력 전류파형에 포함된 고조파 총 왜형률이다. PWM컨버터를 사용할 경우가 싸이클로컨버터의 사용시 보다 전동기에 공급되는 전류에 포함된 고조파 총 왜형률이 작음을 볼 수 있다.

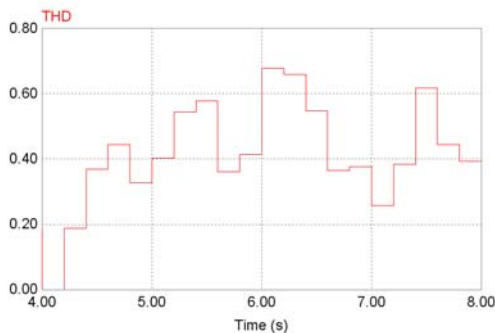


Fig. 15 THD of phase current by cycloconverter

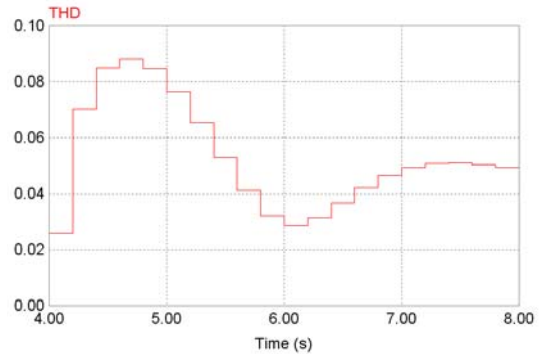


Fig. 16 THD of phase current by PWM-converter

반면에 PWM 컨버터의 스위칭 횟수의 증가에 따른 스위칭 손실은 싸이클로컨버터에 비해 약 17[%] 정도 증가하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 추진전동기와 샤프트를 직접 연결하는 저속(50~100[rpm])의 전기추진선박에서 가장 큰 문제점인 고조파의 영향을 분석하기 위해서 추진전동기로 여러 가지 장점을 가진 유도전동기를 사용하는 경우의 전력변환장치로서 싸이클로컨버터와 PWM컨버터를 대상으로 토크리플과 전류파형에 포함된 고조파성분을 시뮬레이션을 통하여 비교분석하였다. 그 결과 PWM컨버터를 사용하면 싸이클로컨버터를 사용할 경우에 비하여 비교적 스위칭 손실의 큰 증가 없이 다음과 같은 장점을 얻을 수 있다. PWM컨버터를 사용할 경우에는 저속에서 토크리플 및 속도변동이 현저히 감소하였으며 전류파형의 고조파 총 왜형률을 분석한 결과 전동기에 공급되는 전류에 포함된 고조파의 제거 효과도 크게 개선됨으로써 발전기 출력 및 선내 전력계통의 불안정한 전력변동을 해소 할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 저속으로 운전되는 전기추진선박의 추진전동기인 유도전동기의 전력변환장치로 PWM컨버터의 사용이 스위칭 손실은 다소 증가하지만 많은 이점을 가지고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Adnanes, A.K., "Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion", Tutorial Report/Textbook, ABB Marine AS, Oslo, Norway, 2003
- [2] 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.
- [3] 문양경, "LNG운반선 전기 추진 계통의 개요", 한국마린엔지니어링학회지 Vol. 31, No. 6, pp.16-28, 2007.
- [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, "Power Electronics Converters, Applications, and Design", Third Edition, John Wiley, 2003
- [5] Damir Radan, "Power Electronic Converters for Ship Propulsion Electric Motors", Marine Cybernetics-Energy Management Systems, ABB Marine AS/2007.
- [6] J, Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley and Sons, London, 1985.
- [7] J. Pedra, L. Sainz and F. Corcoles, "Harmonics modeling of induction motors" Electric Power Systems Research 76(2006), pp. 936-944, 2006.
- [8] A.F. Zobaa, "A new approach for voltage harmonic distortion minimization", Electric Power Systems Research 70(2004), pp. 253-260, 2004.

저 자 소 개



김종수(金宗洙)

1970년 6월생, 1994년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1998년 동 대학원 졸업(석사), 2002년 동 대학원 졸업(박사), 현재 한국해양대학교 해사대학 선박전 자기계공학부 조교수
 ※관심분야 : 전동기속도제어, 전기추진, 전력변환기



오세진(吳世眞)

1972년 5월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2000, 2003년 동 대학원 졸업(석사, 박사), 2월 현재 한국해양대학교 운항훈련원 실습전담교원
 ※관심분야 : 전동기속도제어, 인버터 및 컨버터



김성환(金成煥)

1954년 11월생, 1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1990년 부경대학교 대학원 졸업(석사), 1998년 부산대학교 대학원 졸업(박사), 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수
 ※관심분야 : 전동기속도제어, 인버터 및 컨버터



김현수(金炫秀)

1970년 11월생, 1993년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1999년 목포해양대학교 대학원 졸업(석사), 2002년 한국해양대학교 대학원 졸업(박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 부교수
 ※관심분야 : 전동기속도제어, 마이크로 프로세서



김덕기(金德基)

1975년 3월생, 1997년 한국해양대학교 선박운항시스템공학과 졸업, 2001년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 2004년 한국해양대학교 박사과정 수료, 현재 현대중공업(주) 기본설계 과장
 ※관심분야 : 전동기속도제어, 마이크로 프로세서, 인버터 및 컨버터



윤경국(尹璟國)

1969년 4월생, 1993년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1997년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사), 2000년 한국해양대학교 박사과정 수료, 현재 Healthstream korea 팀장
 ※관심분야 : 전동기속도제어, 마이크로 프로세서, 인버터 및 컨버터