

# 전기추진선박의 토크 및 속도변화에 따른 전력변환장치의 고조파 분석

김종수\* · 김성환\*\*†

\*, \*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

## Harmonic Analysis of Power Conversion System for Torque and Speed Changing of Electric Propulsion Ship

Jong-Su Kim\* · Seong-Hwan Kim\*\*†

\*, \*\* Devison of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

**요 약 :** 근래에 전기추진선박의 필요성이 대두되고 있으며 특수선박을 시작으로 건조가 증가되고 있는 실정이다. 하지만 선박은 운항 환경에 따라 추진기의 출력 토크 및 속도의 변동이 심하므로 전기추진시스템에 큰 영향을 미친다. 대표적으로 출·입항시, 정상상태의 대양 항해시, 황천 항해시에 선박 추진시스템의 토크 및 속도 변동이 짧지만 빈번하게 변동하게 되므로 전기추진시스템의 전력변환장치에서 전류 및 전압파형에 고조파가 크게 포함되어 발전기, 변압기, 컨버터, 인버터 및 추진전동기에 손실의 증가, 기기의 열화 및 토크 맥동 발생 등의 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 선박의 운항 환경에 따른 추진시스템의 전류 및 전압파형에 포함되는 고조파 함유율을 분석하였다. 분석 결과 저속 영역에서의 낮은 속도 및 부하 변동에 따라서 전동기에 공급되는 전류 및 전압 파형에 포함된 총 고조파 왜형율과 전동기의 토크 맥동이 증가됨을 확인할 수 있었다.

**핵심용어 :** 고조파, 전기추진시스템, 기기 열화, 총 고조파 왜형율, 철손 및 동손

**Abstract :** *There are various environmental conditions under which ship may navigate over ocean or in harbor. Ship's torque and speed change frequently under the voyage conditions. In this case, harmonics is created in the electrical power systems. The major adverse impacts of voltage and current harmonics in the electrical power systems on generator, transformer, converter, inverter and propulsion motor lead to the increase of machine heating caused by iron and copper losses which are dependent on frequency. In this paper, an analysis of THD(total harmonic distortion) for currents and voltages in the propulsion equipment was carried out. The THD and torque ripple in the input currents of the propulsion motor have been confirmed by the simulation results.*

**Keywords :** *Harmonic, Electrical power systems, Machine heating, THD(Total Harmonic Distortion), Iron and copper losses*

### 1. 서 론

여러 가지 장점을 가지고 있는 전기추진선박의 사용이 급격히 증가되고 있는 시점에서 그동안 비중 있게 다루지 않았던 전기추진선박의 개선점에 대하여 검토가 되어야 한다(Gritter et al., 2005). 전기추진선박의 추진시스템에서 발생될 수 있는 가장 큰 문제점은 추진전동기의 속도 및 토크 제어를 위해 전력변환장치에서 전압 및 주파수를 변환하는 과정에서 전압 및 전류 파형에 고조파 성분이 포함된다는 것이다(WU, 2006; Moham and Umdeland, 2003). 전기추진선박의 추진시스템에서는 전력변환장치의 구성 비율이 큰 관계로 고조파에 의한 전력 손실의 증가와 설비의 손상 및 화재에 의한 영향이 대단히 크다(김 등, 2008).

선박의 경우에는 운항 환경의 특성상 추진기의 출력 토크 및

속도 변동의 주기는 짧지만 장시간에 걸쳐 발생되므로 전력변환 시 전압 및 전류 파형에 고조파가 크게 포함되게 된다. 토크 변동의 경우에는 황천 항해 시 프로펠러 레이싱에 의해 출력 토크가 상당히 넓은 범위에서 변동하게 되며, 속도는 출·입항시, 정상상태의 대양 항해시, 황천 항해시에 따라 변동하게 된다.

전기추진선박의 경우에는 발전기, 스위치보드, 변압기, 컨버터, 인버터 및 추진전동기 등의 전기기기로 구성되므로 대전되는 전류에 의한 영향을 크게 받게 된다. 고조파는 각 전기기기에서의 손실을 증가시키며 회로의 열화 및 전동기 토크의 리플을 발생시키므로 전기추진선박의 안전 확보를 위해서 고조파 제거를 위한 많은 연구가 필요하다(Chiasson and Tolbert, 2002; 김과 오, 2009).

본 연구에서는 운전환경이 특수한 선박에서 전기추진시스템의 운용 시 계통간에 공급되는 전류 및 전압파형에 포함되는 고조파 성분의 영향을 분석하였다.

\* 대표저자 : 종신회원, jongskim@hhu.ac.kr, 051-410-4831

† 교신저자 : 정희원, kksh@hhu.ac.kr, 051-410-4265

## 2. 전기추진선박의 특수한 운전환경

### 2.1 속도 변동의 운전환경

선박의 항행 속도 변동에 영향을 주는 환경은 몇 단계로 나누어진다. 먼저 정박지 출항 또는 입항시의 속도 변동의 경우에는 정지 상태에서 증속 영역에 걸쳐 속도 변동이 발생되며 변동 속도 영역에서의 주기는 짧지만 반복 횟수가 많은 편이다. 출항 후 대양에서의 정상적인 항해 운전 시에는 고속 영역에서 운전된다. 기상 악화에 의한 황천 항해 시에는 저속, 증속 및 고속의 전 영역에서 속도 변동이 발생하며 장시간에 걸쳐 속도 변동이 반복해서 발생되므로 전기추진시스템에서의 전압 및 전류의 변화 횟수와 크기도 크게 변동하게 된다.

### 2.2 토크 변동의 운전환경

토크 변동은 주로 황천 항해 시 파고에 의해 프로펠러가 수면상으로 노출되는 경우와 수면하로 깊이 잠기게 되는 경우에 프로펠러 레이싱 현상에 의해 일어나게 된다.

이 경우 추진전동기는 출력 토크의 5~100%에 걸친 넓은 범위의 토크 변동 영역에서 운전된다.

## 3. 전기추진선박의 추진시스템

전기추진선박의 추진시스템은 크게 발전기, 변압기, 주파수 컨버터, 추진전동기부로 나누어진다. 대형 전기추진선박에서 주로 사용되는 발전기는 3300 V 또는 6600 V 출력의 동기발전기가 사용되며 변압기는 고조파 감소를 위해 정류기 출력을 다펄스로 만드는 상전이 변압기가 사용된다. 주파수 컨버터는 추진전동기의 토크 및 속도제어를 위한 주파수 변환 장치로서 AC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터로 구성되며 선박의 추진을 담당하는 전동기는 토크 및 속도제어가 용이하고 유지보수가 편리한 6000 kW 이상 고출력의 동기전동기와 유도전동기가 많이 사용된다. Fig. 1은 전기추진시스템의 전체 구성도이다 (CONVERTEAM, 2006).

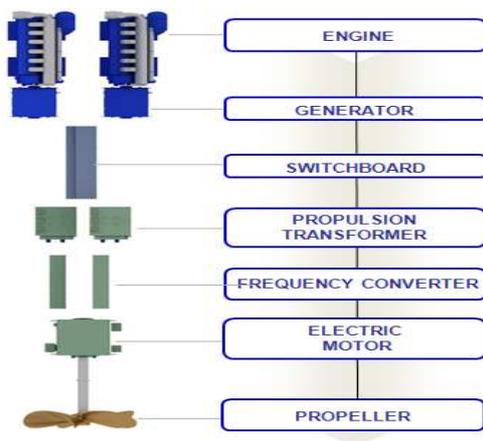


Fig. 1. Schematics of electric propulsion system.

## 4. 고조파 영향

전기추진시스템에서의 전력변환 과정에서 발생하는 고조파에 의한 영향은 각 계통에서의 동손과 철손에 의한 손실과 전기기기의 과열 및 토크 맥동이 대표적이다. 전기추진시스템의 각 구성부에서 발생하는 고조파의 영향은 다음과 같다.

### 4.1 발전기의 영향

발전기에서는 고조파에 의해 증가되는 동손과 철손에 의해 기기의 과열을 초래한다. 부하상태에서 전류에 고조파가 포함되면 전류의 실효율이 증가하게 되고 발전기 권선에서의 동손이 증가하게 된다. 식(1)은 발전기 권선에서의 동손을 나타낸다 (American Bureau of Shipping, 2006).

$$P_{gc} = I_s^2 R_{gw}^2 \quad (1)$$

여기서,  $P_{gc}$  : 동손,  $I_s$  : 고조파전류실효율,  $R_{gw}$  : 권선저항

철손에는 히스테리시스손과 와류손이 있으며 고조파의 주파수 증가에 의해 손실 또한 증가하게 된다. 상대적으로 와류손에 비해 히스테리시스손은 그 값이 작다. 식(2)는 고조파의 주파수 증가에 의해 발생하는 자계에서의 와류손을 나타낸다(American Bureau of Shipping, 2006).

$$P_{get} = P_{ef} \sum_{h=1}^{hmax} I_{gh}^2 h^2 \quad (2)$$

여기서,  $P_{get}$  : 전체와류손,  $P_{ef}$  : 전부하 기본주파수에서의 와류손  
 $I_{gh}$  :  $h$  고조파의 전류실효율,  $h$  : 고조파 수

발전기 출력 전압은 정현파가 이상적이지만 비선형 부하에 의한 고조파 전류에 의해 시스템 임피던스에서 전압강하가 일어나고 이로 인해 출력 전압의 왜곡이 발생하게 되고 이에 동반하여 출력 전류 또한 왜곡된다. 식(3) 및 식(4)는 발전기 출력 전압 및 전류의 총고조파 왜형율이다(American Bureau of Shipping, 2006).

$$V_{gthd} = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{gh}^2} / V_1 \right) \times 100 \quad (3)$$

$$I_{gthd} = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{gh}^2} / I_1 \right) \times 100 \quad (4)$$

여기서,  $V_{gthd}$  : 발전기 출력전압의 총 고조파 왜형율  
 $V_{gh}$  : 발전기 출력전압  
 $I_{gthd}$  : 발전기 출력전류의 총 고조파 왜형율  
 $I_{gh}$  : 발전기 출력전류

또한, 발전기의 출력 토크의 맥동과 과열에 의한 발전기 축의 기계적 진동도 발생하게 된다.

#### 4.2 변압기의 영향

고조파 전류에 의한 변압기에서의 영향은 히스테리시스손으로 대표되는 철손 증가에 의해 동손이 증가하며 게다가 동손과 누설자속에 의한 코어의 과열 및 권선의 절연피로가 추가적으로 발생하게 된다. 식(5)와 식(6)은 변압기에서 발생하는 대표적인 손실인 동손과 와류손을 나타낸다(American Bureau of Shipping, 2006).

$$P_{tc} = I_s^2 R_{tw}^2 \quad (5)$$

여기서,  $P_{tc}$  : 동손,  $I_s$  : 고조파전류실효값,  $R_{tw}$  : 권선저항

$$P_{tet} = P_{ef} \sum_{h=1}^{hmax} I_{th}^2 h^2 \quad (6)$$

여기서,  $P_{tet}$  : 전체와류손,  $P_{ef}$  : 전부하 기본주파수에서의 와류손  
 $I_{th}$  :  $h$  고조파의 전류실효값,  $h$  : 고조파 수

#### 4.3 추진전동기의 영향

추진전동기인 교류전동기의 전류 고조파에 의한 영향은 변압기의 동손 및 와류손에 의한 손실의 경우와 유사하며 특히 고차 고조파에 의한 회전자 권선의 과열은 회전축의 변형과 축 베어링의 윤활 불량에 의한 베어링의 변형을 초래하여 심각한 문제를 일으킬 수 있으며 전동기의 수명에 직결된다. 식(7)과 식(8)은 전동기에 공급되는 전압 및 전류의 왜곡에 의한 총고조파 왜형율을 나타낸다(American Bureau of Shipping, 2006).

$$V_{mthd} = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{mh}^2} / V_1 \right) \times 100 \quad (7)$$

$$I_{mthd} = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{mh}^2} / I_1 \right) \times 100 \quad (8)$$

여기서,  $V_{mthd}$  : 전동기 입력전압의 총 고조파 왜형율  
 $V_{mh}$  : 전동기 입력전압  
 $I_{mthd}$  : 전동기 입력전류의 총고조파 왜형율  
 $I_{mh}$  : 전동기 입력전류

가장 고조파의 영향을 크게 고려해야 할 장비는 선박의 추진을 담당하는 추진전동기라 할 수 있으므로 전동기의 입력 전압

및 전류에 포함되는 고조파의 관리와 제거에 대한 보다 적극적인 연구개발이 필요하다고 판단된다.

#### 4.4 가변속 드라이브

추진전동기의 토크 및 속도의 가변을 위한 장치로는 정류기와 인버터가 대표적이며 이들 장치에는 전력용 반도체 소자가 사용된다. 전력용 반도체 소자의 도통 및 스위칭 작용에 의해 고조파가 발생되며 전력변환장치에 영향을 주는 고조파의 근원이 된다.

Fig. 2는 가변속 드라이브에 사용되는 정류기와 인버터의 블록도이다.

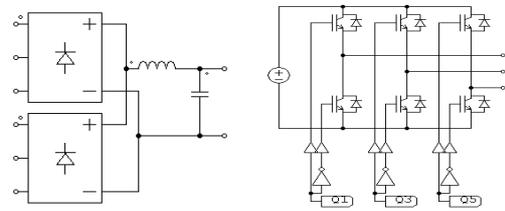


Fig. 2. Block diagram of rectifier and inverter.

#### 4.5 전력케이블

전력케이블을 통해 고조파 성분이 포함된 전류가 흐르게 되면 케이블 저항에 의한 케이블 손실이 발생하게 된다. 식(9)는 전력케이블에서 발생하는 손실을 나타낸다(American Bureau of Shipping, 2006).

$$P_{cl} = I_{ms}^2 R_c^2 \quad (9)$$

여기서,  $P_{cl}$  : 케이블동손,  $I_{ms}$  : 케이블전류,  $R_c$  : 케이블 저항

### 5. 시뮬레이션

#### 5.1 시뮬레이션 환경

##### 5.1.1 속도 변동

추진전동기의 출력 토크가 최대인 상태에서 입·출항 시와 대양 항해 시에 고려될 수 있는 속도 영역을 저속, 중속 및 고속의 경우로 선택하였다. 속도 변동에 따른 전력변환장치에서의 고조파 왜형율을 시뮬레이션 하기 위한 추진전동기의 속도영역을 50 rpm, 500 rpm 및 1,000 rpm으로 설정하였다.

##### 5.1.2 토크 변동

부하토크의 변동은 황천 항해 시 프로펠러 레이싱에 의해 주로 발생되므로 황천항해 시 300 rpm으로 감속 운전되는 경우로 가정하였다. 추진전동기의 속도가 300 rpm으로 운전되던 중 프로펠러 레이싱에 의해 프로펠러가 수면상으로 노출되어 축 토크의 감소로 추진전동기의 속도가 600 rpm으로 증가되는 경우

와 다시 수면하로 잠겨 300 rpm으로 운전되는 경우로 나누어 시뮬레이션 하였다. 속도제어가 행해지는 경우에도 프로펠러 레이싱이 약 3초 정도의 지속시간을 가지므로 수면하 및 수면상에서의 추진전동기 속도 유지시간을 3초로 설정하였다.

### 5.2 추진전동기 정보

본 논문에서 전기추진선박의 운항 환경에 따른 전력변환장치에 영향을 미치는 고조파 성분의 분석을 위한 시뮬레이션에 필요한 유도전동기의 파라미터 및 시스템정수는 Table 1과 같다.

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

Rating power	6000 kW	$L_s$	1.49 mH
Rating voltage	3300 V	$R_r$	0.07 $\Omega$
Rating current	1200 A	$L_r$	0.35 mH
Pole	6	$L_m$	48 mH
$R_s$	0.0167 $\Omega$	$J$	169 kgm <sup>2</sup>

시뮬레이션에 사용된 12펄스 드라이브를 사용하는 전기추진 시스템의 구성도는 Fig. 3과 같다.

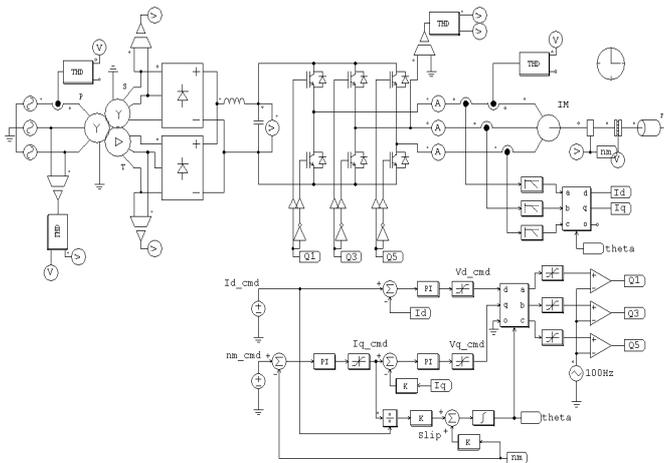
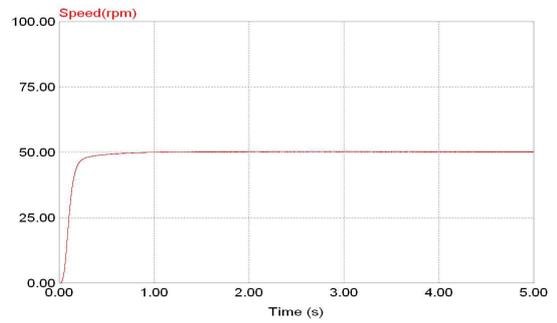
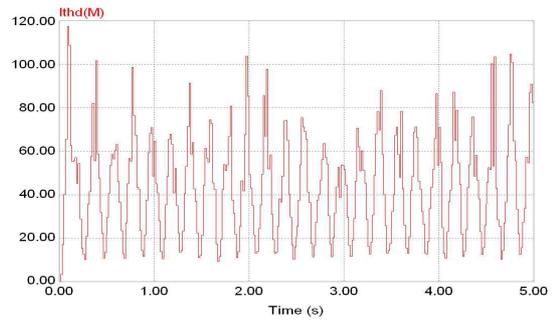


Fig. 3. Block diagram of electric propulsion system.

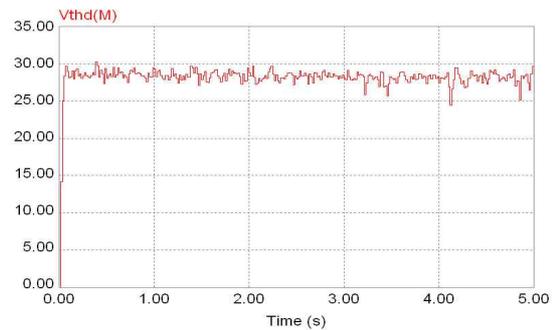
Fig. 4는 50 rpm의 속도응답, 추진전동기측의 전류 및 전압파형에 포함된 총 고조파 왜형율, 추진전동기의 토크응답을 나타낸다. 저속영역에서 추진전동기측의 전류 및 전압파형에 포함된 총 고조파 왜형율과 토크 리플이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 5, Fig. 6은 중속 및 고속영역인 500 rpm과 1,000 rpm에서의 속도응답, 총 고조파 왜형율 및 토크 리플을 나타내고 있다. 저속영역에서의 운전 결과와 비교해 보았을 때 크게 응답 특성이 개선되었음을 알 수 있다. 속도변동에 따른 고조파 함유율을 시뮬레이션을 통해 분석해 보면 저속 영역에서 고조파의 발생 정도가 큼을 알 수 있다.



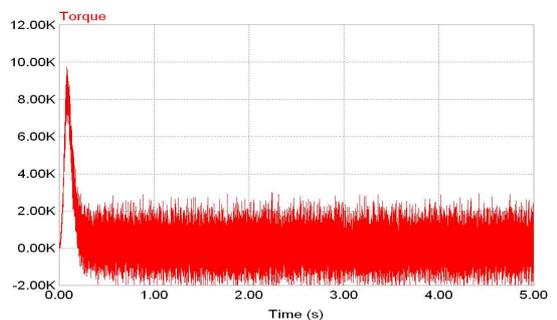
(a)



(b)



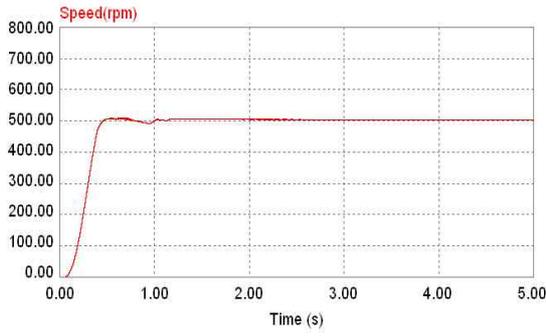
(c)



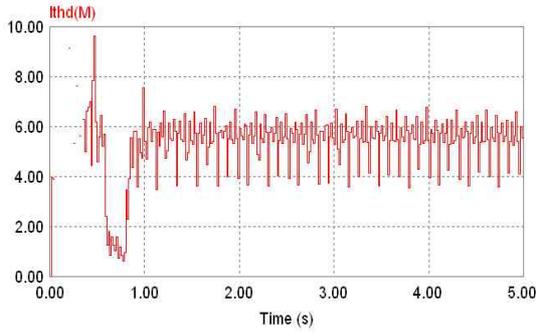
(d)

Fig. 4. Simulation results for speed setting(50 rpm) : (a) Speed (b) THD(I) (c) THD(V) (d) Torque pulsation.

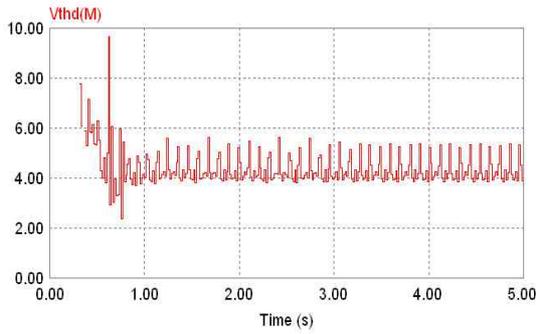
전기추진선박의 토크 및 속도변화에 따른 전력변환장치의 고조파 분석



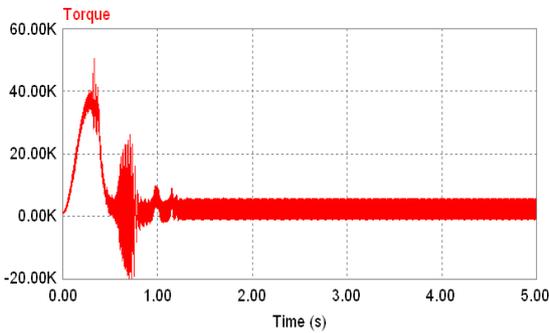
(a)



(b)

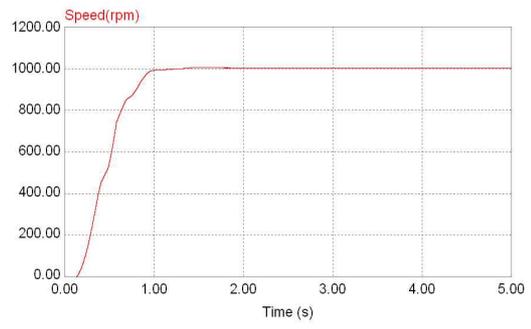


(c)

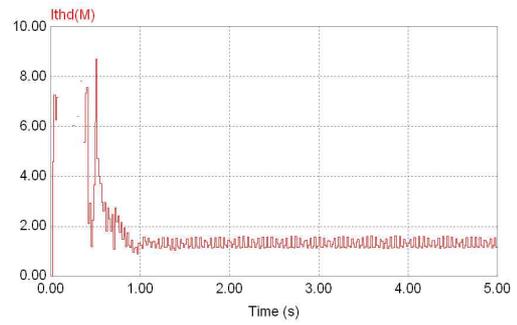


(d)

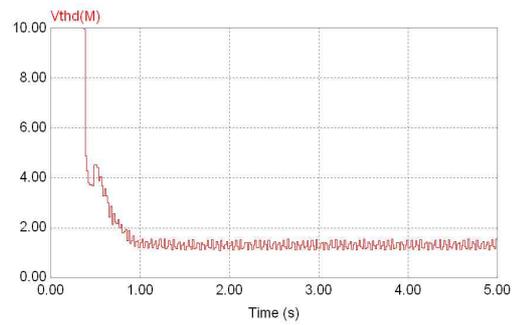
Fig. 5. Simulation results for speed setting(500 rpm) : (a) Speed (b) THD(I) (c) THD(V) (d) Torque pulsation.



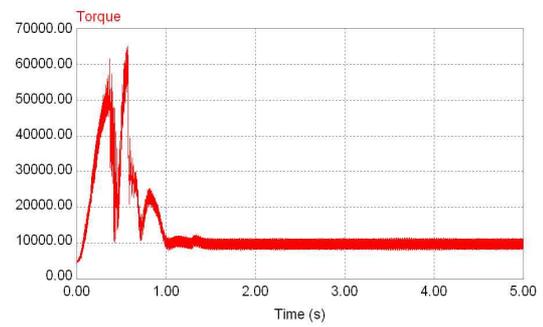
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Simulation results for speed setting(1000 rpm) : (a) Speed (b) THD(I) (c) THD(V) (d) Torque pulsation.

또한, 황천 항해 시 프로펠러 레이싱에 의한 토크 변동 시 추진전동기축의 전류 및 전압에 포함되는 고조파의 총 왜형율을 시뮬레이션 하였다. Fig. 7은 황천 항해 시에 프로펠러레이싱에 의해 프로펠러가 수면하에 잠긴 상태로 운전 중 수면상으로 노출된 후 다시 수면하로 잠기는 경우의 토크응답, 전동기축 전류 및 전압에 포함된 총 고조파 왜형율을 나타낸다. 황천항해로 인해 추진전동기의 속도는 300 rpm과 600 rpm으로 변동되는 경우로 설정하였다.

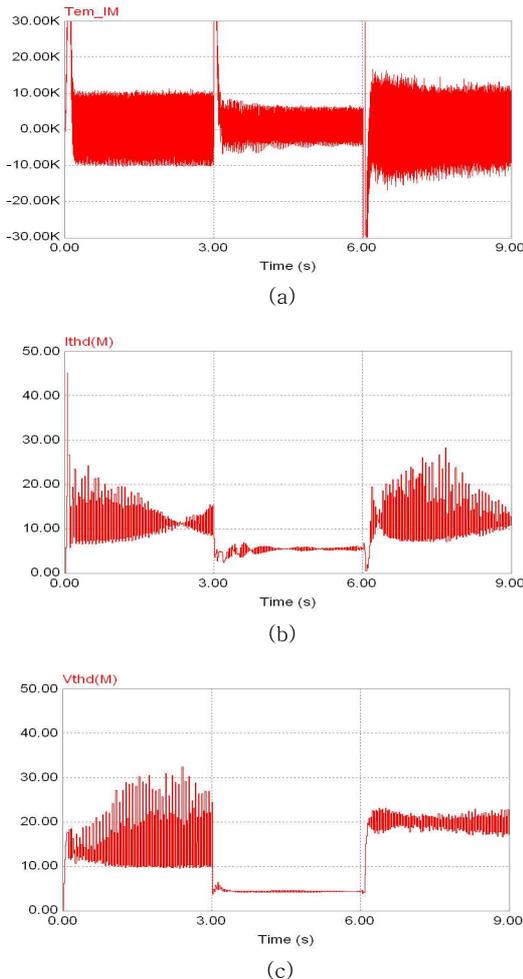


Fig. 7. Simulation results for speed setting(300→600→300 rpm) : (a) Torque pulsation (b) THD(I) (c) THD(V).

프로펠러레이싱에 의한 토크 변동으로 전동기축 전류 및 전압에 포함된 총 고조파 왜형율이 4~5배 정도 변화함을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

전기추진시스템이 도입된 대형 선박의 경우에 있어서 선박의 항행 환경의 변화에 따른 속도 및 토크 변동으로 추진전동기에 공급되는 전류 및 전압 파형에 고조파 성분이 포함되게 되며,

특히 선박의 특성상 입·출항 시에 잦은 변속이나 황천 항해 시에 프로펠러 레이싱이 장기간 반복될 경우 더욱 심하게 된다.

본 연구에서는 선박의 운항 조건에 따른 속도 및 토크 변동 시에 추진전동기 입력측의 전류 및 전압파형에 포함되는 총 고조파 왜형율을 전력시뮬레이션을 통해 분석해 보았으며 저속 운전 및 큰 토크 인가 시에 총고조파 왜형율이 세계의 각 관련 기관에서 규제하는 전압의 총 고조파 왜형율 5~8% 이내와 전류파형에 포함된 총 고조파 왜형율의 제한치 5% 보다 크게 포함 되는 것을 볼 수 있었으며 그로 인해 토크리플이 크게 나타남을 확인하였다. 그러므로 전기추진시스템의 전력변환장치와 전기기기에 미치는 악영향을 고려하지 않을 수 없다. 이를 토대로 향후 선박의 속도 및 토크 변동 시에 증가되는 고조파의 제거를 위한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

- [1] 김중수, 오세진(2009), 직접벡터제어방식을 사용하는 전기추진시스템의 고조파 제어, 한국해양정보통신학회지, 제 13권, 12호, pp. 2618-2624.
- [2] 김중수, 오세진, 김성환, 김현수, 김덕기, 윤경국(2008), 전기추진선박의 전력변환장치 성능 분석에 관한 연구, 한국마린엔지니어링학회지, 제32권, 8호, pp. 190-196.
- [3] American Bureau of Shipping(2006), Control of Harmonics in Electrical Power Systems, American Bureau of Shipping, Houston, pp. 29-54.
- [4] Chiasson, J and L. Tolbert(2002), Eliminating Harmonics in a Multilevel Converter Using Resultant Theory, *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 503-508.
- [5] CONVERTEAM(2006), Slow Speed & Medium Speed Propulsion Motor Solutions, CONVERTEAM THE POWER CONVERSION COMPANY. pp. 3-26.
- [6] Gritter, David, Swarm S. Kalsi, and Nancy Henderson (2005), Variable Speed Electric Drive Options for Electric Ships, *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, pp. 347-354.
- [7] Moham, N. and T. M. Umdeland(2003), *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York. p. 824.
- [8] WU, BIN(2006), *High-Power Converters and AC Drives*, IEEE Press/Wiley-Interscience, New York. p. 333.

원고접수일 : 2011년 01월 19일

원고수정일 : 2011년 02월 17일 (1차)

: 2011년 03월 21일 (2차)

게재확정일 : 2011년 03월 24일