

# 보조 전원을 이용한 12 펄스 다이오드 정류기를 사용하는 추진시스템의 고조파 및 토크 리플 저감

김종수\* · 서동환\*\* · 최재혁\*\*\*†

\*, \*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부, \*\* 한국해양대학교 전기전자공학부

## Harmonic and Torque Ripple Reduction of Electric Propulsion System using 12-Pulse Diode Rectifier by Auxiliary Supply

Jong-Su Kim\* · Dong-Hoan Seo\*\* · Jae-Hyuk Choi\*\*\*†

\*, \*\*\* Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

\*\* Division of Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**요 약 :** 전기추진선박의 추진시스템에 주로 사용되는 3상 정류기의 입력전류는 다양한 저차 고조파를 포함하고 있다. 이러한 고조파 저감을 위해서 대전력이 필요한 대형 선박에 사용되는 전력변환장치는 12펄스 출력의 정류기가 현재 사용되고 있지만 여전히 12±1 차의 고조파가 발생하는 문제점이 있다. 또한, 속도 및 토크 제어기법으로 널리 사용되고 있는 직접토크제어기법의 경우에는 토크 리플이 심하고 전동기의 입력전류는 인버터의 스위칭에 의해 고조파를 크게 포함하고 있다. 본 연구에서는 직접토크제어기법을 이용하는 전기추진시스템의 12펄스 정류기에 보조 전원을 공급하여 고조파를 저감하고 토크 제어성능을 향상시켰으며 실선시스템 환경에서 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 입증하였다.

**핵심용어 :** 전기추진선박, 3상 정류기, 12펄스 정류기, 직접토크제어, 보조 전원

**Abstract :** The input current of three phase rectifier which is mainly used in the propulsion system of the electric propulsion ship includes a variety of low order harmonics. To reduce these harmonics, the power conversion system, used in the large vessels which high power is required, is currently used the rectifiers of 12-pulse output, but it still has a problem that occurs 12±1 harmonics. Also, in the case of the direct torque control technique which is widely used for the speed and torque control, the torque ripple is severe and the input current of motor has greatly included harmonics by the switching of the inverter. In order to reduce harmonics and improve the performance of torque control, this paper presents that the auxiliary supply assisted into the 12-pulse rectifier of the electric propulsion system using direct torque control technique. We confirm the validity of the proposed method through the simulation under the environment of a real vessel system.

**Key Words :** Electric propulsion ship, Three phase rectifier, 12 Pulse rectifier, Direct torque control, Auxiliary supply

### 1. 서 론

3상 다이오드 정류기는 현재 산업현장에서 가장 널리 사용하고 있지만 입력 전류에 저차 고조파가 크게 포함되는 문제를 갖고 있다. 특히, 대전력이 사용되는 대형선박의 전기추진시스템에서는 고조파에 의한 여러 가지 심각한 상황을 초래할 수 있다(Bose, 1987; Wu, 2006). 이러한 문제를

해결하기 위해서 많은 필터가 사용되기도 하는데 최근에는 12펄스 정류기를 사용하여 고조파를 저감시키는 방식이 많이 이용된다(Tanaka et al., 1996; Fukuda and Hiei, 2005). 그러나 12펄스 정류 방식을 사용하여도 (12±1)차 고조파가 여전히 포함되게 된다. 또한, 추진전동기의 속도 및 토크제어 알고리즘으로는 고정자 자속과 토크를 직접 제어하는 직접토크제어기법을 많이 이용하지만 이 방식은 저속, 저부하 상태에서는 전동기의 토크 제어성능이 떨어지는 단점을 가지고 있으며 추진전동기의 입력전류에 고조파가 크

\* First Author : jongskim@hhu.ac.kr, 051-410-4831

† Corresponding Author : choi\_jh@hhu.ac.kr, 051-410-4257

## 보조 전원을 이용한 12 펄스 다이오드 정류기를 사용하는 추진시스템의 고조파 및 토크 리플 저감

게 포함된다(Buja et al., 1997). 전기추진선박의 추진시스템은 다이오드를 이용하는 12펄스 정류기를 주로 사용하고 추진전동기 토크제어 알고리즘으로 직접토크제어방식을 많이 사용하며 이로 인한 입력전류에 포함되는 고조파에 의한 기기손상, 전선의 열화 등에 의한 피해를 해결하는 것이 가장 큰 연구 과제로 대두되었다. 본 연구에서는 12 펄스 정류기를 사용하는 전력변환 장치에서  $(12m\pm 1)$ 차의 고조파를 저감하기 위해서 정류기의 직류 버스단에 단상 보조 전원을 주입하여 정류기의 직류 출력을 전원의 주파수를 증가하지 않고 개선함으로써 인버터 출력의 교류 파형을 개선하고자 하였으며 양호한 정류기 및 인버터 출력 파형을 통해 정류기 및 추진전동기의 입력전류에 포함되는 고조파 성분을 저감하고자 하였다. 직접토크제어방식의 단점인 토크제어 성능의 저하 요인은 히스테리시스 비교기의 밴드 안에서 스위칭 벡터의 선택에 의해 자속이 맥동하게 되고 이에 따라 토크리플이 발생하게 되는데, 보조 전원을 통해 보완함으로써 출력 전류의 맥동과 토크리플을 감소시켰다.

### 2. 12펄스 정류기의 원리

12펄스 다이오드 정류기는 6펄스 다이오드 정류기 2개를 직렬로 연결하여 사용하며 정류기 전부에는 2개의 3상 변압기가 병렬로 연결되어 있다. Fig. 1은 12펄스 정류의 구조이다(Tanaka et al., 1996; Fukuda and Hiei, 2005).

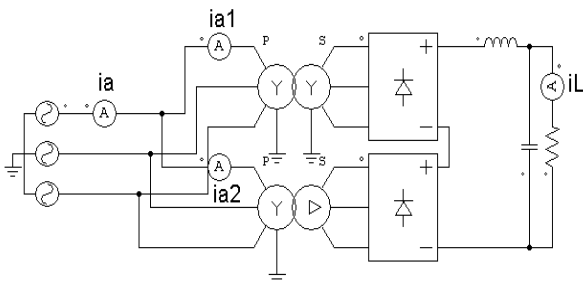
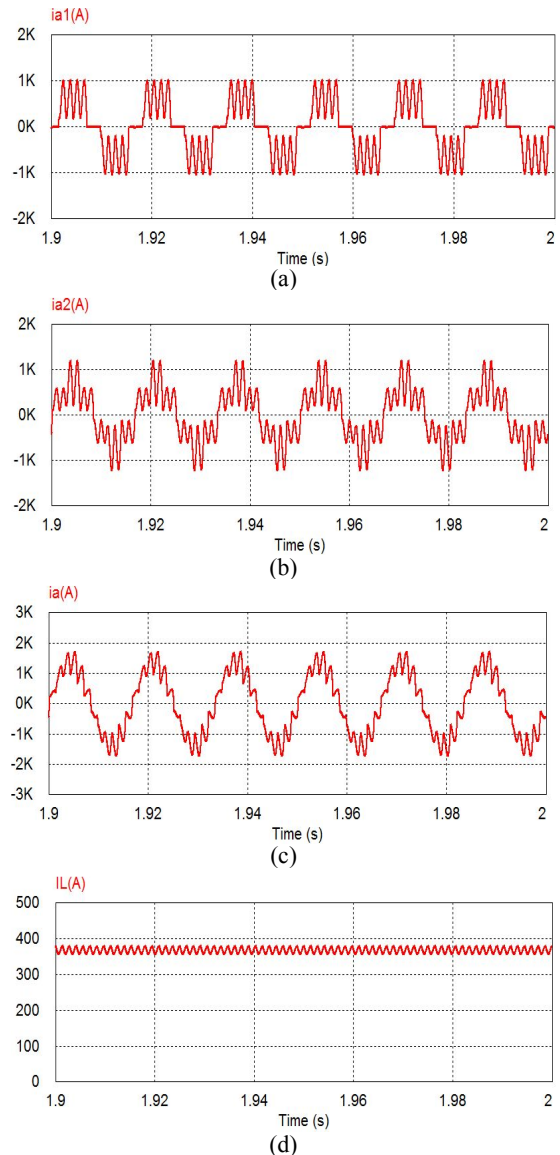


Fig. 1. Structure of 12pulse rectifier.

각 정류기 출력의 직류파형은  $\pi/3$ 의 위상차를 보이며 12펄스의 직류성분이 된다. 이 경우 변압기 전류  $i_{a1}$  과  $i_{a2}$ 는 Figure 2의 (a), (b)와 같으며 변압기 입력전류  $i_a$ 는 (c)와 같이 거의 정현파에 가깝게 된다(Liu et al., 2003). 또한, 고조파의 크기도 1~2가 되며 6펄스 정류기의 경우에 비해서 크게 저감된다. 12펄스 정류기 출력파형은 (d)와 같이 된다.



(a), (b) Waveforms of transformer primary current, (c) Total input current, (d) Load current

Fig. 2. Hypothetical current of 12pulse rectifier.

### 3. 직접토크제어방식

직접토크제어방식은 고정자 자속과 토크를 동시에 제어하는 방법으로 토크, 자속 지령치, 전동기의 전기자전압 및 전류 정보를 이용하여 추정된 실제 토크 및 자속을 비교한 오차를 히스테리시스 밴드를 거쳐 오차를 가장 최소화하기 위한 전압을 선정하여 출력하는 방법이다. 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 많은 제어기와 복잡한 연산을 요구하지 않는 장점을 가지고 있다(Buja et al., 1997). 대형선박의 추진전동기 토크 및 속도제어에 있어서는 제어

의 정밀성면에 있어서 크게 제약을 받지 않으므로 근래에 직접토크제어 방식을 많이 사용한다. Fig. 3에서 직접토크제어 루프는 자속비교기, 토크비교기, 고정자 자속과 토크 계산부, 스위칭벡터 선정부로 구성되어 있다.

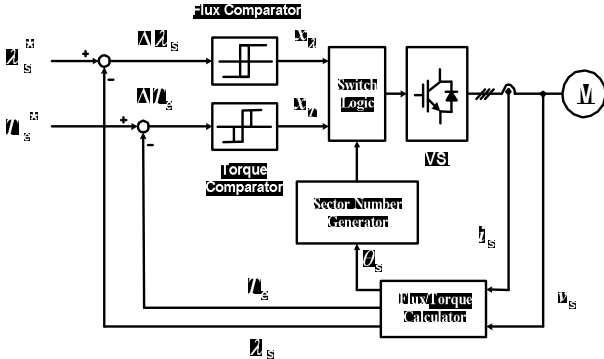


Fig. 3. Block diagram of direct torque control.

Fig. 4에서 토크제어는 토크 지령에 대해 모두 추종이 가능하도록 출력  $\Delta T_e$  는 3단계(-1, 0, 1)가 된다. 즉, 토크의 지령치와 실제 토크와의 오차인  $\Delta T_e$  가  $H_T$  보다 클 경우 ( $\Delta T_e > H_T$ ) 전압을 상승(+1)시키고,  $\Delta T_e$  가  $-H_T$  보다 작을 경우( $\Delta T_e < -H_T$ ) 전압을 감소(-1)시킨다.

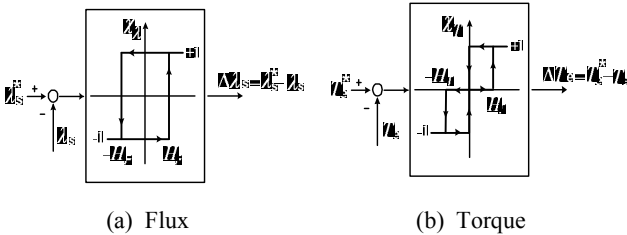


Fig. 4. Characteristics of hysteresis.

$-H_T < \Delta T_e < H_T$  인 경우 바로 이전 제어루틴에서의 출력 전압값에 따라 전압상승(+1), 영 전압(0) 및 전압감소(-1)를 다양하게 취함으로써 출력전압의 변동횟수를 감소시킨다. 자속제어는 고정자 자속의 경우 자속의 값이 항상 양의 값을 가지므로 비교기 출력  $\Delta \lambda_s$  는 2단계(1,0)로 구성된다. 즉 고정자 자속의 오차가 양의 히스테리시스 밴드  $H_F$  보다 클 경우에는  $\Delta \lambda_s = 1$  이 되고, 고정자 자속오차가 음의 히스테리시스 밴드  $-H_F$  보다 작을 경우에는  $\Delta \lambda_s = 0$  으로 된다.

그러나 샘플링 주파수 및 인버터 스위칭 주파수가 증가되어야 하고 스위칭 주파수가 균일하지 않아 필터를 설계하는 것이 어렵다. 또한, 영벡터를 인가하지 않으므로 토크 리플이 심하여 기동 및 과도특성이 양호하지 않기 때문에

저속 및 저부하 상태에서 정류기 및 추진전동기의 입력전류에 고조파가 포함되는 단점을 가지고 있다.

#### 4. 제안한 보조 전류 입력 방식

대형선박의 전기추진시스템에서는 12펄스 정류기에 의해 발생하는  $(12m \pm 1)$ 차의 고조파와 추진전동기의 토크 및 속도제어에 사용되는 직접토크제어기법의 히스테리시스 밴드 폭에 의한 과도응답 특성의 불안정성과 토크 리플, 그리고 정류기 및 추진전동기의 입력전류에 포함되는 고조파가 해결해야 할 과제이다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 본 연구에서는 2개의 6펄스 정류기의 직류 버스단에 보조 전원을 이용한 전류를 입력하여 파형의 왜곡을 보완하고 정류기 및 추진전동기 입력전류 파형을 개선하여 고조파를 저감할 수 있으며 직접토크제어 기법의 자속 맥동에 의한 토크리플도 현저히 감소시킨다. Fig. 5는 보조 전원을 이용한 전류 입력 방식을 나타낸 것이다.

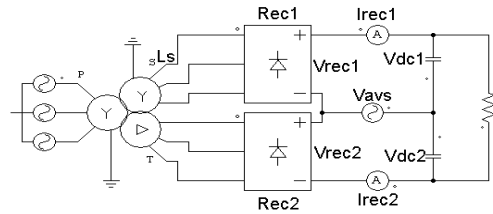


Fig. 5. Configuration of auxiliary supply.

Fig. 5에서 공급되는 삼상 전압은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} e_a &= V_m \sin \omega t \\ e_b &= V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ e_c &= V_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

또한,  $R_{ec1}$ 의 등가회로와 관련하여  $\pi/6 < \omega t < \pi/3$  구간에서 전압방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$2L_s \frac{dI_{rec1}}{dt} = V_{rec1} - V_{dc1} + V_{avs} \quad (2)$$

$$2L_s \frac{dI_{rec1}}{dt} = \sqrt{3} V_m \cos(\omega t - \pi/3) - V_{dc1} + V_{avs} \cong V_{avs} \quad (3)$$

여기서,  $L_s$ 는 각 상의 인덕턴스 값이다.

$R_{ec1}$ 의 출력전압인  $V_{rec1}$ 과  $V_{dc1}$ 의 값은 거의 동일하다. 식 (3)에서 구하여진  $V_{avs}$ 의 구형파가 정류기에 공급되어 정류기 출력 파형을 개선하게 된다.

Fig. 6은 보조 전원을 사용하기 위한 실제 회로를 구성한

보조 전원을 이용한 12 펄스 다이오드 정류기를 사용하는 추진시스템의 고조파 및 토크 리플 저감

것이며, 단상 인버터와 변압기를 이용하여 본 시스템에서 교류 전원을 확보하고 요구되는 전압과 전류의 크기 및 주파수를 조정하여 정류기에 보조 전류를 공급한다.

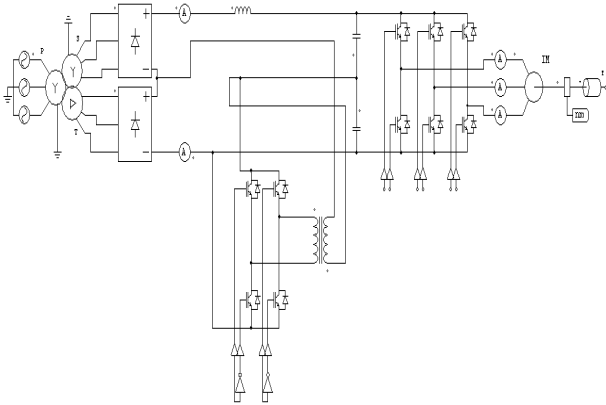


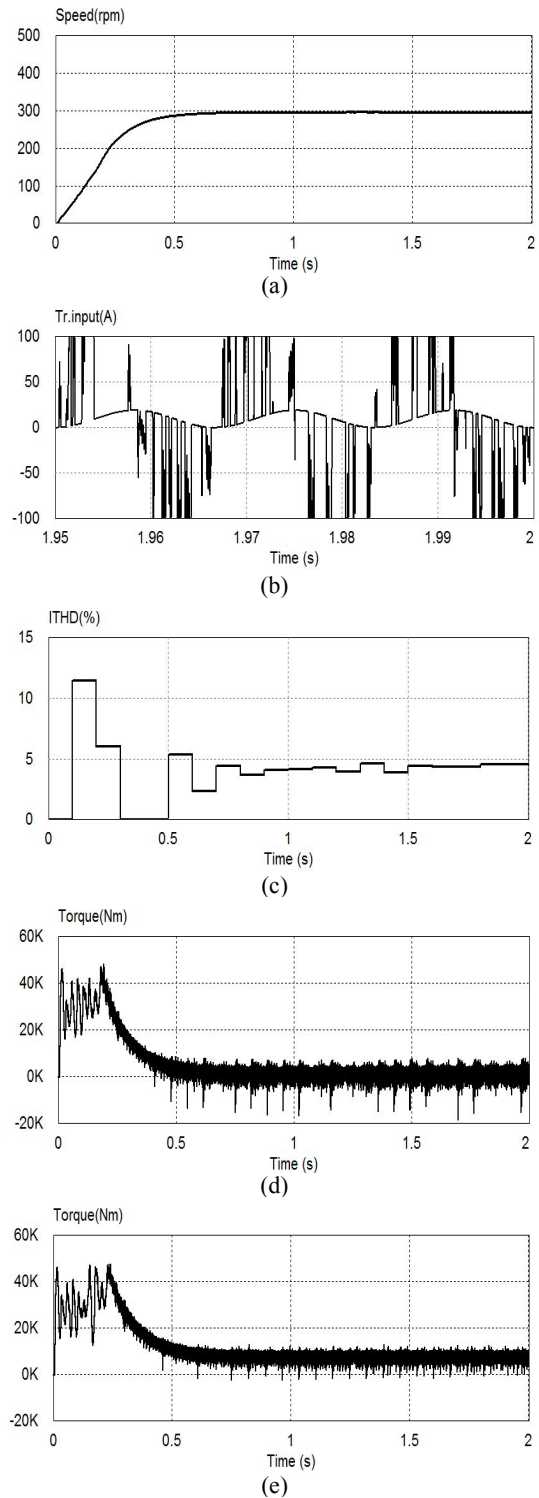
Fig. 6. Configuration of auxiliary supply used for simulation.

### 5. 시뮬레이션

보조 전류 입력 방식의 유효성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 하였으며, 시뮬레이션을 위한 전력시스템은 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 전원부, 변압부, 정류부, 보조 전원 생성부, 삼상 인버터부 및 추진전동기로 구성된다. 그리고 추진전동기의 속도 및 토크제어를 위한 알고리즘은 직접토크제어방식을 이용하였다.

또한, 보조 전원을 사용하는 방식의 개선 정도를 기존의 보조 전원을 사용하지 않는 방식과의 비교를 통해 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 대형 선박의 추진전동기를 300[rpm]의 속도 지령으로 구동할 때, 속도응답 특성과 변압기 입력 전류 파형의 개선 정도 및 추진전동기의 입력전류에 포함되는 고조파의 저감 정도를 비교 분석한다. 또한 직접토크제어방식의 문제점인 추진전동기의 운전 시 발생하는 토크 리플의 감소 정도를 전부하 상태와 10[%] 부하 상태에서 평가 하였다.

시뮬레이션 결과에서 속도응답의 속응성이 보조 전류 입력 시 더욱 우수하며, 변압기 입력전류 파형 또한 크게 개선되었다. 추진 전동기 입력전류에 포함되는 고조파 성분의 함유 정도는 Fig. 7과 Fig. 8의 (c)에서 볼 수 있듯이 보조 전원을 사용하는 경우는 5[%] 정도인데 비해 보조전원을 사용하는 경우에는 1.2[%]로 현저히 작아진 결과에 따라 (12m±1)차의 고조파 성분이 크게 제거되었음을 확인할 수 있다. 또한, 추진전동기의 출력 토크 파형의 비교 분석에서도 보조 전원 사용 시에 토크 리플이 크게 작아졌음을 알 수 있다.



(a) Motor speed, (b) Transformer input current, (c) THD of motor input current, (d) Torque response of motor(10[%]load), (e) Torque response of motor(100[%]load)

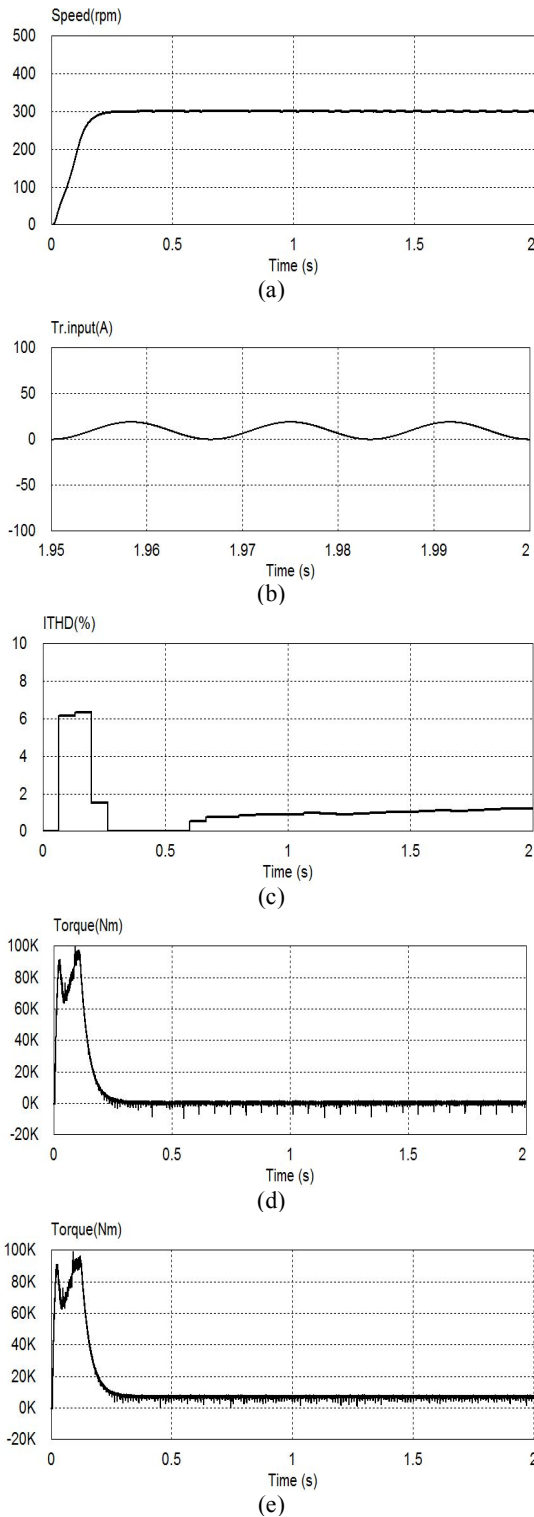
Fig. 7. Simulation responses for without auxiliary supply.

## 5. 결 론

현재 대형 선박의 전기추진시스템의 전력변환 장치 및 추진전동기 운전 시에는 정류기 및 인버터의 사용으로 전류파형의 왜곡과 입력전류에 포함되는 고조파 성분의 함유로 인해 기기 및 전선의 손상이 발생할 가능성이 크다. 또한, 추진전동기의 속도 및 토크제어에 많이 사용하고 있는 직접토크제어 방식의 경우에는 토크 리플이 다소 크게 발생하는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해소하기 위해 보조 전원을 12펄스 정류기에 공급하여 정류기 출력 직류 파형과 인버터의 출력 교류 파형을 개선하고자 하였다. 시뮬레이션 결과 추진전동기의 속도응답 특성이 빨라졌고 변압기의 입력전류 파형이 크게 개선되었으며 추진전동기 입력 전류에 포함되는  $(12m\pm 1)$ 차의 고조파 성분이 기존의 5[%]에서 1.2[%]로 크게 저감되었음을 충고조파왜형율의 분석을 통해 확인하였다. 또한, 직접벡터제어 시 히스테리시스 밴드에 의해 발생하는 자속의 맥동과 토크리플을 보조 전류 입력을 통해 보완함으로써 추진전동기의 토크 리플도 저부하 및 고부하 시에 크게 감소되었음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Bose, B. K.(1987), "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, pp. 68-120.
- [2] Wu, Bin(2006), "High-Power Converters and AC Drives", IEEE Press, pp. 38-81.
- [3] Buja, G., D. Casadei and G. Serra(1997), "DTC-Based Strategies for Induction Motor Drives", IECON '97, pp. 1506-1516.
- [4] Tanaka, T., N. Koshio, H. Akagi and A. Nabae(1996), "A novel method of reducing the supply current harmonics of a 12-pulse thyristor rectifier with an interface reactor", IEEE LAS Annual Meeting, pp. 1256-1262.
- [5] Fukuda, S. and I. Hiei(2005), "Twelve-pulse thyristor rectifiers with reduced input current harmonics", in Proc. IEEJ IPEC, Niigata, Japan, pp. 990-994.
- [6] Liu, Y. H., N. R. Watson and J. Arrillaga(2003), "A new concept for the control of the harmonic content of voltage source converters", Proc. of IEEE PEDS03, pp. 793-798.



(a) Motor speed, (b) Transformer input current, (c) THD of motor input current, (d) Torque response of motor(10[%]load), (e) Torque response of motor(100[%]load)

Fig. 8. Simulation responses for with auxiliary supply.

원고접수일 : 2012년 10월 23일

원고수정일 : 2013년 01월 18일 (1차)

2013년 02월 19일 (2차)

게재확정일 : 2013년 02월 25일