

전류주입에 의한 전기추진시스템의 고조파 저감

김종수* · 한원희** · 서동환***†

*, *** 한국해양대학교, ** 목포해양대학교

Harmonic Reduction of Electric Propulsion System by Current Injection

Jong-Su Kim* · Won-Hui Han** · Dong-Hoan Seo***†

*, *** Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

** Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 전기추진시스템 분야에서 AC/DC 컨버터는 상대적으로 간단한 다이오드 소자를 이용하는 정류기가 가장 널리 사용되고 있으며 이 정류기는 입력 전류에 큰 고조파를 포함하고 있어서 고조파 저감을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서 제안된 방식은 다이오드 정류기의 출력 전류를 정류기와 추진전동기 입력측에 주입하여 정류기와 추진전동기 입력 전류에 포함되는 고조파 성분을 줄이고 또한, 와이-델타 변압기를 정류기 및 추진전동기 입력회로에 설치되는 전류주입장치의 분배회로에 사용하여 주입전류와 전원 및 부하를 서로 절연함으로써 전류파형 개선과 전기적 안전성을 확보하였다. 제안한 방법을 현재 사용 중인 전기추진선박에서 적용하여 시뮬레이션 하였으며 기존의 전력변환장치와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

핵심용어 : 다이오드 정류기, 고조파, 전류주입, 전류주입 네트워크, 전류주입 장치, 절연 변압기

Abstract : AC to DC converter that consists of relatively simple diode rectifier devices has been widely used in the field of the electric propulsion system. Also, since this rectifier includes large harmonics in the input current, a variety of researches have been developed to reduce the harmonics. The proposed method of this paper is to reduce the harmonics included in the input current of rectifiers and propulsion motor by injecting the output current of diode rectifier into the input of them. In addition, the proposed method ensures electrical safety through the respective isolation of the injection current, the source, and the loads using the Wye-Delta insulating transformer applied in current injection device that is installed in the input circuit of rectifiers and propulsion motor. The proposed method is simulated by applying to the electric propulsion ship that is currently operating. We confirm the validity of the proposed method compared with conventional power conversion system.

Key Words : Diode rectifier, Harmonic, Current injection, Current injection network, Current injection device, Insulating transformer

1. 서 론

근래에 비선형 부하를 다루는 선박, 철도, 자동차 등의 추진시스템에서 전력전자기술의 비중은 대단히 높다. 특히 주파수 변환을 통해 추진기의 속도 및 토크를 제어하는 시스템에서는 정류부와 인버터의 기능이 중요한 역할을 하고 있으며 전원 또한 교류-직류-교류로 변환하는 과정을 통해 원하는 전력을 제어하게 된다(Gritter et. al., 2005). 하지만 비선형 부하의 속도 및 토크 제어 시 전압과 전류에 고조파

성분이 포함됨으로서 과전압 발생, 전기기기 과열, 오동작 및 손상 등의 악영향을 미치게 된다(Lawrance and Mielczarski, 1992; Pejovic and Janda, 1999). 이러한 영향은 대규모의 전기추진시스템을 사용하는 대형선박의 경우에 있어서는 심각한 문제를 초래할 수 있기 때문에 다양한 해결방안이 적용되고 있으며 지속적으로 연구하고 있는 실정이다. 현재 주로 사용되는 방식은 고조파 필터의 사용과 다중펄스 발생을 위한 상치환변압기의 설치를 통한 고조파 저감시스템의 채용이다. 그러나 이러한 방식은 효율성, 단순성, 강인성, 경제성 측면이 있어서 모두 자유로울 수 없는 대책이다(Zobaa, 2004). 본 연구에서는 전류주입회로를 전기추진시스템에 추가하여 정류기 입력 전류에 포함되는 고조

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

† 교신저자 : 정희원, dhseo@hhu.ac.kr, 051-410-4831

과 성분을 경제적이고 효율적으로 저감하고 추진전동기 입력전류 파형을 개선하였다. 제안되는 시스템은 전류주입 네트워크 및 주입전류 분배회로를 포함하는 장치로 구성된다. 전류주입 네트워크는 다이오드 정류기 출력 단자의 주입전류를 정류기 및 추진전동기 입력측 세 개의 단자에 각각 연결한다. 주입전류는 정류과정에서 다이오드 도통 시 도통되지 않는 상의 입력전류에 불연속 구간이 생겨 발생하는 고조파에 의해 변형되는 정류기 입력전류와 추진전동기 입력전류의 파형을 개선하게 된다. 특히, 대전력이 사용되는 대형선박의 전기추진시스템에서 전류주입 네트워크와 전원측 및 부하와의 절연을 위한 새로운 방식의 주입전류 분배방식을 적용하여 정류기 및 추진전동기 입력측의 전류에 포함되는 고조파를 제거하여 기기 손상을 방지하고 절연을 통한 전력계통간의 전기적 안전성도 확보 한다.

2. 전류주입 회로의 작용

전류주입 네트워크에서 전류주입 장치를 통해 정류기 입력측에 주입되는 과정을 표현한 다이오드 정류기가 포함된 전력변환 회로도의 기본 구조를 Fig. 1에 나타내었다.

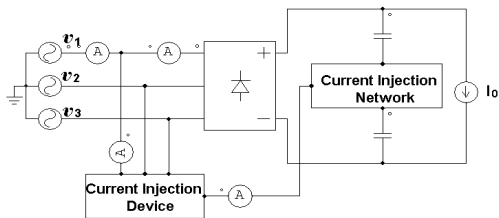


Fig. 1. Diagram using current injection.

3. 전류주입 방식의 개요

전력변환과정에서 정류기 출력 전류파형에 포함되는 고조파 성분은 정류기 자체에서 비선형 파형을 생성하기 때문이다. 통상적으로 6펄스 다이오드 정류기의 경우는 $6n \pm 1$ ($n=1,2,3 \dots$), 12펄스의 경우는 $12n \pm 1$ ($n=1,2,3 \dots$)의 고조파가 생성되게 된다(WU, 2006). 이것은 다이오드 정류기의 경우 도통 시 상측 다이오드와 하측 다이오드가 120° 또는 60° 동안 도통하기 때문에 도통되지 않는 다이오드에 의해 각 상의 입력전류에 불연속 구간이 생김으로서 고조파가 발생된다. 전류주입법은 위에서 설명한 불연속 구간이 생기는 입력전류에 주입전류 네트워크에서 발생된 고조파 전류를 주입하여 불연속 구간을 없게 하여 고조파성분을 제거함으로써 입력전류의 파형을 개선하는 방식이다(Maswood,

2003). Fig. 2는 전류주입 방식의 기본 개념을 나타내는 회로도이다. 전류주입 방식의 장점은 다른 복잡하고 고가의 시스템이 추가되는 고조파 저감 방식에 비해 기존의 전력변환장치에 간단한 전류주입회로만을 추가하여 효율성, 경제성 및 강인성 측면에서 우수한 효과를 얻을수 있다는 것이다. 특히, 대형선박의 전기추진시스템에 있어서는 시스템의 용량 및 부피면에서 대규모의 특성을 가지고 있는데 본 전류주입 방식의 사용으로 인해 보다 큰 효과를 기대할 수 있을 것이다.

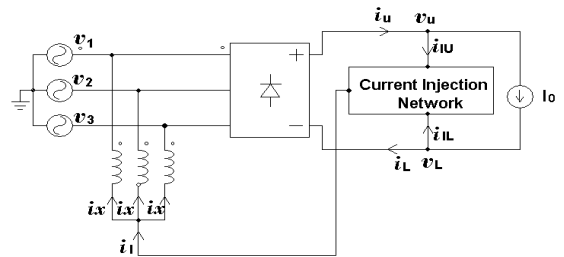


Fig. 2. Basic circuit of current injection method.

정류기는 삼상이 평형인 전압시스템에 연결되어 있는 것으로 가정하면 전원의 각 상 전압은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} v_1 &= V_m \sin(\omega_0 t) \\ v_2 &= V_m \sin(\omega_0 t - \frac{2}{3} \pi) \\ v_3 &= V_m \sin(\omega_0 t - \frac{4}{3} \pi) \end{aligned} \tag{1}$$

전류주입 네트워크에서 발생하는 주입전류는 식(2)와 같이 표현된다.

$$i_{IU} = i_{IL} = -kI_0 \sin(3\omega_0 t - \psi) \tag{2}$$

여기서, k : 주입전류의 크기
 ψ : 주입전류의 상 변위

Fig. 2에서 다이오드 브리지의 부하전류는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_U &= I_0 + i_{IU} \\ i_L &= I_0 + i_{IL} \end{aligned} \tag{3}$$

또한, 전류 및 정류기의 각 상에 공급되는 주입전류는 다음과 식(4)와 같으며 각 상에는 동일한 크기의 주입전류가 인가된다.

$$i_I = i_U - i_L$$

$$i_x = \frac{1}{3}i_I \quad (4)$$

전원이 3상 평형이므로 전원의 접지점과 주입전류 분배점의 전위는 같게 되므로 식(5)가 유도된다.

$$v_N = v_1 + v_2 + v_3 = 0 \quad (5)$$

여기서, v_N 은 주입전류 분배점의 전위

식(4)의 각 상에 인가되는 주입전류가 정류기의 다이오드 도통 시 비 도통되는 불연속 구간에 공급되어 입력전류 파형을 개선하게 되는 것이다.

4. 전류주입 방식

대형선박의 전기추진시스템과 같은 대전력이 공급되는 경우에는 전류주입 네트워크와 전원 및 추진전동기의 분리를 통한 전기적 안전성 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 자기소자를 사용하는 수동형 전류주입 방식으로 분류할 수 있으며 전류주입 분배회로를 기존의 방식들과 달리 와이-델타 절연 변압기를 통해 정류기 및 추진전동기 입력측에 주입함으로써 전류주입 네트워크와 전원 및 부하를 분리하여 절연을 확보하였고 이상적인 정현파의 변압기 2차측 전류의 주입으로 인해 정류기 입력전류에 고조파의 포함을 저감하고 추진전동기 입력전류의 파형이 개선된다. Fig. 3은 본 연구에서 제안한 주입전류 분배회로를 갖는 전류주입 방식을 보여준다.

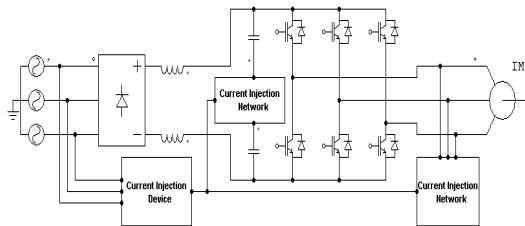


Fig. 3. New current injection device.

5. 시뮬레이션

제안된 방식의 정류기 입력전류에 대한 고조파 저감 효과와 추진전동기 입력 파형의 개선을 검증하기 위해 시뮬레이션을 하였으며 전력시뮬레이션 전용 소프트웨어인 PSIM을 이용하였다. 시뮬레이션에 대한 실효성을 높이기 위해

현재 대형 전기추진선박에서 사용중인 전력변환장치와 추진전동기를 이용하였다.

제안된 전류주입 방식의 효율성을 비교 분석하여 입증하기 위해 전류주입 시스템이 없는 전력변환 시스템도를 Fig. 4와 같이 구성하였다.

또한, 추진전동기의 정보는 Table 1과 같다.

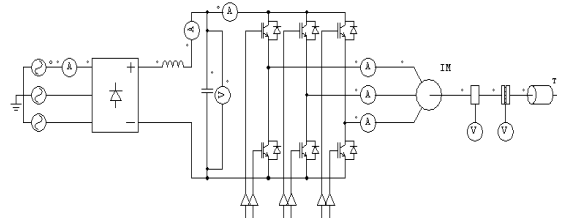
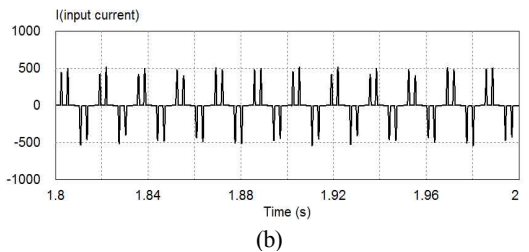
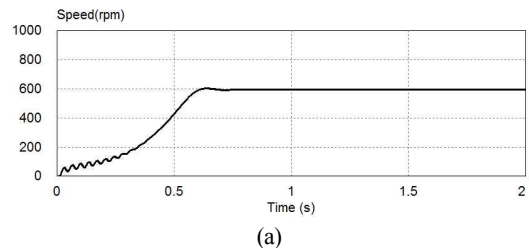


Fig. 4. Electric propulsion system without current injection.

Table 1. Specification of propulsion motor

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

Fig. 5 (a)는 전류주입이 없는 경우의 속도응답 결과이며 응답 특성이 양호함을 볼 수 있다. (b)는 정류기 입력측의 전류파형이며 (c)는 (b)의 전류파형에 대한 FFT 분석 결과로서 고조파가 많이 포함됨을 알 수 있다. 또한, (d)는 출력측의 전류파형이며 (e)는 출력측 전류파형의 FFT 분석 결과로서 고차의 고조파성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. (f)는 추진전동기 입력전류 파형이며 왜곡됨을 볼 수 있다.



전류주입에 의한 전기추진시스템의 고조파 저감

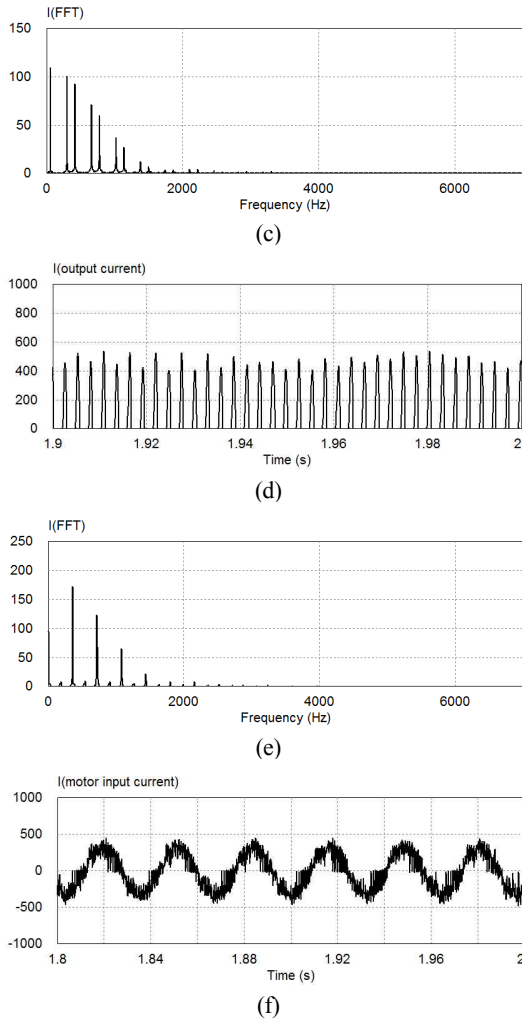


Fig. 5. Simulation responses for without current injection (a) Motor speed (b) Input current (c) FFT of input current (d) Output current (e) FFT of output current (f) Input current of propulsion motor.

Fig. 6은 새로운 주입전류 분배회로를 갖는 전류주입방식을 사용하는 전기추진시스템의 회로도이며, Fig. 7은 전기추진시스템의 시뮬레이션 결과로서 (a)를 통해 속도응답이 우수함을 볼 수 있다. (b)는 정류기 입력측의 전류파형이며 (c)는 입력측 전류파형의 FFT 분석 결과로서 고조파 저감 효과가 큼을 알 수 있다. 또한, (d)와 (e)는 정류기 입력측의 상에 연결되는 주입전류 분배회로 2차측의 전류파형과 FFT 분석 결과로서 고조파성분이 포함되지 않음을 알 수 있다. (f)는 추진전동기 입력전류 파형으로서 전류주입회로를 사용하지 않는 경우에 비해 크게 개선되었음을 볼 수 있다.

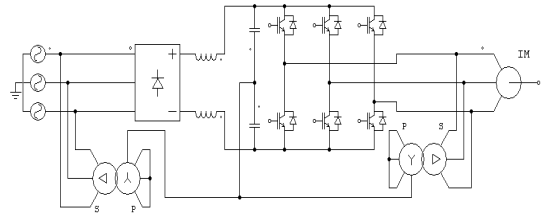
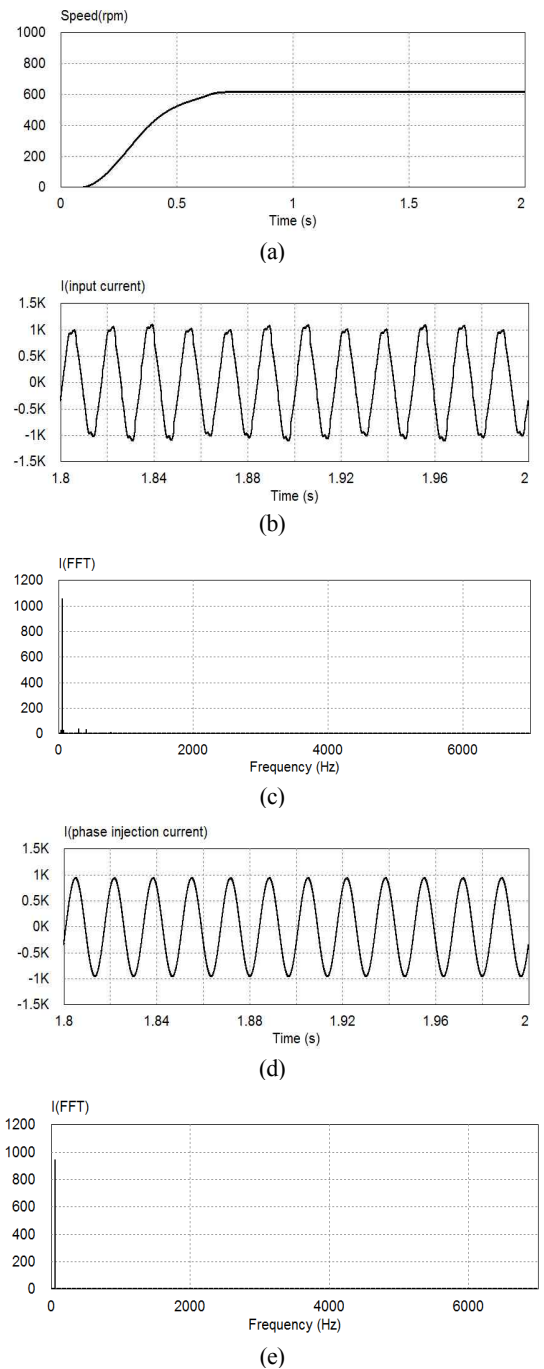


Fig. 6. Electric propulsion system with current injection.



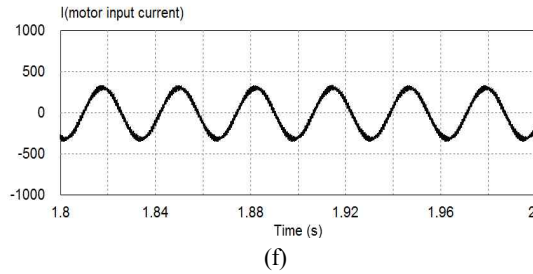


Fig. 7. Simulation responses for using current injection
 (a) Motor speed (b) Input current (c) FFT of input current (d) Injection current of phase (e) FFT for injection current of phase (f) Input current of propulsion motor.

6. 결론

전기추진선박의 전력변환장치에 있어서 정류부는 다이오드를 이용한 일반적인 정류회로를 사용함으로써 입력 전류 파형에 고조파 성분이 포함되어 대전력이 공급되는 전기기기 및 회로에 좋지 않은 영향을 끼치고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기존의 다이오드 소자를 이용하는 정류회로에 두 개의 전류주입 네트워크, 전류주입 장치 및 주입전류 분배회로를 포함하는 새로운 전류주입방식을 적용함으로써 이상적인 정현파의 전류를 출력할 수 있도록 하여 정류기 및 추진전동기 입력전류의 파형을 개선하여 고조파를 저감하였다. 또한, 전류주입 네트워크와 전원 및 부하를 Wye-Delta 변압기를 통해 절연함으로써 전기적 안전성을 확보 하였다. 제안한 방식의 유효성을 입증하기 위해 기존의 다이오드 정류기를 이용하는 시스템과 제안된 방식을 이용하는 시스템을 대형선박의 실선시스템에 적용하여 시뮬레이션 하였으며 정류기 입력측 전류와 주입전류에 포함된 고조파를 분석한 결과에서 제안된 전류주입회로를 사용하는 전력변환시스템에서 고조파가 현저히 저감됨을 확인할 수 있었으며 추진전동기의 입력전류 파형 또한 개선됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] 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.
 [2] Lawrance, W. B. and W. Mielczarski(1992), Harmonic current reduction in a three phase diode bridge rectifier, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 39, no. 6, pp.

571-576.

[3] Maswood, A.(2003), Optimal harmonic injection in thyristor rectifier for power factor correction IEE Proc, Electric Power Application, pp. 615-624.
 [4] Pejovic, P. and Z. Janda(1999), An analysis of three phase low harmonic rectifiers applying the third harmonic current injection, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 3, pp. 397-407.
 [5] WU, BIN(2006), *High-Power Converters and AC Drives*, IEEE Press/Wiley-Interscience, New York, 2006.
 [6] Zobaa, A. F.(2004), A new approach for voltage harmonic distortion minimization, Electric Power Systems Research 70, pp. 253-260.

원고접수일 : 2012년 05월 23일
 원고수정일 : 2012년 06월 26일
 게재확정일 : 2012년 08월 24일