

AFE 방식 3상 PWM 정류기의 직류 출력파형 개선에 관한 연구

전현민* · 윤경국** · 김종수***†

*, *** 한국해양대학교, ** Seanet(주)

A Study to Improve the DC Output Waveforms of AFE Three-Phase PWM Rectifiers

Hyeon-Min, Jeon* · Kyoung-Kuk, Yoon** · Jong-Su, Kim***†

*, *** Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

** R&D Center, Seanet Co., LTD, Busan 49109, Korea

요약 : 선박에서 배출되는 환경오염물질 저감 및 연료 소비를 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 기존의 전력망과 신재생에너지를 연계 시킬 수 있는 직류배전시스템의 한 부분인 전력변환시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 전력변환장치로 주로 사용되고 있는 다이오드 정류기는 부하의 입력전류에 많은 저차고조파가 포함되어 공급전압의 왜곡을 초래하고 전체시스템의 전력품질을 저하시킨다. 일정하지 않은 출력 전압파형은 발전기, 부하기기 등에 오작동 유발 및 인버터 단의 스위칭 소자에 영향을 미치며 스위칭 손실을 증가 시킨다. 본 논문에서는 AFE(Active Front End) 방식 PWM(Pulse Width Modulation) 정류기의 직류출력, 입력 전원의 역률 및 총고조파왜형률(Total Harmonic Distortion)을 개선하기 위해서 PLL회로를 사용한 제어를 설계하였고, 시뮬레이션 결과 직류 출력 전압 파형과 입력전원의 역률이 기존 보다 개선되었으며 총고조파왜형률 또한 IEEE Std514-2014 규정에 적합한 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 전력변환시스템, AFE, 펄스폭 변조기법, 직류 링크단, PLL

Abstract : Many studies have been conducted to reduce environmental pollution by ships and reduce fuel consumption. As part of this effort, research on power conversion systems through DC distribution systems that link renewable energy with conventional power grids has been pursued as well. The diode rectifiers currently used include many lower harmonics in the input current of the load and distort supply voltage to lower the power quality of the whole system. This distortion of voltage waveforms causes the malfunctions of generators, load devices and inverter pole switching elements, resulting in a large number of switching losses. In this paper, a controller is presented to improve DC output waveforms, the input Power Factor and the THD of an AFE type PWM rectifier used for PLL. DC output voltage waveforms have been improved, and the input Power Factor can now be matched to the unit power factor. In addition, the THD of the input power supply has been proven by simulation to comply with the requirements of IEEE Std514-2014.

Key Words : Power Conversion System, Active Front End (AFE), Pulse Width Modulation (PWM), DC-Link, Phase Locked Loop (PLL)

1. 서론

최근 친환경 에너지의 활용에 대한 관심이 증가함에 따라 태양광, 풍력 등의 신재생에너지를 이용하여 생산된 전력을 기존의 전력망에 연결시키는 마이크로그리드 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 선박에서도 환경 오염물

질 배출 저감 및 에너지 절감을 위해 기존의 선박 전력원과 배터리, 태양광, 연료전지 등의 친환경 에너지원을 같이 연계해서 사용할 수 있는 직류 배전시스템이 연구 개발되어 적용되고 있다.

기존의 운항중인 선박에서 교류를 직류로 변환하기 위한 전력변환장치로 사용하고 있는 다이오드나 사이리스터를 이용한 정류기는 비선형 부하의 입력 전압과 전류에 높은 고조파(Harmonic) 포함, 역률(Power Factor) 저하 및 잡음이 많이 포함된 직류 출력 등의 문제를 발생시킨다(Kim, 2011). 그

* First Author : jhm861104@gmail.com, 051-410-4193

† Corresponding Author : jongskim@kmo.ac.kr, 051-410-4831

리고 직류 출력파형을 개선하기 위한 수동필터를 추가하거나 입력 전원의 고조파 저감을 위해 상천이변압기를 설치해야 하는 단점이 있다(Shukla, 2016).

반면에 PWM 정류기는 입력전류를 정현적으로 제어 가능하여 입력전류에 포함되는 고조파의 크기를 줄일 수 있고, 정류기를 양방향 컨버터로 사용 가능하며 입력 전압과 전류의 역률 제어가 가능하다(Kim et al., 2012). 또한, 제어기의 설계를 통하여 PWM 정류기 각 단 소자의 스위칭을 제어하여 직류 파형의 출력을 개선 할 수 있다(Wang and Qi, 2013).

따라서 본 논문에서는 전원전압 위상의 정확한 검출을 위한 PLL(Phase Locked Loop)기법을 제어회로에 적용한 새로운 AFE 방식 PWM 정류기를 제안하였으며, DC-Link단 직류 출력전압 파형과 전원의 역률을 개선하였고 규정에 적합한 총 고조파왜형률 값을 시뮬레이션을 통해 도출하였다.

2. AFE 방식 PWM 정류기 개요

AFE 방식 PWM 정류기는 기존 정류기의 다이오드나 사이리스터 소자 대신 전력용 스위칭 소자인 IGBT, MOSFET 등을 사용하고, 제어기를 통해 전원 전압의 크기 및 부하에 따라 능동적으로 정류를 행하는 제어기법을 사용한다. 이러한 AFE 방식 PWM 정류기를 사용함으로써 DC-Link단 전압의 제어, 부하 변동 시 출력 전압의 일정한 유지, 정류기 입력 역률 제어, 입력 전류에 포함된 고조파 제거 등의 장점을 가진다(Keyhani, 2011).

AFE 방식 PWM 정류기의 기본 구조는 Fig. 1과 같다.

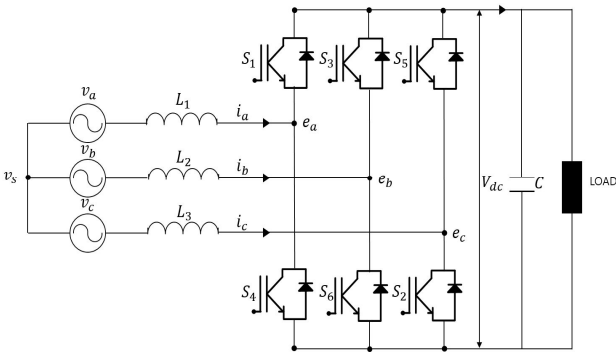


Fig. 1. Configuration of AFE type PWM rectifier.

정류기는 3개의 레그로 이루어져 있으며, 각 레그에 2개의 스위칭 소자가 직렬로 연결되어 있는 구조를 가진다. 각 레그의 두 소자는 서로 번갈아 가며 온/오프하는 상보적인 스위칭을 한다. 스위칭 소자의 작동을 위한 신호를 발생시키기 위해 제어기를 설계하고, 제어기에서 발생한 출력 신호는 SPWM이나 SVPWM 등의 변조 방식을 거쳐 최종적으로

정류기 스위칭 소자를 작동하게 하는 신호로 사용된다.

3. AFE 방식 PWM 정류기의 수학적 모델링

v_a, v_b, v_c 는 3상 교류전원이며, 인덕터 'L'은 전력변환을 위한 입력측 전류조정을 위해 사용된다. 그리고 정류기 출력측의 커패시터 'C'의 설치로 급격한 전압변동에도 DC-Link단에 안정된 전압출력을 유지한다.

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (1)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

Fig. 1의 AFE 방식 PWM 정류기를 전압방정식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (3)$$

$$v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (4)$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (5)$$

여기서, v_a, v_b, v_c 는 a, b, c 상의 전원전압, i_a, i_b, i_c 는 각 상의 입력 전류, e_a, e_b, e_c 는 정류기 입력전압을 말한다.

3상 교류전원은 위 식(3)-(5)와 같이 시변 특성을 갖는 미분방정식으로 표현되어 해석에 어려움이 있으므로 좌표변환 기법을 적용해 동기회전좌표계 d-q축으로 표현하면 시변계수는 제거되고 일정한 계수를 갖는 시불변 미분방정식으로 변환되어 AFE 방식 PWM 정류기의 해석이 간략해진다(Kim, 2016).

abc 좌표계의 3상 변수를 정지좌표계 $\alpha - \beta$ 축으로 변환하는 행렬식은 다음 식(6)과 같다(Krause et al., 2002).

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

이 때 $\theta = 0^\circ$ 로 하여 a축과 α 축을 일치시키고 영상분을 무시하면 식(7)과 같다.

변환을 통해 구한 전압값을 나타낸다.

$$v_d = V(\cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta') = V\cos(\theta - \theta') \quad (17)$$

$$v_q = V(-\cos\theta\sin\theta' + \sin\theta\cos\theta') = V\sin(\theta - \theta') \quad (18)$$

따라서 $\theta = \theta'$ 인 경우 기준축에 직교하는 q축 전압의 값을 0이 되도록 조정하면 식(19), (20)과 같은 결과를 얻을 수 있으며 식(19), (20)을 통해 전원전압의 위상차 θ 를 구한다.

$$v_d = V\cos(\theta - \theta') = V \quad (19)$$

$$v_q = V\sin(\theta - \theta') = 0 \quad (20)$$

PLL 회로가 추가된 AFE 방식 PWM 정류기 제어기 구성은 Fig. 4와 같다.

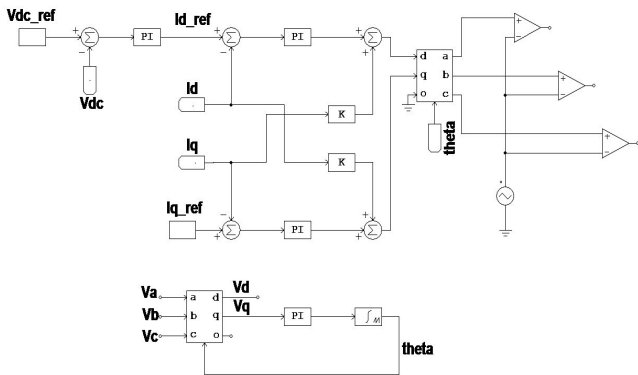


Fig. 4. The controller of AFE type PWM rectifier with added PLL circuit.

전류제어기를 통해 d축 전류 지령값과 실제 전류값의 d축 전압 출력값을 구하고, 정류기 스위칭 신호 발생을 위해 d-q 축 전압 출력값을 다시 3상 abc 값으로 변환한다. 이 과정에서 좌표변환을 위해 정확한 전원전압 위상각 θ 가 필요하며 PLL 회로를 사용하여 전원전압 위상각과 동일한 θ 를 빠르게 구할 수 있고, 전원 전압과 전류의 역률 제어도 가능하다.

5. 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 구성한 회로의 파라미터 정수는 Table 1과 같으며, 객관적인 비교를 위해 기존 방식의 PWM 정류회로와 제안된 방식의 PWM 정류회로에 동일한 파라미터 정수를 적용하여 시뮬레이션 결과를 도출하였다

Table 1. Circuit parameter for simulation

Input Voltage	690[V]
Frequency	60[Hz]
Capacitor	2000[μ F]
Load resistor	50[Ω]
Switching Frequency	20[kHz]

Fig. 5는 기존의 AFE 방식 PWM 정류기의 전체 구성을 나타내며, 영점교차회로를 사용하여 전원전압 위상각 θ 를 구한다.

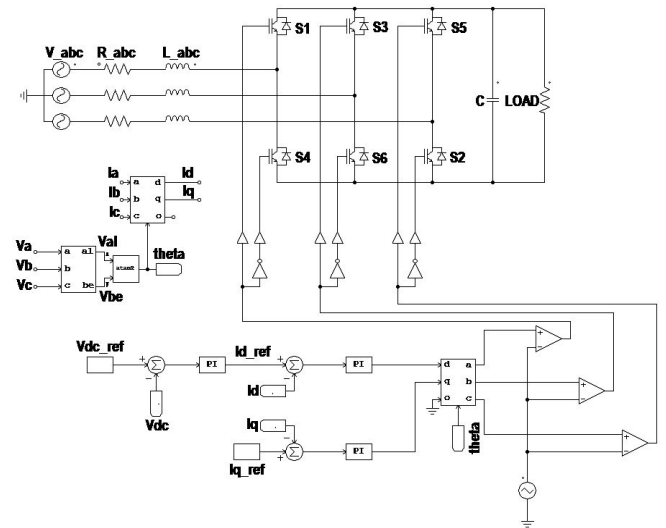


Fig. 5. Overall configuration of conventional AFE PWM rectifier.

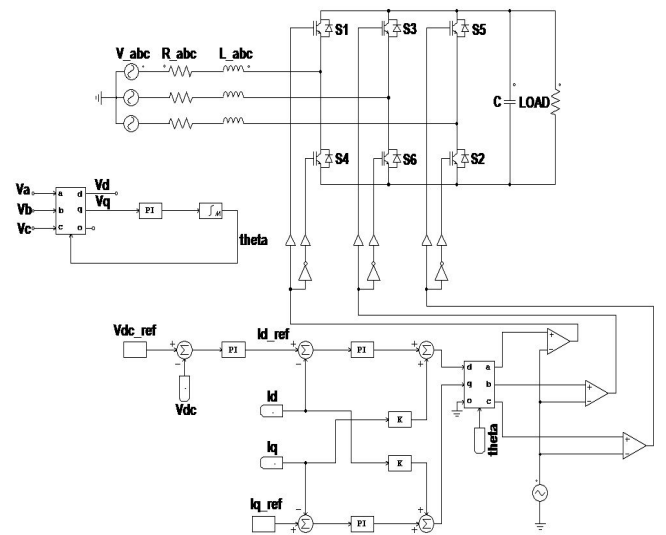


Fig. 6. Overall configuration of proposed AFE PWM rectifier.

Fig. 6은 본 논문에서 제안하는 전원전압 위상각 제어를 위해 PLL 기법을 사용한 새로운 AFE 방식 PWM 정류기의 전체 구성이며, Fig. 7은 3상 전원과 인덕터, 6개의 IGBT 스위칭 소자로 구성된 AFE 방식 PWM 정류기의 전력변환회로이다.

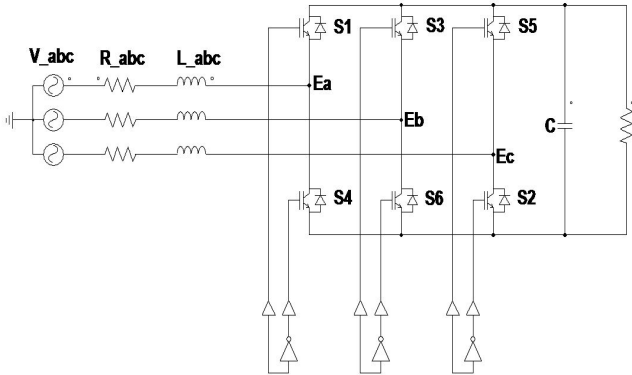


Fig. 7. Schematic diagram of AFE type PWM rectifier.

또한, Fig. 8은 PLL 기법을 적용한 AFE 방식 PWM 정류기의 제어기 구성을 나타내었으며 제어기를 통해 구해진 값은 최종적으로 정현파 펄스폭변조기법을 사용하여 스위칭 소자를 작동시키는 신호를 생성한다.

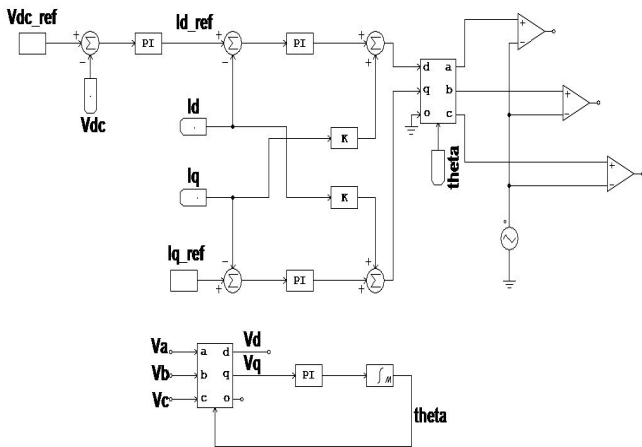


Fig. 8. Schematic diagram of Controller for AFE type PWM rectifier.

Table 1에 제시된 파라미터 정수로 AFE 방식 PWM 정류기 회로를 구성하였으며, DC-Link단의 기준 출력전압은 1000[V]로 설정하여 시뮬레이션 하였다.

먼저 Fig. 9는 기존의 영점교차회로를 이용한 AFE 방식 PWM 정류기 회로의 교류 입력전압과 전류 파형을 나타낸

것이고, Fig. 10은 제안된 PLL 기법을 이용한 AFE 방식 PWM 정류기의 교류 입력전압과 전류 파형을 시뮬레이션 한 결과이다. 정상상태 시의 3상 교류입력 중 a상의 전원전압과 전류 파형을 나타낸 결과로서 Fig. 9는 입력 전압과 전류의 위상에 차이가 발생하며, Fig. 10은 입력 전압과 전류가 동위상으로 제어됨을 알 수 있다.

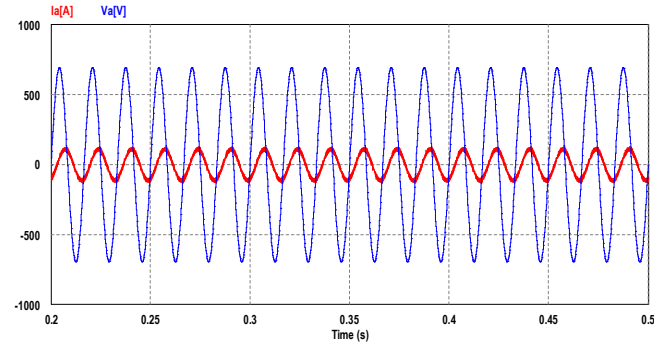


Fig. 9. Simulation result of input voltage and current waveforms for conventional AFE type PWM rectifier.

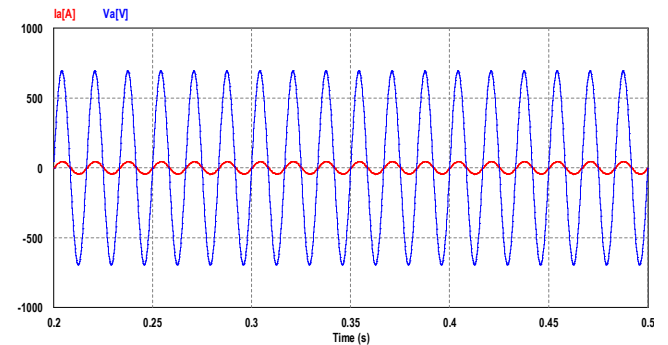


Fig. 10. Simulation result of input voltage and current waveforms for proposed AFE type PWM rectifier.

또한 정류기 출력 DC-Link단의 직류 출력전압 파형의 개선 정도를 확인하기 위하여 기존의 영점교차회로를 이용한 AFE 방식 PWM 정류기와 PLL회로를 이용하는 AFE 방식 PWM 정류기를 사용하여 시뮬레이션을 비교 분석하였다. Fig. 11은 기존 회로를 이용하여 시뮬레이션 한 DC-Link단 직류 출력전압 파형이며, Fig. 12는 제안된 PLL 기법을 적용한 AFE 방식 PWM 정류기의 DC-Link단 직류 출력전압 파형을 나타낸 것이다. Fig. 11과 같이 기존의 회로는 초기 DC-Link단 직류 출력전압 파형이 크게 헌팅하며, 정상상태 시에도 목표값에서 약 $\pm 5\%$ 정도의 오차를 갖지만, Fig. 12의 제안된 회로는 DC-Link단 직류 출력전압 파형은 목표값과의 정상상태 오차가 거의 없음을 알 수 있다.

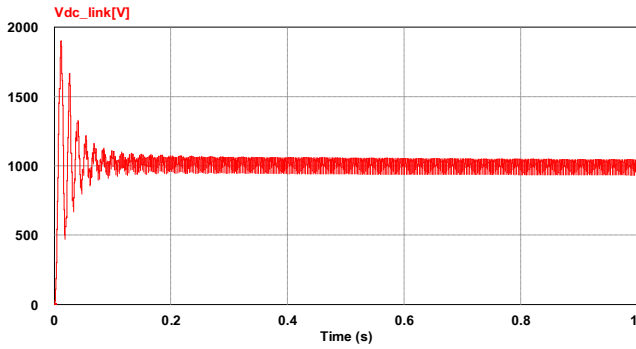


Fig. 11. Simulation result of DC-Link voltage for conventional AFE type PWM rectifier.

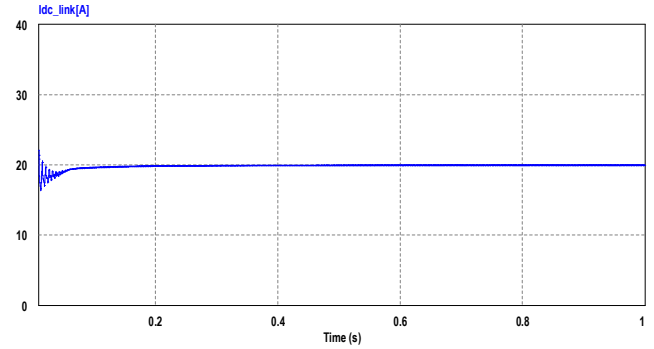


Fig. 14. Simulation result of DC-Link ampere for proposed AFE type PWM rectifier.

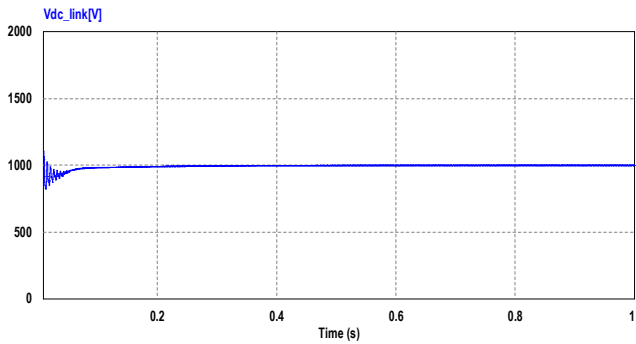


Fig. 12. Simulation result of DC-Link voltage for proposed AFE type PWM rectifier.

Fig. 13과 Fig. 14는 DC-Link단 직류 출력전류 파형으로서 직류 출력전압 파형과 동일하게 제안된 AFE 방식 정류기가 기존 방식의 정류기 회로의 출력 전류파형 보다 목표값까지의 상승시간이 빠르고 정상상태 오차가 크게 개선된 것을 나타낸다.

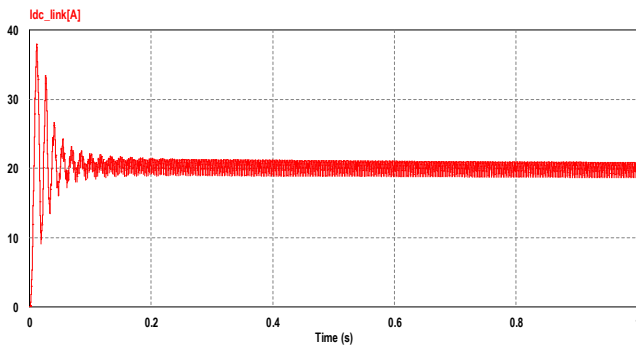


Fig. 13. Simulation result of DC-Link ampere for conventional AFE type PWM rectifier.

Fig. 15과 Fig. 16은 교류 입력단의 총고조파왜형률의 결과로서 기존 방식의 정류기는 총고조파왜형률이 약 4.5% 정도이고, 제안된 방식 정류기는 약 3% 정도의 총고조파왜형률을 보인다. 두 가지 방식의 정류기는 모두 IEEE Std519-2014에 정해진 규정을 만족하지만 제안된 방식을 이용한 정류기의 총고조파왜형률이 더 낮음을 알 수 있고, 이는 고조파로 인해 전체 전력시스템 및 타 기기에 미치는 영향이 감소할 수 있음을 보여준다.

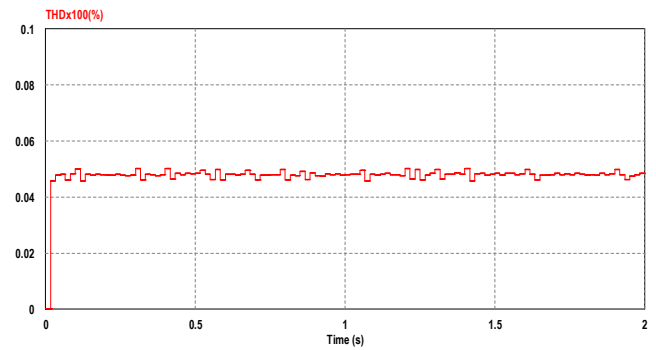


Fig. 15. Simulation result of THD for conventional AFE type PWM rectifier.

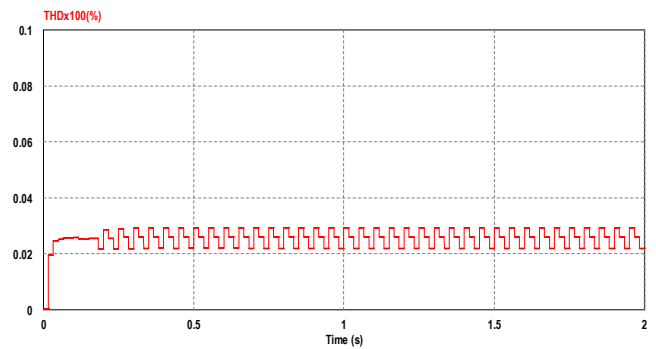


Fig. 16. Simulation result of THD for proposed AFE type PWM rectifier.

Fig. 17은 0[s], 0.8[s], 1.4[s]에서 부하저항의 크기를 $50\Omega \sim 80\Omega \sim 20\Omega$ 로 가변하는 경우의 DC-Link단 직류 출력전압 파형의 시뮬레이션 결과이며, 정상상태에서 부하의 변동에도 약 0.3[s] 후 직류 출력전압 파형이 오차없이 목표값을 추종하였다.

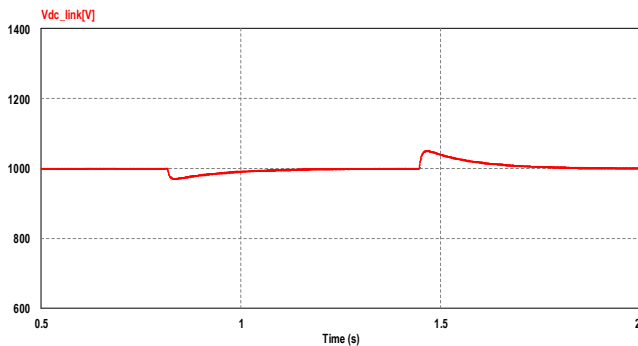


Fig. 17. Simulation result for dynamic response of DC-Link voltage.

6. 결론

전원전압 위상각을 검출하는 PLL 기법을 적용한 AFE 방식 PWM 정류기를 제안하였으며 시뮬레이션을 통해 정류기 성능의 유효성을 입증하였다. 제안된 AFE 방식 PWM 정류기에 전원전압 위상각 검출을 위해 PLL 기법을 적용하였으며, 검출한 위상각을 이용하여 전압과 전류제어기를 설계하고, 정류기 스위칭을 위한 신호는 SPWM 방식을 활용하여 생성하였다. 그 결과 제안하는 AFE 방식 PWM 정류기의 교류입력 전압과 전류 파형의 위상이 동위상으로 제어됨을 보았고, 직류 출력전압 파형의 목표값까지 상승시간과 정상상태 오차가 기존 방식에 비해 개선되었음을 시뮬레이션 결과로서 확인할 수 있다.

또한, 부하 저항의 변화에도 DC-Link단 직류 출력전압 파형이 정상상태 오차없이 목표값을 빠르게 추종하였으며, 이를 통해 제안된 AFE 방식 정류기의 속응성과 제어성이 우수함을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 2015년도 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원(KIMST)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (NO.20150177).

References

- [1] Keyhani, A.(2011), Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems, WILEY, pp. 154-168.
- [2] Kim, J. S.(2011), Harmonic Reduction of Electric Propulsion Ship by Multipulse Drive, Journal of Communications and Networks, Vol. 15, No. 2, pp. 425-431.
- [3] Kim, J. S., J. H Choi, K. K Yun and D. H. Seo(2012), Harmonic Reduction of Electric Propulsion Ship using New Rectification Scheme, Journal of Communications and Networks, Vol. 16, No. 10, pp. 2230-2236.
- [4] Kim, S. H.(2016), Motor Control - DC·AC·BLDC, D.B. Info, pp. 200-201.
- [5] Krause, P. C., O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff(2002), Analysis of electric machinery and drive systems, WILEY-INTERSCIENCE, pp. 109-140.
- [6] Shukla, H.(2016), Vector Control of Three-Phase Active Front End Rectifier, International Journal for Innovative Reserch in Science & Techonology, Vol. 2, No. 9, pp. 261-268.
- [7] Wang, H. and H. Qi(2013), Study of Control Strategies for Voltage-Source PWM Rectifier, Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013), pp. 1268-1271.

Received : 2017. 08. 16.

Revised : 2017. 10. 20.

Accepted : 2017. 10. 28.