

## 전력변환장치의 직류 파형 개선을 통한 고조파 저감

김중수<sup>1</sup> · 안재홍<sup>2</sup> · 김성환<sup>†</sup>

(Received September 2, 2014 ; Revised September 19, 2014 ; Accepted September 24, 2014)

### Harmonics reduction by accuracy of DC shaping of power converters

Jongsu Kim<sup>1</sup> · Jaehong Ahn<sup>2</sup> · Seonghwan Kim<sup>†</sup>

**요약:** 현재 LNG 운반선, 쇄빙선 등의 특수선박과 해양플랜트에 설치되는 전력변환 장치에는 다이오드를 이용하는 정류기가 많이 사용된다. 하지만 정류에 의한 비선형 부하의 입력전류에 많은 고조파가 포함되어 공급 전압파형의 왜곡을 초래한다. 전압파형의 왜곡은 발전기, 변압기, 부하기기 등의 오동작과 전력품질 저하를 초래한다. 본 논문에서는 정류기 사용시의 정류왜곡을 감소시키기 위해서 직류 파형 정형화 회로를 사용하여 개선함으로써 부하에 인가되는 교류 파형을 정확한 정현파로 만든다. 그 결과 전력계통의 전류와 전압 파형에 포함되는 고조파를 저감할 수 있으며 이를 시뮬레이션을 통해 입증한다.

**주제어:** 전력변환장치, 정류기, 고조파, 왜곡, 정형회로

**Abstract:** Recently, power converters installed on the specialized vessels such as LNG Carrier and Icebreaker and offshore plants mainly use diode rectifier. However, such devices cause distortion of supply voltage waveform by involving much harmonics to input current of non linearity load in rectifying operation. Distortion of supply voltage waveform can be problems such as false operation of generator, transformer and load device and deterioration of power quality. This thesis is focusing with a view to producing accurate sinusoidal AC waveform with certain load through improvement of distortion of current waveform causing under operation of rectifier by using accurate circuit of DC shaping.

The result of computer simulation proved that harmonics involved in current and voltage waveform of power system can be reduced.

**Keywords:** Power converters, Rectifier, Harmonics, Distortion, Accurate circuit

## 1. 서론

전력전자기술의 발전으로 컨버터, 인버터 등의 전력변환 장치의 사용이 크게 확대되고 있는 실정이며 선박의 경우에도 근래에 LNG 운반선, 쇄빙선, 해양플랜트 등의 특수선박의 전력시스템에 인버터를 포함한 전력변환장치의 사용이 보편화 되고 있다[1]-[3]. 하지만 선박, 해양플랜트의 전력기기가 대용량의 비선형 부하에 사용되고 또한, 속도와 토크의 제어를 위해서 전력의 변화가 빈번하게 발생하는 관계로 고조파 전류가 크게 포함되어 계통 운영상에 많은 문제점을 야기한다. 발생하는 현상에는 계통 전압의 왜곡률 증가와 발전기, 변압기 및 케이블의 과열과 손상, 전력전자 장비의 오동작 등이 있으며 이는 전력품질에 대한 막대한 손실을 발생시키므로 선진국에서는 관련규정을 도입하여 고조파 발생정도를 제한하고 있다[4]. 국제적으로 많이 사용되

는 규정은 IEEE std. 519-1992, IEEE std. 1531-2003, IEEE std. 1459-2000, IEC 6100 series 등이며 우리나라에서도 관련 규정을 도입하여 대책마련을 하고 있다[5]-[8].

본 논문에서는 기존의 6-펄스 정류기 출력단에 강제 전류 스위치를 설치하여 정류기 출력 직류 파형을 정형시키고 그로 인해 변압기 입·출력측의 전류 파형을 정현파에 가깝게 정형시켜 고조파를 저감한다[9][10].

## 2. 고조파

### 2.1 고조파의 의미

고조파 전압 및 전류는 기본 주파수의 정수배로써, 60[Hz]에 대해서는 5고조파는 300[Hz]이고, 7고조파는 420[Hz]이 된다. 또한, 이러한 고조파 성분이 추가되어 더해진 복합파형이 형성되며 그 구성은 Figure 1과 같다.

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7735-3582>): Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: Ksh@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4265

<sup>1</sup> Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: jongsukim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4481

<sup>2</sup> Korean Register of Shipping, E-mail: ahnnavy72@naver.com, Tel: 070-2799-8841

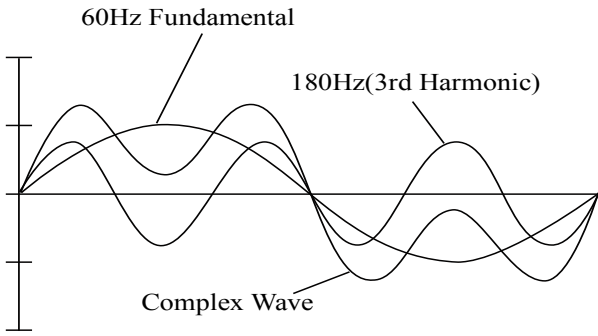


Figure 1: Construction of complex wave

### 2.2 고조파의 특성

전파정류기를 이용한 전력변환장치는 아래 공식에 의해서 주어진 이상적인 특성 고조파 전류를 생성하게 된다.

$$h = np \pm 1 \tag{1}$$

여기서, 각 변수는 다음과 같다.

$h$  = 고조파의 차수

$n$  = 정수 1, 2, 3

$p$  = 사이클 당 전류 펄스 수

Figure 2는 3상 전파 브리지 정류기를 사용하는 전형적인 6-펄스 PWM 교류 구동장치를 보여준다[11].

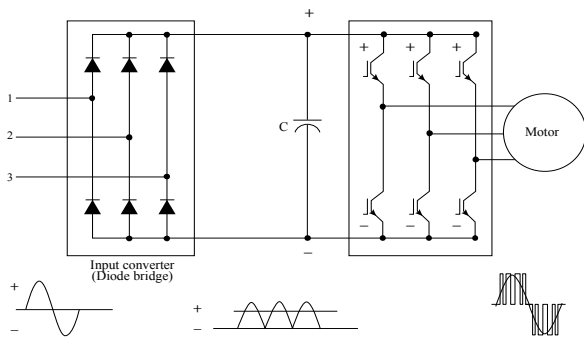


Figure 2: Typical 6-pulse PWM AC drive

6-펄스를 출력하는 3상 전파 브리지 정류기에 의해 발생하는 고조파 전류 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h &= np \pm 1 \\ h &= n \cdot 6 \pm 1 \\ h &= 5, 7, 11, 13, 17, 19... \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, 각 변수는 다음과 같다.

$h$  = 고조파 숫자

$n$  = 상수, 1, 2, 3...

$p$  = 펄스수

또한, 12-펄스 정류기의 고조파 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h &= n \cdot 12 \pm 1 \\ h &= 11, 13, 23, 24, 35, 37... \end{aligned} \tag{3}$$

또한, 전체 고조파 왜곡의 전압 또는 전류의 실효치  $V_{thd}$  와  $I_{thd}$ 는 각각 아래의 수식으로 표현할 수 있다.

$$V_{thd} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \tag{4}$$

$$I_{thd} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \tag{5}$$

6-펄스 및 12-펄스 정류기의 출력 직류 파형에 따라서 고조파의 포함 정도에 차이가 발생한다. 이는 정류된 직류파형의 정형 정도에 따라 고조파 정도가 달라진다는 의미이기도 하다.

## 3. 직류파형의 정형

### 3.1 기존의 방식에 의한 정류

다음 Figure 3에 나타난 방식은 정류기의 출력측 직류 버스단의 전류를 정류기 입력에 주입하여 정류기 출력 파형을 개선하는 방식이다[9][10].

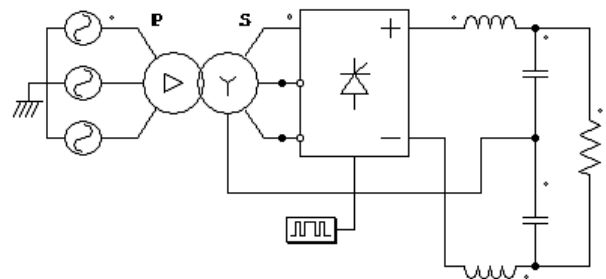


Figure 3: Conventional method by current injection

하지만 이 방식은 직류 링크단의 전압을 상승시키고 전류 총고조파 왜형율의 감소를 제한하는 단점을 가진다.

### 3.2 정형회로를 사용한 정류

Figure 4는 정류기 출력 직류 전류의 파형을 개선하기 위하여 본 논문에서 새롭게 제안하는 정류 방식을 나타내고 있다. Figure 4에서 정류기의 출력 전류인  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ 의 파형을 요구되는 정확한 형상으로 정형하기 위해서 두 개의 강제 전류 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 를 사용한다. 그렇게 함으로써 궁극적으로 전원측의 전류  $I_A$ ,  $I_B$  및  $I_C$ 를 완전한 정현파 전류로 만들 수 있다.

또한, Figure 5는 정류기 출력 전류인  $I_{S1}$ 과  $I_{S2}$ 를 이상적인 직류값인 기준값에 잘 추종할 수 있도록 하는  $s_1$ 와  $s_2$

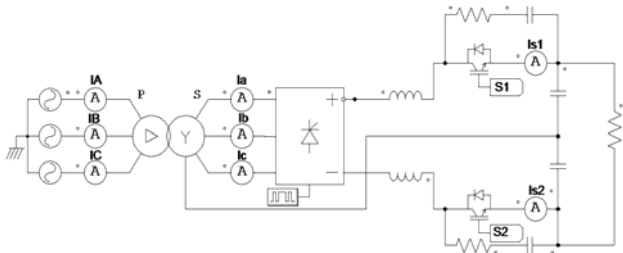


Figure 4: Proposed method with high-quality input/output waveforms.

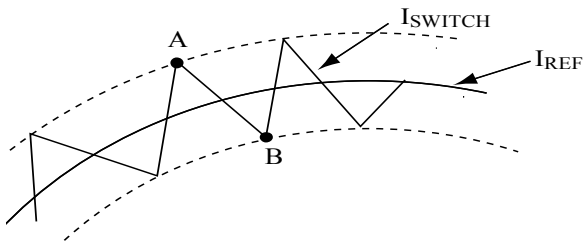


Figure 5: Switching process of  $S_1$  and  $S_2$

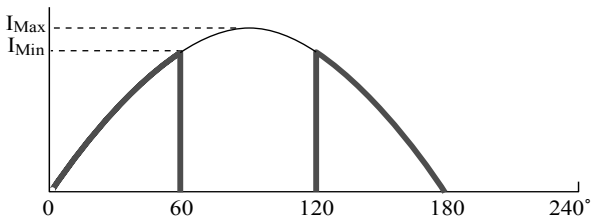


Figure 6: Diagram of the semitriangle current

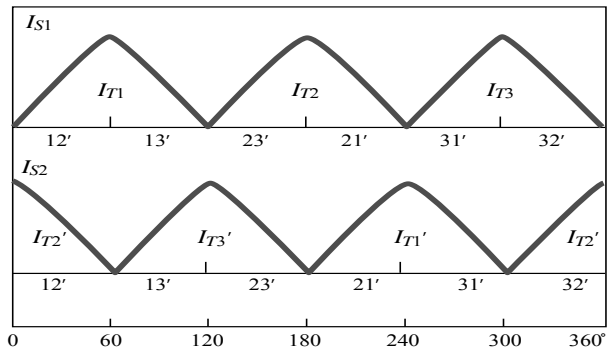


Figure 7: Currents  $I_{S1}$  and  $I_{S2}$

의 스위칭 동작을 보여주고 있다. 출력 전류가 Figure 5의 A 값 보다 상위 밴드를 초과하면 스위치  $S_1$ 이 열리고 스위치 전류는 스너버 회로를 통해 흐르기 시작한다. 또한, B값 보다 하위 밴드 이하로 하강하면 스위치  $S_1$ 는 닫히고 다시 전류가 증가하기 시작한다. 이로 인해 기준값을 추종할 수 있도록 스위치가 동작한다.

Figure 6은 전류 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 을 통해 정형되어야 할 정류기 출력 전류파형의 형상을 보여준다.  $I_{Max}$ 는 스위치를 이용하여 정형해야 할 전류파형의 최대치이다.

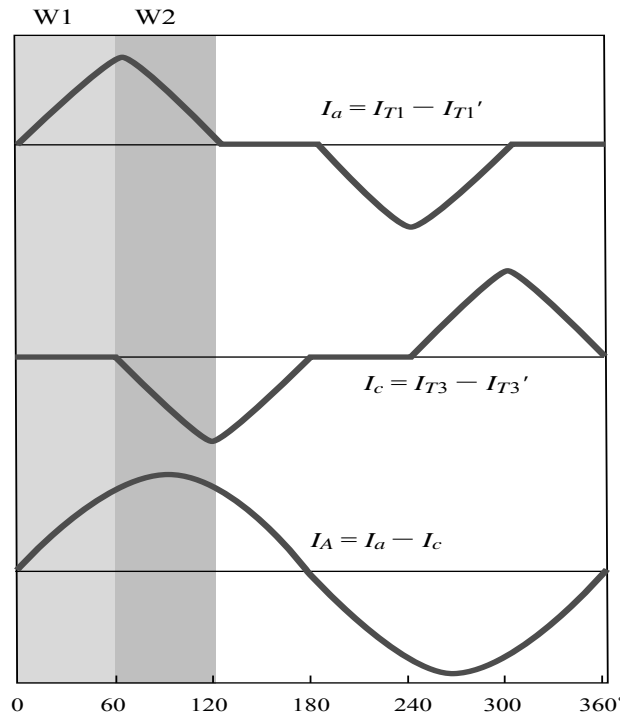


Figure 8: Construction of the input current  $I_A$

Figure 4와 같은 회로에서 정류기 입력 전류  $I_a$ ,  $I_b$  및  $I_c$ 의 모양은 통상적으로 6-펄스 전파정류기의 출력 교류 라인 전류이다. 이 회로에서 만약 리플이 발생하지 않는다면 전류파형의 상부가 평평한 형상이 될 것이다. 하지만 본 논문에서 제안된 강제 스위칭 방식을 사용하면 Figure 7의 전류  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ 의 파형 형상으로 인해 정류기 입력 전류인  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ 는 Figure 8과 같은 혹 모양이 된다.

상기에서 설명한 파형정형 원리를 종합하면 Figure 8과 같이 나타낼 수 있다. 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 에 의한 스위치 출력 전류인  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ 가 Figure 5와 같은 스위칭 동작을 통해 완전히 정형화 되면, 정류기 출력 전류 파형의 모양은 혹 모양을 띄게 되고 전원측의 입력전류인  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ 는 이상적인 정현파를 나타낼 것이다.

정형된 정류기 출력전류 파형  $I_a$ ,  $I_c$ 에 의해서 순수한 정현파인  $I_A$ 가 되는 과정인  $W_1$ ,  $W_2$ 창을 식 (6)과 식 (7)을 통해 나타내고 있다.

$W_1$ 창 :

$$I_A = I_{max} \sin(\omega t) \quad (6)$$

$W_2$ 창 :

$$I_A = I_{max} \sin(\omega t + 60^\circ) + I_{max} \sin(\omega t - 60^\circ) \quad (7)$$

앞서 언급한 바와 같이, 직류 레일의 +, - 측에 직렬로 배치된 스위치는 전류  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$ 가 온/오프 동작에 의해 미

리 설정된 기준치를 추종하게 한다. 따라서 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 완벽한 전류원이 되고, 교류 및 직류 전류 성분은 페루프를 형성하여 전류원 주위를 자유롭게 순환한다.  $I_{S1}$ 과  $I_{S2}$ 의 직류 성분은 동일하지만 교류 성분은 서로 상이하다.

### 4. 시뮬레이션

#### 4.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 정류기 출력단에 강제 전류 스위치를 설치하여 6-펄스 정류기의 출력 직류 파형을 개선을 통한 정류기 입력 교류전류에 포함되는 고조파를 저감하는 방식을 제안하였으며, 제안한 방식의 유효성을 입증하기 위해서 기존의 파형 정형회로를 사용하지 않는 전류주입 방식과 총고조파 왜형율의 크기를 측정하여 비교하였다. 시뮬레이션을 위해 구성한 회로의 파라미터값은 다음 Table 1과 같다.

Figure 10은 기존 정류장치의 정류기 입력측 전류  $I_a$ ,  $I_c$ 와 전원측 전압  $V_A$ , 전류  $I_A$  및  $I_A$ 의 총고조파 왜형율을 나타내고 있으며, Figure 11은 본 논문에서 제안하는 파형 정형회로를 사용한 경우의 정류기 입력 전류  $I_a$ ,  $I_c$ 와 전원측 전압  $V_A$ , 전류  $I_A$  및  $I_A$ 의 총고조파 왜형율을 나타내고 있다. 파형 정형회로를 사용하는 경우의 입력전류가 사용하지 않는 기존의 정류 방식의 출력에 비해 보다 완전한 정현파로 개선됨을 Figure 10과 Figure 11의 (a), (b), (d)를 통해서 볼 수 있으며, 총고조파 왜형율도 기존 정류방식을 사용하는 경우의 32[%]에 비해 2.5[%]로 저감됨을 알 수 있다.

또한, Figure 9는 정류기 출력 직류 파형의 개선을 위해 새롭게 제안하는 방식의 시뮬레이션 구성도이다.

Table 1: Circuit model for simulation

Input Voltage	380[V]
Frequency	60[HZ]
Load	13[Ω]
Output Power	6300[kVA]

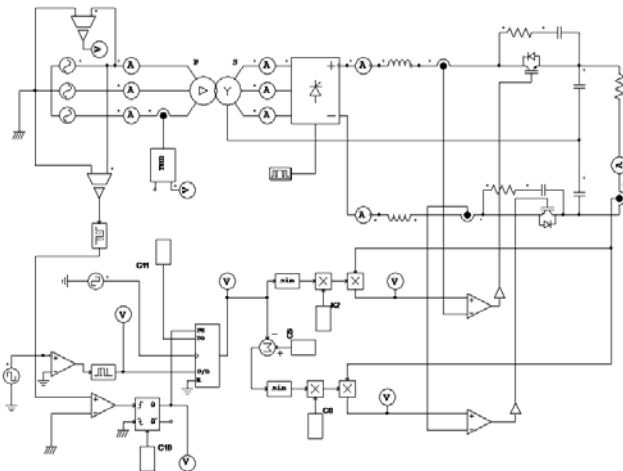


Figure 9: Simulation diagram of the proposed method

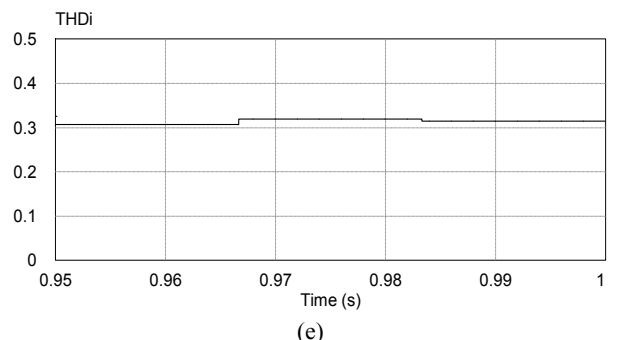
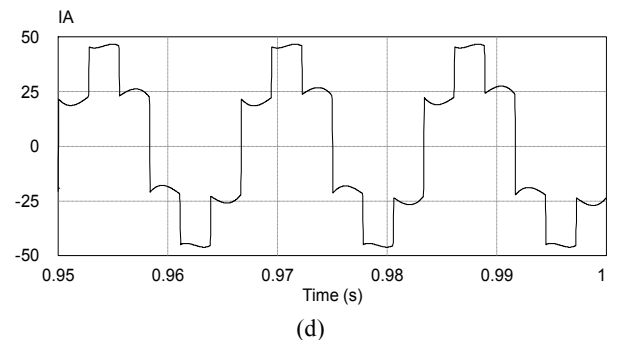
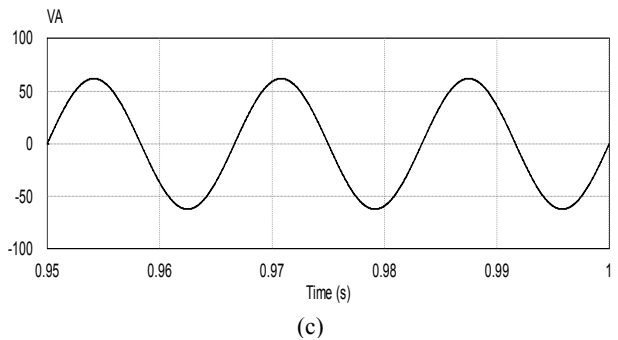
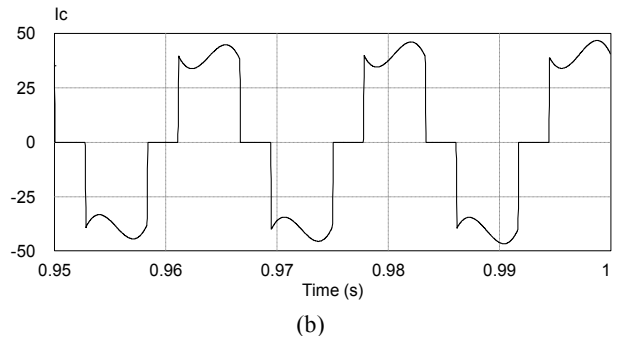
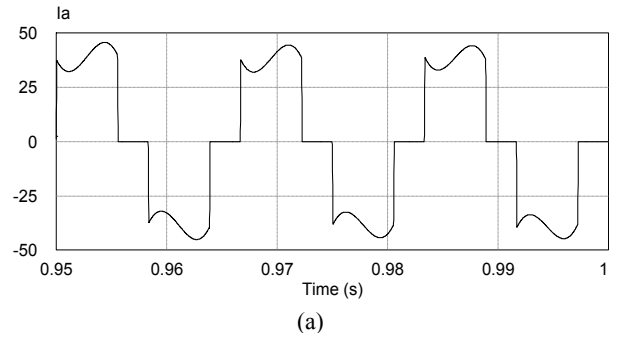


Figure 10: Rectifier input current  $I_a$ ,  $I_c$ , source voltage  $V_A$  & current  $I_A$  and THD of  $I_A$  by conventional method

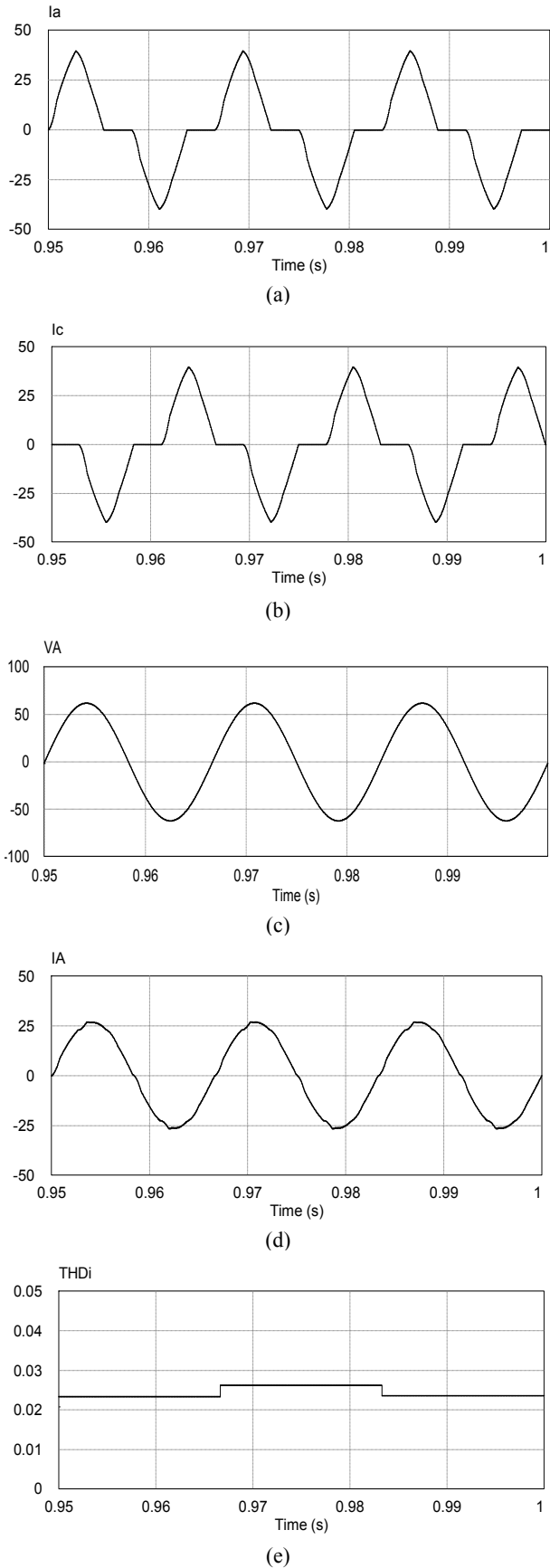


Figure 11: Rectifier input current  $I_a$ ,  $I_c$ , source voltage  $V_A$  & source current  $I_A$  and THD of  $I_A$  by proposed method

#### 4. 결 론

기존의 고조파 저감은 배선방식의 개선, 변압방식의 배선, 입력과 부하측에 필터 설치, 직·교류 라인에 리액터 설치 등의 방식을 사용하여 전류 공급라인상의 고조파를 제거하고자 하였다. 반면에 본 논문에서는 전력변환장치의 직류측 회로의 개선을 통해 변환 되어지는 직류파형 자체를 개선함으로써 전기추진 전력계통의 고조파 측정 위치 PCC (Point of common coupling)인 입력 변압기측의 고조파를 저감하고자 하였다.

본 논문에서는 6-펄스 정류기의 출력 전류의 파형을 정확한 정현파의 형상으로 정형하기 위해서 직류측 회로에 두 개의 강제 전류 스위치를 사용하였다. 그로 인해 직류파형의 개선과 더불어 결과적으로 전원 입력측의 삼상 교류 전류를 완전한 정현파 전류로 만들어서 고조파 저감 효과를 얻을 수 있었다.

#### References

- [1] S. Bernet, "Recent developments of high power converters for industry and traction applications," IEEE Transaction on Power Electron, vol. 15, no. 6, pp. 1102-1117, 2000.
- [2] A. V. Meier, Electric Power Systems, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [3] B. Wu, High-Power Converters and AC Drives, New York, USA: IEEE Press/Wiley- Interscience, 2006.
- [4] G. J. Wakileh, Power systems Harmonics, New York, USA: Springer, 2001.
- [5] IEEE, "1991 Guide for harmonics control and reactive compensation of static power converters," U.S. IEEE Standard 519, 1992.
- [6] IEEE, "Guide for application and specification of harmonic filters," U.S. IEEE Standard 1531, 2003.
- [7] IEEE, "Measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced copnditions," U.S. IEEE Standard 1459, 2000.
- [8] IEC, Limits for Harmonic Current Emissions, U.S. IEC 610003-2, 2005.
- [9] P. Pejovic and Z. Janda, "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, 1999.
- [10] P. Pejovic and Z. Janda, "A novel harmonic-free three-phase diode bridge rectifier applying current injection," Proceedings of the IEEE Applied Power Electronic Conference, pp. 241-247, 1999.
- [11] S. Hansen, P. N. Enjeti, J. Hahn, and F. Blaabjerg, "An integrated single-switch approach to improve

harmonic performance of standard PWM adjustable-speed drives,” IEEE Transaction on Industry Application, vol. 36, no. 4, pp. 1189-1196, 2000.