

새로운 영상전류 주입법에 의한 다이오드 정류기의 고조파 저감

金鉉正, 張敏洙, 崔世琬*, 元忠淵, 金奎植

Harmonic Reduction of Diode Rectifiers by a New Zero-Sequence Current Injection Method

Hyunjung Kim, Minsoo Jang, Sewan Choi, Chungyeun Won, and Gysuk Kim

요 약

본 논문에서는 영상고조파 주입법을 사용하여 3상 다이오드 정류기의 입력전류를 개선하는 새로운 방식의 고조파 저감기술을 제안한다. 3고조파 주입을 근간으로 하는 본 방식은 다이오드 정류기의 상측과 하측의 전류를 독립적으로 제어하기 위하여 두 대의 단상 반파 인버터와 두 대의 단상 변압기로 구성되어 있다. 이렇게 만들어진 영상전류는 zigzag 변압기에 의해서 다이오드 정류기의 상측과 하측으로 주입이 되어진다. 이 결과 3상 다이오드 정류기의 입력전류는 순수한 정현파 전류가 된다. 본 방식의 타당성을 1.5kVA 시작품의 실험을 통하여 입증하였다.

ABSTRACT

In this paper a new harmonic reduction method of three-phase diode rectifiers is proposed to improve input current performance using the zero-sequence harmonics injection technique. The proposed method, based on the third-harmonic injection, employs two half-bridge inverters and two single-phase transformers to independently shape the positive and negative dc rail currents of the diode rectifier. The actively shaped zero-sequence harmonic currents are then circulated through the ac side of the rectifier using a zigzag transformer. This results in pure sinusoidal input currents in the three-phase diode rectifier. Experimental results on a 1.5kVA prototype are provided to validate the proposed technique.

Key Words : current injection, harmonic reduction, three-phase diode rectifiers

1. 서 론

최근 전력변환장치의 사용이 증가되어감에 따라 다

이오드 정류기의 입력전류 고조파에 의한 문제가 심각히 대두되고 있으며 이에 대한 각국의 고조파 규제가 강화되고 있다. 이러한 고조파를 저감하기 위한 연구와 실용화가 진행되고 있는데 대표적인 기술로는 1) 능동전력필터 2) 6-스위치 PWM 정류기 3) Boost 컨버터에 의한 역률개선 4) 다중화 방식 5) 전류주입 방식 등이 있으며 이들 방식의 장단점 비교는 문헌^[1]에 자세히 서술되어 있다. 이러한 방식 중에서 전류주입에 의한 고조파 저감방식은 고조파 보상특성이 비교적

*서울산업대학교 제어계측공학과 조교수

E-mail : schoi@snut.ac.kr

접수일자 : 2002. 8. 1

1차심사 요청일 : 2002. 8. 5

심사완료일 : 2002.10.18

양호하며 응용대상에 따라 비용이 다소 낮고 중·대용량급에도 적용이 가능한 장점이 있다.

이 전류주입방식은 Bird^[2]와 Ametani^[3]에 의해 제안된 3차 고조파 주입방식을 근간으로 주입전류의 발생과 분배방식에 따라 여러 가지 형태의 것들이 있다^[4]. 이러한 고조파 주입방식 중 그림 1과 같이 1대의 Boost 컨버터로 3차 고조파 전류를 발생시키고 zigzag 변압기로 이 전류를 분배하여 주입하는 문헌^[5]의 방식은 1개의 스위치를 사용하므로 제어가 간단하며 주전력의 흐름에 직렬로 소자가 연결되어 있지 않아 전력손실이 적다. 하지만 이 방식에서 입력전류의 고조파 왜율은 직류측 인덕턴스에 영향을 받기 때문에 충분히 큰 인덕턴스를 사용하여야 한다. 또한 입력전류를 순수한 정현파로 만들기 위하여 3차 고조파 이외의 다른 영상고조파 성분을 정류기 직류단 상측과 하측에 각기 다른 모양으로 주입시켜 줘야 하는데 이 방식으로는 상측과 하측의 두 인덕터 전류를 각각 독립적으로 제어할 수 없으므로 이 방식에 의한 고조파 왜율(Total Harmonic Distortion: THD)의 개선은 한계가 있다. 또한 그림 2와 같이 2대의 Boost 컨버터로 3차 고조파 전류를 주입하여 고조파를 저감하는 방식^[6]이 있는데, 이 방식에 의하여 상측과 하측의 인덕터 전류를 각각 제어하여 입력전류의 THD를 더욱 개선할 수 있다^[7]. 그러나 이 방식은 주전력의 흐름에 직렬로 연결된 다이오드에서 발생하는 손실 때문에 효율이 떨어진다. 더욱이 이 방식은 Boost 동작에 의해 직류측 DC 링크 전압이 상승하므로 정류기 부하로 사용되는 인버터 등의 스위칭소자의 손실과 전압정격이 상승되어 인버터부의 재설계가 요구된다.

본 논문에서는 이러한 두 방식의 단점을 극복하기 위하여 다이오드 정류기에 단상 인버터와 변압기로 구성되는 보조회로를 이용하여 전류를 주입함으로써 순수한 정현파 입력전류를 얻을 수 있는 새로운 방식의 고조파 저감기술을 제안한다. 본 방식의 특징은 다음과 같다.

- 3차 고조파 이외에 영상고조파를 주입하여 순수한 (pure) 정현파 입력전류를 얻을 수 있다.
- 주전력의 흐름에 직렬로 스위칭소자가 연결되지 않아 전력손실이 적다.
- 보조회로에서 사용하는 단상 인버터의 전류 정격이 매우 작다.
- Boost 동작을 하지 않으므로 부하측 인버터부의 재설계가 필요없다.

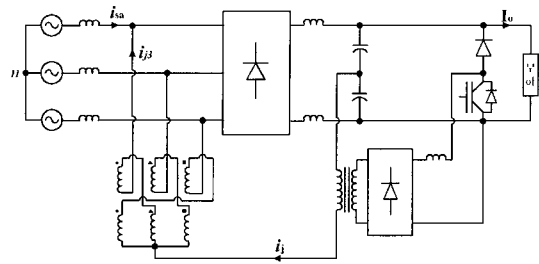


그림 1 1대의 Boost 컨버터에 의한 전류주입방식^[5]
Fig. 1 Current injection method by a boost converter^[5]

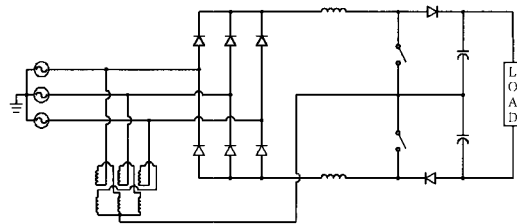


그림 2 2대의 Boost 컨버터에 의한 전류주입방식^[6,7]
Fig. 2 Current injection method by two boost converters^[6,7]

2. 제안하는 영상전류 주입법

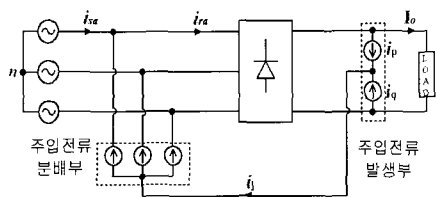
2.1 영상전류 주입의 원리

그림 3(a)에 전류 주입에 의한 고조파저감을 나타내는 주회로의 구성을 나타낸다. 전류 i_p 와 i_q 는 주입할 전류를 발생시키는 부분이고 이는 분배회로에 의해 입력측에 주입된다. 이때 부하전류를 리플없는 직류전류로 가정하면 전류 주입전($i_p=i_q=0$)의 입력전류 i_{sq} 에는 5차, 7차, 11차 및 13차 등 다수의 저차 고조파를 포함하게 된다. 이는 3상의 상전압 중 가장 높은 상에 연결된 상측다이오드와 가장 낮은 상에 연결된 하측다이오드 두 개만이 각각 120° 동안 도통하기 때문에 가장 높지도 낮지도 않은 상에 연결된 다이오드가 도통하지 않아 불연속 구간이 생기기 때문이다. 따라서 각상에 전류를 주입하여 이 불연속구간을 메꿔줌으로써 입력전류의 파형을 개선하는 것이 전류주입방식이다. 그림 3(b)는 기존의 3차 고조파 주입방식을 나타내며, 주입전류는

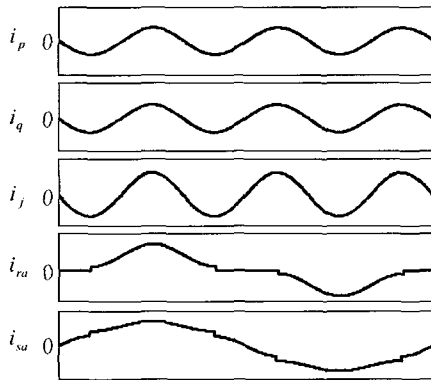
$$i_p = i_q = kI_o \sin(3\omega t - \phi) \tag{1}$$

이 된다. 입력전류의 고조파왜율(THD)이 최적이 되기 위하여 $k=0.74$, $\phi=0^\circ$ 이 되며 이때, 이 3차 고조파 전

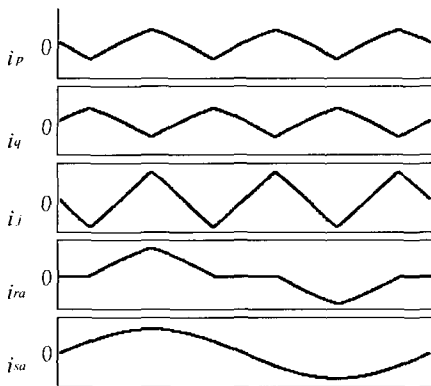
류주입 후에 입력전류 i_{sa} 의 THD는 5.1%로 개선된다. 그러나 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 이러한 3차 고조파의 주입만으로는 입력파형의 개선에 한계가 있다. 이에 대하여 그림 3(c)에서 나타내는 바와 같이 3차 뿐만 아니라 9차, 15차, 21차등 영상고조파를 포함하는 전류 i_p 와 i_q 를 주입하면, 입력전류 i_{sa} 는 순수한 정현파로 개선된다. 이때 이 영상고조파 주입방식은 그림 3(b)의 3차고조파 주입방식과는 다르게 전류 i_p 와 i_q 는 서로 다른 파형이어야 함을 알 수 있다.



(a) 회로구성



(b) 기존의 3고조파 주입에 대한 전류파형



(c) 제안한 영상고조파 주입방식의 전류파형

그림 3 영상전류 주입의 원리
Fig. 3 Principle of zero-sequence current injection

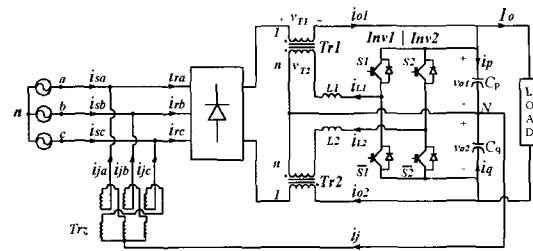


그림 4 제안하는 영상고조파 주입방식의 회로
Fig. 4 Proposed circuit for zero-sequence harmonic injection

2.2 제안하는 고조파저감회로

그림 4는 제안하는 영상전류 주입방식의 주회로도를 나타낸다. 이는 6펄스 다이오드 정류기에 두 대의 단상 반파 인버터, 두 대의 단상 변압기 Tr1, Tr2 및 주입전류 분배를 위한 zigzag 변압기 Trz등의 보조회로를 추가하여 구성한다. 두 대의 단상 인버터로 각각의 인덕터 전류 i_{L1} 과 i_{L2} 를 제어하며 이들 전류는 단상 변압기 Tr1과 Tr2를 통하여 정류기의 상측과 하측에 주입되고 주입된 전류 i_j 가 zigzag 변압기를 통하여 입력측 각상에 분배되어 입력전류를 정현파로 개선한다. 이때 각 입력선간전압에 대한 Heaviside 함수^[7]를 다음과 같이 정의한다.

$$h(v) = \begin{cases} 0, & \text{for } v < 0 \\ 1, & \text{for } v > 0 \end{cases} \quad (2)$$

각 인버터의 지령전류 i_{L1}^* 와 i_{L2}^* 는 식 (2)에서 정의된 Heaviside 함수를 이용하여 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{L1}^* = \frac{1.9I_o}{V_{LL}} (|v_{12}|(h(v_{23})(1-h(v_{31}))) + |v_{23}|(h(v_{31})(1-h(v_{12}))) + |v_{31}|(h(v_{12})(1-h(v_{23}))) - 1) \quad (3)$$

$$i_{L2}^* = \frac{1.9I_o}{V_{LL}} (|v_{12}|(h(v_{31})(1-h(v_{23}))) + |v_{23}|(h(v_{12})(1-h(v_{31}))) + |v_{31}|(h(v_{23})(1-h(v_{12}))) - 1) \quad (4)$$

여기서, V_{LL} 는 입력선간전압의 실효값, I_o 는 부하전류의 평균값이다.

그림 5는 이와 같은 지령전류를 구현하기 위한 회로를 나타낸다. a점에서는 지령전류의 파형에 관한 정보가 얻어지며 b점에서는 이 값이 단위화 된다. 이 신호의 직류성분을 제거하면 c점에서는 지령전류의 파형이 얻어지며 이에 부하 전류로부터 계산된 d점의 크기를 곱하여 최종의 지령전류를 얻게된다. 또한 계산된 기준전류 i_{L1}^* 와 i_{L2}^* 는 인버터 출력전류의 제어를 위하여 지령되며, 두 개의 직류링크 커패시터의 공동제어를 포함하는 전체 고조파저감 장치의 제어블록도를 그림 6에 나타낸다. 두 개의 커패시터 전압을 검출하여 이들의 오차신호는 P-Regulator를 거쳐 각각의 기준신호 i_{L1}^* 와 i_{L2}^* 에 더해진다. 이후 전류제어를 위하여 Hysteresis 제어를 행한 후 게이트 구동부에 인가된다.

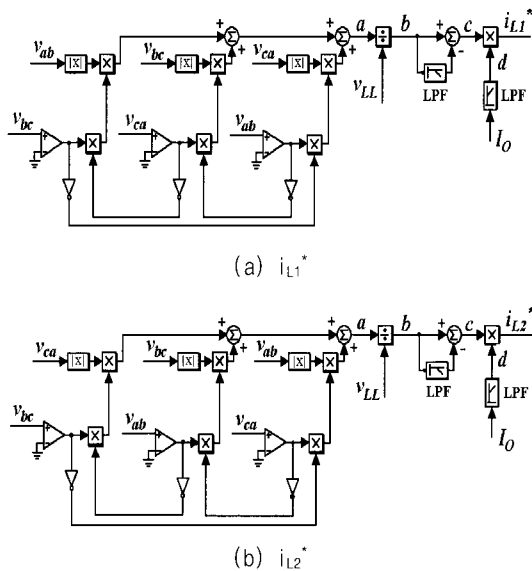


그림 5 기준전류발생
Fig. 5 Reference signal generation

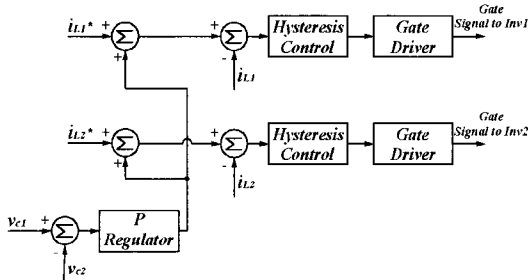


그림 6 제어블록도
Fig. 6 Control block diagram

이때 변압기의 주회로측 권선에는 다이오드 정류기 출력에 나타나는 작은 리플전압이 걸리므로 인버터의 적당한 전류제어를 위하여 권수비 n은 개략 5에서 10 사이의 값으로 정한다. 따라서 인버터 스위치의 전류 정격은 매우 낮은 값이 됨을 알 수 있다.

또한 제안한 방식은 보조회로에서 인버터의 출력측에 별도의 인덕터 L_1 과 L_2 가 없어도 단상 변압기의 적절한 누설 인덕턴스만을 이용하여 동작이 가능하다.

2.3 변압기 용량 및 소자 정격

2.3.1 인버터 소자 정격

표 1에 본 방식의 보조회로에서 사용한 스위치의 정격을 정리하였다. 인버터 스위치의 정격은 스위치의 피크 전류와 피크 전압의 곱으로 나타내는데 본 방식의 인버터 스위치에는 직류링크전압이 걸리므로 최대 전압 정격은 입력선간전압의 최대값과 같다. 또한, 인버터 스위치의 전류정격은 인버터 출력측에 있는 변압기 Tr1과 Tr2의 권수비 n에 의해 결정되는데 n을 증가시킬수록 전류정격이 감소한다. 이때 변압기의 주회로측 권선에는 다이오드 정류기 출력에 나타나는 작은 리플전압이 걸리므로 인버터의 적당한 전류제어를 위하여 권수비 n은 개략 5에서 10사이의 값으로 정한다. 따라서 n=5로 한다면 인버터 스위치의 전류정격은 $0.165I_0$ 로 매우 낮은 값이 됨을 알 수 있다.

2.3.2 변압기 용량

변압기의 VA용량을 표 1에 계산하여 정리하였다. 변압기 VA(%)용량은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

표 1 변압기 VA 및 소자의 정격

Table 1 Transformer VA & Component rating

제안하는 영상고조파 주입 다이오드 정류기		
IGBT	V_{peak} / V_{LL}	1.400
	I_{peak} / I_0	$\frac{0.824}{n}$
	I_{rms} / I_0	$\frac{0.346}{n}$
변압기 Tr1, Tr2	V_{rms} / V_{LL}	0.168
	I_{rms} / I_0	0.891
	$VA(\%) / V_{LL} i_s$	8.587
zigzag 변압기	V_{rms} / V_{LL}	0.334
	I_{rms} / I_0	0.317
	$VA(\%) / V_{LL} i_s$	24.15

$$VA(\%) = \frac{\frac{1}{2} \sum V_{rms} I_{rms}}{\sqrt{3} V_{LL} I_{sa}} \times 100 \quad (5)$$

여기서 V_{rms} 와 I_{rms} 는 각 권선의 전압과 전류의 실효값이며, I_{sa} 는 입력전류의 실효값이다.

변압기 Tr1과 Tr2의 주회로측 권선에는 다이오드 정류기의 출력 리플전압과 직류링크전압의 차가 걸려서 전압정격은 $0.168V_{LL}$ 로 작기 때문에 변압기 Tr1의 VA용량은 입력용량의 약 8.6%이다. 그리고 zigzag 변압기의 VA용량은 입력용량의 24.1%로 된다. 또한 이 두 변압기의 동작주파수는 모두 기본파의 3배 주파수이므로 일반 60Hz 변압기보다 작은 크기를 갖는다.

2.3.3 직류 커패시터 정격

커패시터 C_p 와 C_q 에는 각각의 전류 i_p 와 i_q 가 흘러 리플전압이 발생한다. 출력전류 I_o 일 때 두 커패시터 전류 i_p 와 i_q 는 계산의 편의를 위하여 그림 7과 같이 삼각파형으로 근사화시킬 수 있다. 이 삼각파형의 전류로 커패시터 양단의 전압 v_{ol} 은 그림 7과 같은 리플을 갖는다. 이때, 리플전압의 크기를 V_{ripple} 이라고 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{ripple} &= \frac{1}{C_p} \int_0^{\frac{T}{4}} \frac{3.32I_o}{T} t dt \\ &= \frac{0.000576}{C_p} I_o \end{aligned} \quad (6)$$

한편, 커패시터의 평균전압은

$$V_{ol} = \frac{1}{2} V_o \quad (7)$$

이고 커패시터 전압의 %리플 K_v 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

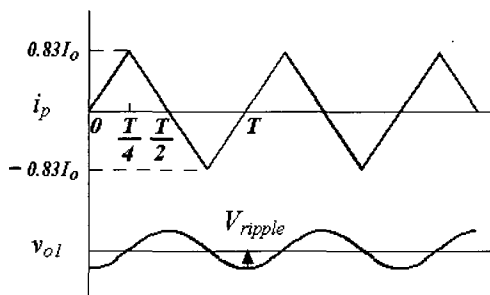


그림 7 커패시터 전압과 전류
Fig. 7 Capacitor voltage and current

$$K_v = \frac{V_{ripple}}{V_{ol}} \quad (8)$$

식 (6)~(8)로부터 커패시터의 용량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_p = \frac{0.00084I_o}{K_v V_{LL}} \quad (9)$$

2.3.4 필터인덕턴스의 설계

필터인덕턴스 L_1 (또는 L_2)는 다음 두 가지 기준을 만족하도록 설정한다^[8]. 우선 인덕터에 흐르는 전류 i_{L1} (또는 i_{L2})의 스위칭주파수 성분 I_{fsw} 를 기본파 성분 I_1 의 K_1 배로 제한하기 위해서 다음 식을 만족해야 한다.

$$\frac{I_{fsw}}{I_1} = \frac{V_{fsw}}{I_1 \cdot (f_{sw}/f) \cdot \omega L_1} < K_1 \quad (10)$$

여기서 f_{sw} 는 스위칭주파수, V_{fsw} 는 인버터출력전압의 스위칭주파수 성분이다.

또한, 인버터에 의해서 발생하는 순시 di_{L1}/dt 가 인덕터 기준전류의 i_{L1}^* 의 최대값인 $[di_{L1}^*/dt]_{max}$ 보다 크게하여 원활한 전류제어가 될 수 있도록 다음 식을 만족해야 한다.

$$\sqrt{2} \cdot V_s \sin \theta_{max} + L_1 \left[\frac{d i_{L1}^*}{dt} \right]_{max} < 0.5 V_o \quad (11)$$

여기서 V_s 는 입력상전압의 실효값이며 θ_{max} 는 인덕터의 기준전류의 di_{L1}/dt 가 최대가 되는 지점의 위상이다.

본 방식에서 인버터 직류측은 V_o 로 고정되어 있어서 필터인덕터의 인덕턴스값이 너무 작으면 인덕터전류 i_{L1} (또는 i_{L2})에 리플성분이 커지고, 인덕턴스값이 너무 크면 전류제어가 불가능해지므로 식 (10)에서 정해지는 하한값과 식 (11)에서 정해지는 상한값사이의 적절한 값을 설정하면 된다.

3. 실험결과

제안한 방식의 실험을 위해 220V, 1.5kVA급 시작품을 제작하였으며 실험에서 사용한 소자값은 다음과 같다.

변압기 Tr1, Tr2의 권선비 $n = 2$

직류커패시터 $C_p, C_q = 3300\mu F$

필터 인덕터 $L_1, L_2 = 5mH$

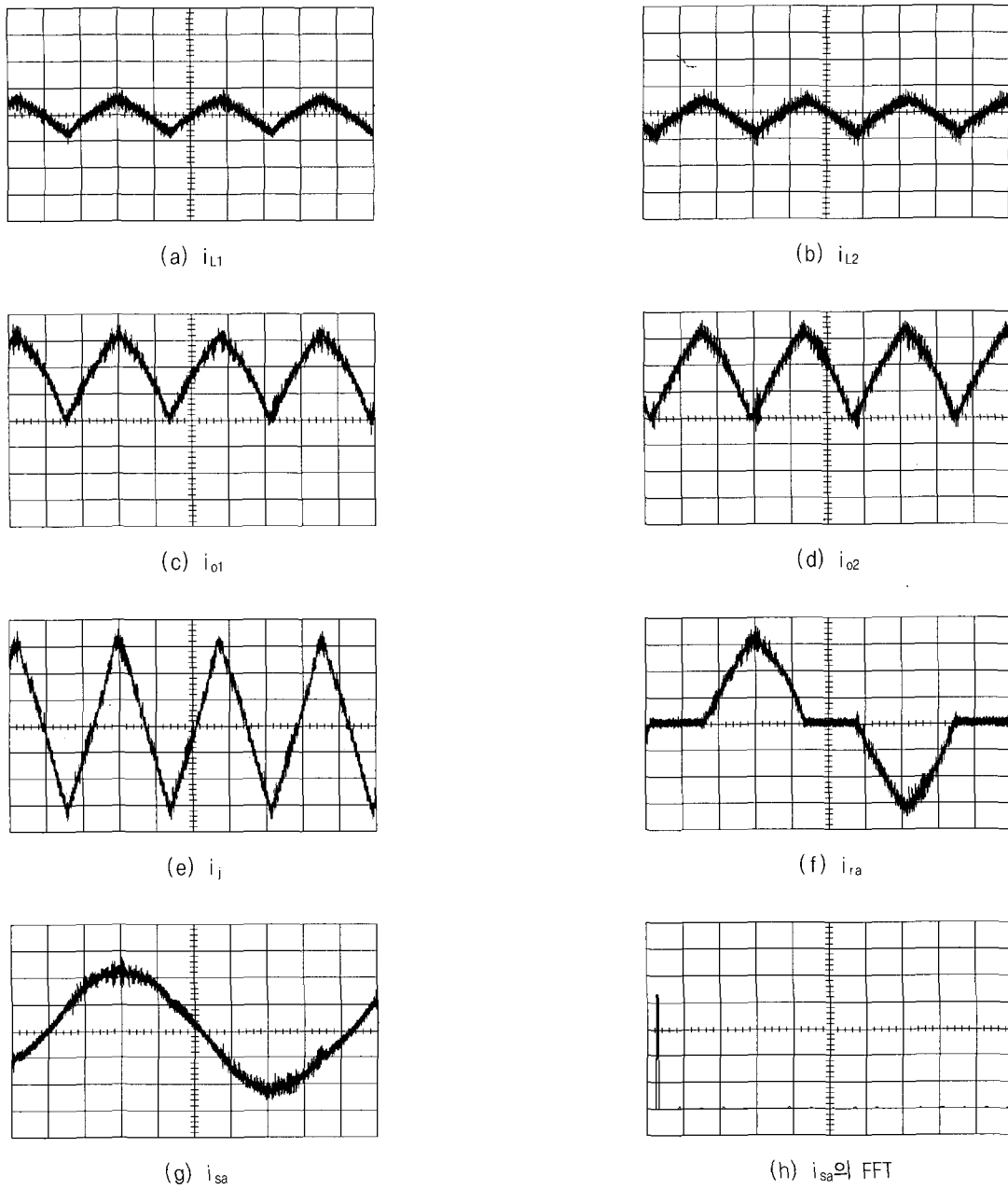


그림 8 실험 파형 (Waveforms : 1A/div, 2ms/div, FFT : 0.5A/div, 100Hz/div)
 Fig. 8 Experimental waveforms (Waveforms : 1A/div, 2ms/div, FFT : 0.5A/div, 100Hz/div)

그림 8은 제안한 방식의 각 전류의 실험파형을 나타낸다. 그림 5와 같은 지령전류에 의해 발생된 단상 인버터의 인덕터 전류 i_{L1} 과 i_{L2} 를 그림 8(a)와 그림 8(b)에 나타낸다. 권수비 n 을 더욱 크게 하면 이 전류의 크기가 작아지게 되므로 인버터 스위치의 전류정격을 더욱 작게할 수 있다.

이러한 전류 i_{L1} 과 i_{L2} 는 변압기 Tr1과 Tr2에 의해서 부하전류와 더해져서 그림 8(c)와 그림 8(d)와 같이 다이오드 정류기 상측과 하측으로 주입이 된다. 이 전류 i_{o1} 과 i_{o2} 의 교류성분은 커패시터로 흐르고 직류성분은 부하측으로 흐른다. 그림 8(e)는 주입전류 i_j 로서 zigzag 변압기에 의해서 각 상에 주입된다. 그림 8(f)

는 다이오드 정류기의 입력전류 i_{ra} 를 나타낸다. 그림 8(g)는 입력전류 i_{sa} 를 나타내며 그림 8(h)는 입력전류의 FFT를 나타내는데 입력전류의 THD = 2.7%로 거의 정현파가 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 영상전류 주입법에 의한 다이오드 정류기의 고조파 저감기술을 제안하였다. 본 방식의 회로구성 및 제어방식으로 3차 고조파이외의 영상고조파를 주입하여 순수한 정현파 입력전류를 얻을 수 있다. 본 방식의 주 전력의 흐름에는 직렬로 스위칭소자가 연결되지 않아 전력손실이 적다. 또한 보조 회로에서 사용한 변압기의 권수비 n 을 증가시키므로서 인버터의 전류용량을 매우 작게 할 수 있다. 1.5kVA급 시작품의 실험을 통하여 본 방식의 타당성을 입증하였다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-0306) 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

[1] M. Rastogi, R. Naik, and N. Mohan, "A Comparative Evaluation of Harmonic Reduction Techniques in Three-Phase Utility Interface of Power Electronic Loads", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 30, No. 5, pp. 1149~1155, September/October 1994.

[2] B.M. Bird, J.F. Marsh, and P.R. McLellan, "Harmonic Reduction in Multiplex Convertors by Triple-frequency Current Injection", *Proc. IEE*, Vol. 116, No. 10, pp. 1730~1734, 1969.

[3] A. Ametani, "Generalised Method of Harmonic Reduction in AC-DC Convertors by Harmonic Current Injection", *Proc. IEE*, Vol. 119, No. 7, pp. 857~864, July 1972.

[4] 최세완, "전류주입에 의한 고조파 저감기술의 개발동향", *전력전자학회지*, 제6권, 제1호, pp. 30~36, 2001년 2월.

[5] S. Hansen, P.N. Enjeti, J. Hahn, F. Bllabjerg, "An Integrated Single-Switch Approach to Improve Harmonic Performance of Standard PWM Adjustable-Speed Drives", *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 36, No. 4, pp. 1189~1196, July/August 2000.

[6] N. Mohan, M. Rastogi, and R. Naik, "Analysis of a New Power Electronics Interface with Approximately Sinusoidal 3-Phase Utility Currents and a Regulated DC Output", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, pp. 540~546, April 1993.

[7] P. Pejovic, Z. Janda, "Optimal Current Programming in Three-Phase High-Power-Factor Rectifier Based on Two Boost Converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, No. 6, pp. 1152~1163, November 1998.

[8] Thierry Thomas, Kevork Haddad, Geza Joos, and Alain Jaafari, "Design and Performance of Active Power Filters", *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 38~46, September/October 1988.

저 자 소 개



김현정(金鉉正)

1977년 12월 26일생. 2001년 호서대 전기공학과 졸업. 현재 서울산업대 대학원 제어계측공학과 석사과정.



장민수(張敏洙)

1976년 6월 11일생. 2001년 서울산업대 제어계측공학과 졸업. 현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 미국 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 당 학회 편집위원.

공학과 조교수. 당 학회 편집위원.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1971년 12월 ~ 1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년 3월 ~ 현재 성균

관대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수. 당 학회 편집이사.



김규식(金奎植)

1958년 8월 25일생. 1981년 서울대 전자공학과 졸업. 1983년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1990년 8월 동 대학원 제어계측공학과(박사). 1988년 ~ 1992년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1993년 ~ 현재 서울시립대 전기전자컴퓨터공학

부 부교수. 당 학회 재무이사.