전력전자학술대회 논문집 2002. 7. 3 ~ 7. 6

새로운 영상전류 주입법에 의한 다이오드 정류기의 고조파 저감

김현정, 장민수, 최세완, 원충연*, 김규식**
서울산업대학교*, 성균관대학교**, 서울시립대학교***

A New Harmonic Reduction Method of Diode Rectifier by Zero-Sequence Current Injection

Hyunjung Kim*, Minsoo Jang*, Sewan Choi*, Chungyeun Won**, Gyusik Kim***
Seoul National Univ. of Tech.*, Sungkyunkwan Univ.**, Univ. of Seoul***

ABSTRACT

본 논문에서는 다이오드 정류기에 단상인버터와 변압기를 이용하여 영상고조파 전류를 주입함으로서 순수한 정현파 입력전류를 얻을 수 있는 새로운 방식의 고조파 저감기술을 제안한다. 본 방식은 주전력의 흐름에 직렬로 스위칭소자가 연결되지 않아 전력손실이 적으며 보조회로로서 사용된 변압기의 턴비를 조정하면 인버터 스위치의 전류정격을 작게 구현할 수 있다. 본 방식의 타당성을 실험을 통하여 입증하였다.

1. 서 론

최근 전력변환장치의 사용이 증가되어감에 따라 다이오드 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 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. 1대의 Boost 컨버터로 3차 고조파 전류를 발생시키고 zigzag 변압기로 이 전류를 분배하여 주입하는 문헌[4]의 방식은 제어가 간단하며 주 전력의 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 고조파이외의 다른 영상고조파 성분도 주입시켜 줘야 하는데 상측과 하측의 두 인덕터 전류를 직접 제어할 수 없으므로 이 방식에 의한 THD의 개선은 한계가 있다. 또한 2대의 Boost 컨버터로 3차 고조파 전류를 발생시키고 이를 zigzag 변압기로 주입하여 고조파를 저감하는 방식[5]이 있는데, 이 방식에 의하여 상측과 하측인덕터 전류를 각각 제어하여 입력전류의 THD를 더욱 개선할 수 있다. 그러나 이 방식은 주전력의 흐름에 직렬로 연결된 다이오드에서 발생하는 손실 때문에 효율이 떨어진다.

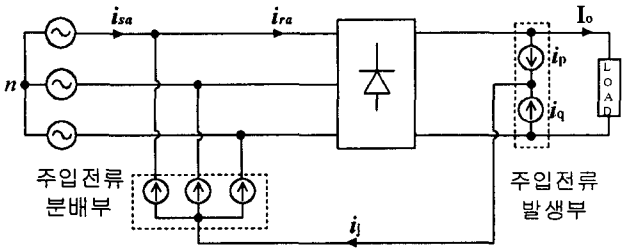
본 논문에서는 다이오드 정류기에 단상인버터와 변압기로 구성되는 보조회로를 이용하여 전류를 주입함으로서 순수한 정현파 입력전류를 얻을 수 있는 새로운 방식의 고조파 저감기술을 제안한다. 본 방식의 특징은 다음과 같다.

- 3차 고조파이외에 영상고조파를 주입하여 순수한 (pure) 정현파 입력전류를 얻을 수 있다.
- 주전력의 흐름에 직렬로 스위칭소자가 연결되지 않아 전력손실이 적다.
- 보조회로에서 사용하는 단상 인버터의 전류정격이 매우 작다.

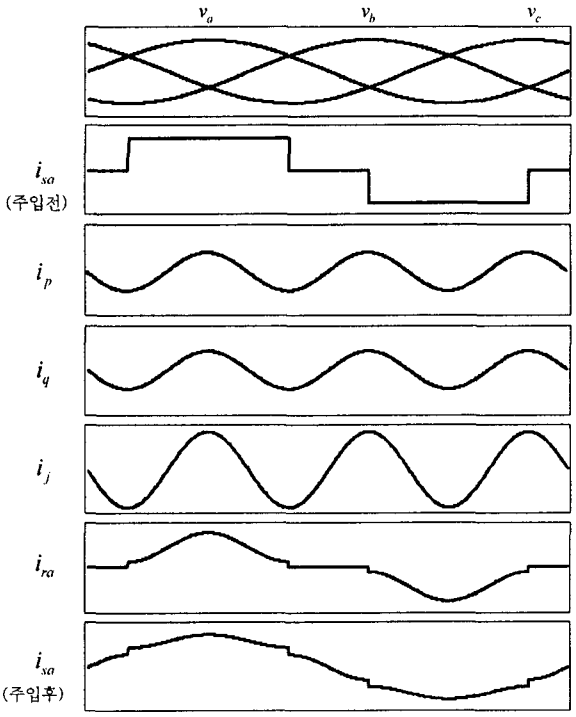
2. 제안하는 영상전류 주입법

2.1 영상전류 주입의 원리

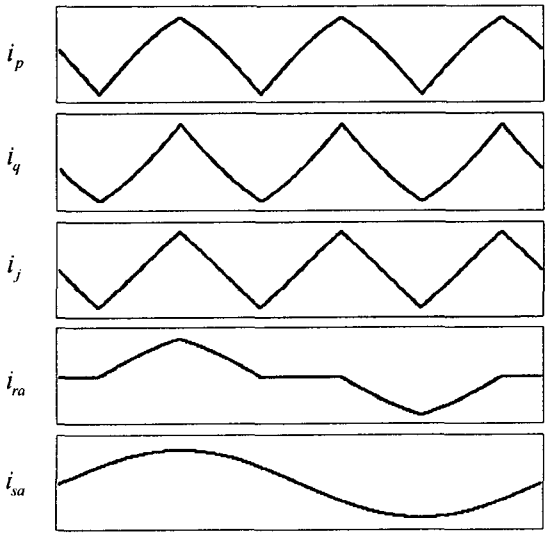
그림 1(a)에 전류 주입에 의한 고조파저감을 나타내는 주회로의 구성을 나타낸다. 전류 i_p와 i_q는 주입할 전류를 발생시키는 부분이고 이는 분배회로에 의해 입력측에 주입된다. 이때 부하전류를 리플없는 직류전류로 가정하면 전류 주입전(i_p=i_q=0)의 입력전류 i_{sa}에는 5차, 7차, 11차 및 13차 등 다수의



(a) 회로구성



(b) 기존의 3고조파 주입에 대한 전류파형



(c) 제안한 영상고조파 주입방식의 전류파형

그림 1 영상전류 주입의 원리

Fig. 1 Principle of zero-sequence current injection

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 1(b)는 기존의 3차 고조파 주입방식을 나타내며, 주입전류는

$$i_p = i_q = kI_o \sin(3wt - \phi) \quad (1)$$

이 된다. 입력전류의 고조파왜율(THD)이 최적이 되기 위하여는 k=0.74, ϕ=0° 이 되며 이때, 이 3차 고조파 전류 주입후에 입력전류 i_{sa}의 THD는 5.1%로 개선된다. 그러나 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 이러한 3차 고조파의 주입만으로는 입력파형의 개선에 한계가 있다. 이에 대하여 그림 1(c)에서 나타내는 바와 같이 3차 뿐만아니라 9차, 15차, 21차 등 영상고조파를 포함하는 전류 i_p와 i_q를 주입하면, 입력전류 i_{sa}는 순수한 정현파로 개선된다.

2.2 제안하는 고조파저감회로

그림 2에 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 Trz 등의 보조회로를 추가하여 구성한다. 두 대의 단상 인버터로 각각의 인덕터 전류 i_{L1}과 i_{L2}를 제어하며 이들 전류는 단상변압기 Tr1과 Tr2를 통하여 정류기의 상측과 하측에 주입되고 주입된 전류 i_j가 zigzag 변압기를 통하여 입력측 각상에 분배되어 입력전류를 정현파로 개선한다. 이때 각 입력선간 전압에 대한 Heaviside 함수를 다음과 같이 정의하면,

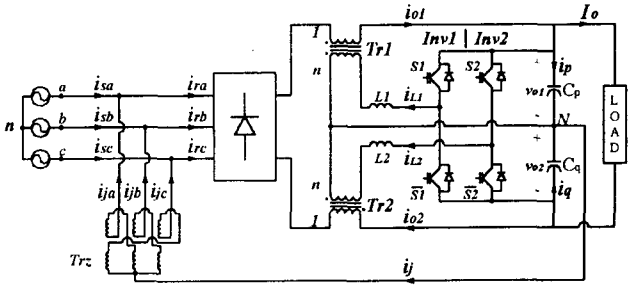


그림 2 제안하는 영상고조파 주입방식의 회로

Fig. 2 Proposed circuit of zero-sequence harmonic injection

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

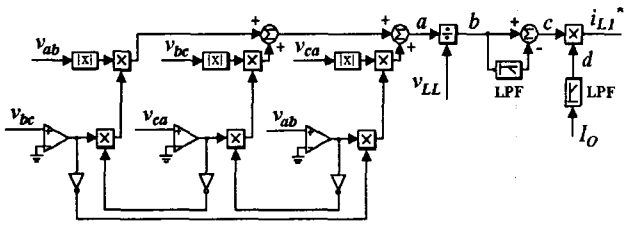
각 인버터의 지령전류 i_{L1}^*와 i_{L2}^*는 식 (2)에서 정의된 Heaviside 함수를 이용하여 각각 다음과 같이 표현할 수 있다[6].

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

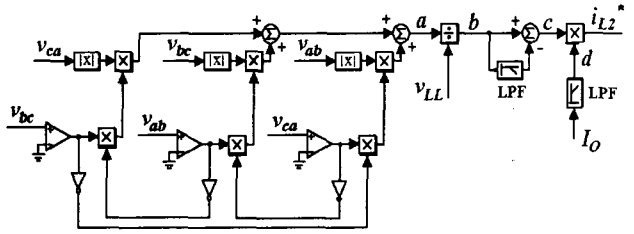
$$\begin{aligned} i_{L2}^* = \frac{1.9I_o}{V_{LL}}(&|v_{12}|(h(v_{31})(1-h(v_{23})))\\ &+|v_{23}|(h(v_{12})(1-h(v_{31})))\\ &+|v_{31}|(h(v_{23})(1-h(v_{12})))) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, V_{LL}는 입력선간전압의 실효값, I_O는 부하전류의 평균값임.

그림 3은 이와 같은 지령전류를 구현하기 위한 회로를 나타낸다. a점에서는 지령전류의 파형에 관한 정보가 얻어지며 b점에서는 이를 단위화 한다. 이 신호의 직류성분을 제거하면 c점에서는 지령전류의 파형이 얻어지며 이를 부하전류로부터 계산된 d점의 크기를 곱하여 최종의 지령전류를 얻게된다. 또한 계산된 기준전류 i_{L1}^*와 i_{L2}^*는 인버터 출력



(a) i_{L1}^*



(b) i_{L2}^*

그림 3 기준전류발생

Fig. 3 Reference signal generation

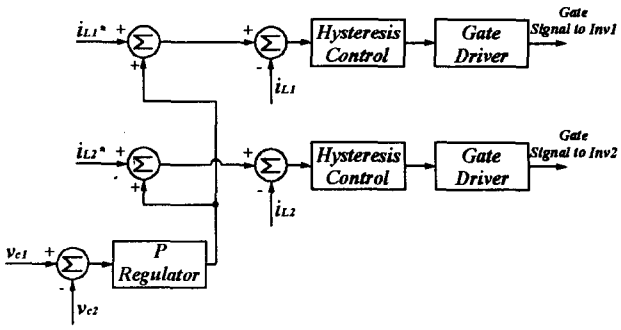


그림 4 제어블록도

Fig. 4 Control block diagram

전류의 제어를 위하여 지령되며, 두 개의 직류링크 커패시터의 균등제어를 포함하는 전체 고조파저감 장치의 제어블록도를 그림 4에 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.

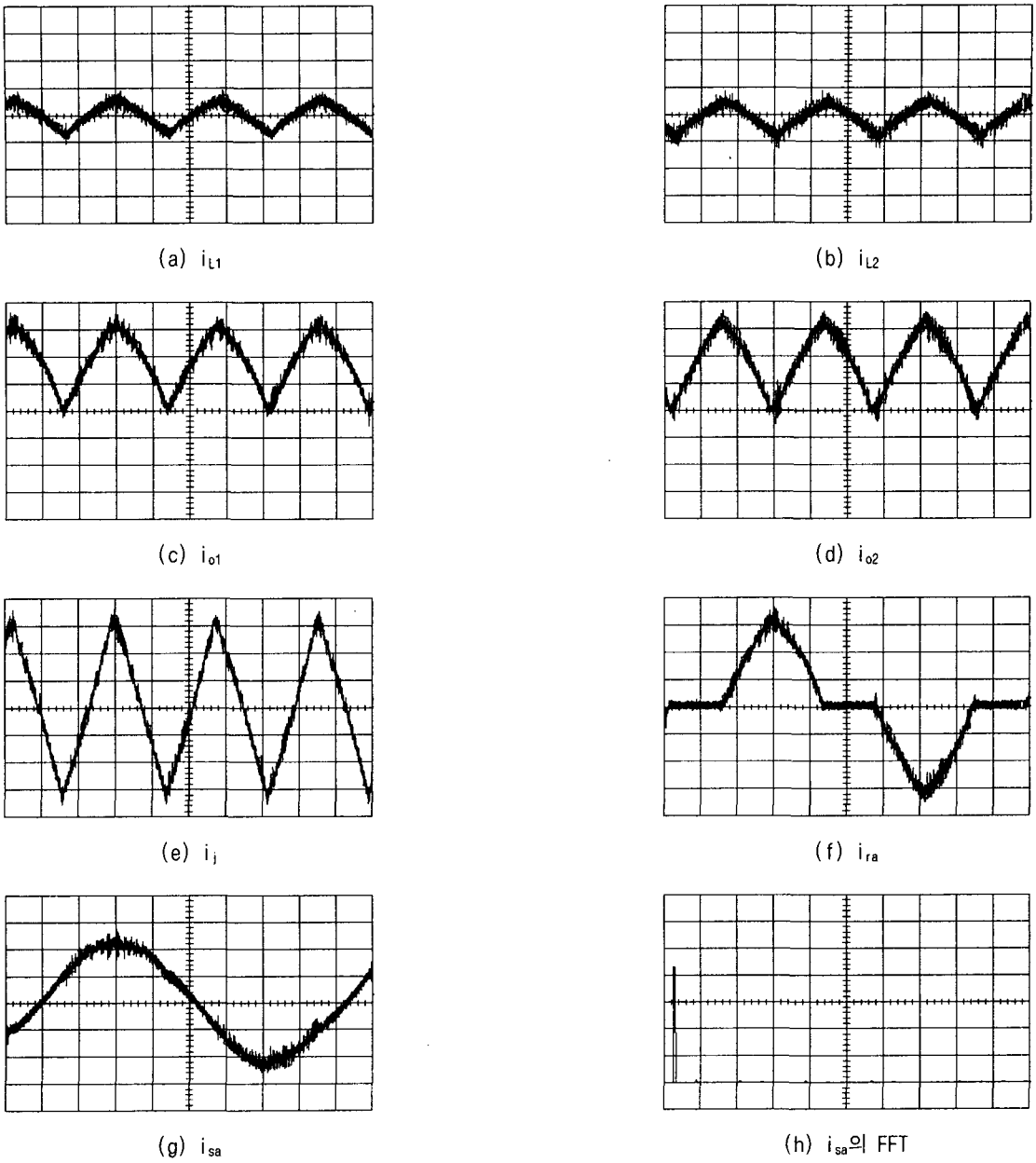
2.3 변압기 용량 및 소자 정격

표 1에 본 방식의 보조회로에서 사용한 스위치의 정격과 변압기의 VA용량을 계산하여 정리하였다. 인버터 스위치의 정격은 스위치의 피크 전류와 피크 전압의 곱으로 나타내는데 본 방식의 인버터 스위치에는 직류링크전압이 걸리므로 최대전압 정격은 입력선간전압의 최대값과 같다. 또한, 인버터 스위치의 전류정격은 인버터 출력측에 있는 변압기 Tr1과 Tr2의 턴비 n에 의해 결정되는데 n을 증가시킬수록 전류정격이 감소한다. 변압기의 주회로측 권선에는 다이오드정류기 출력의 작은 리플전압이 걸리므로 턴비 n = 5 를 사용하더라도 스위치전류의 최대값은 $0.184I_o$ 로 매우 작아진다.

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_o	$\frac{0.824}{n}$
	I_{rms} / I_o	$\frac{0.346}{n}$
변압기 Tr1, Tr2	V_{rms} / V_{LL}	0.168
	I_{rms} / I_o	0.891
	$VA(\%)$ / V_{LL} i_{sa}	8.587
zigzag 변압기	V_{rms} / V_{LL}	0.334
	I_{rms} / I_o	0.317
	$VA(\%)$ / V_{LL} i_{sa}	24.15



(a) i_{L1} (b) i_{L2}

(c) i_{o1} (d) i_{o2}

(e) i_j (f) i_{ra}

(g) i_{sa} (h) i_{sa}의 FFT

그림 5 실험 파형 (1A/div, 2ms/div, 100Hz/div)

Fig. 5 Experimental waveforms (1A/div, 2ms/div, 100Hz/div)

한편, 변압기 $VA(\%)$용량은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

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

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

변압기 Tr1과 Tr2의 주 회로측 권선에는 다이오드 정류기의 출력 리플전압과 직류링크전압의 차가 걸려서 전압정격은 $0.168V_{LL}$ 로 작기 때문에 변압기 Tr1의 VA용량은 입력용량의 약 8.6%이다. 그리고 zizgzag 변압기의 VA용량은 입력용량의 24.1%로 된다.

3. 실험 결과

제안한 방식의 실험을 위해 220V, 3kVA급 시작품을 제작하였으며 실험에서 사용한 정수는 다음과 같다.

변압기 Tr1, Tr2의 권선비 n = 2
직류커패시터 C_p, C_q = 3300uF
필터 인덕터 L_1, L_2 = 5mH

그림 5는 제안한 방식의 각 전류의 실험파형을 나타낸다. 그림 3과 같은 지령전류에 의해 발생된 단상인버터의 인덕터 전류 i_{L1}과 i_{L2}를 그림 5(a)와 그림 5(b)에 나타낸다. 권수비 n을 더욱 크게하면 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 5(c)와 그림 5(d)와 같이 다이오드 정류기 상측과 하측으로 주입이 된다. 이 전류 i_{o1}과 i_{o2}의 교류성분은 커패시터로 흐르고 직류성분은 부하측으로 흐른다. 그림 5(e)는 주입전류 i_j로서 zigzag 변압기에 의해서 각 상에 주입된다. 그림 5(f)는 다이오드 정류기의 입력전류 i_{ra}를 나타낸다. 그림 5(g)는 입력전류 i_{sa}를 나타내며 그림 5(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(pure) 정현파 입력전류를 얻을 수 있다. 본 방식의 주 전력의 흐름에는 직렬로 스위칭소자가 연결되지 않아 전력손실이 적다. 또한 보조회로에서 사용한 변압기의 권수비 n을 증가시키므로서 인버터의 전류용량을 매우 작게 할 수 있다. 3kVA급 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 Inudstry Applications*, Vol. 30, No. 5, pp. 1149-1155, 1994, September/October.

[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, 1972, July.

[4] 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, 2000, July/August.

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

[6] 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, 1998, November.