

직렬접속형 다이오드 정류기 시스템의 전류주입에 의한 고조파 저감

論 文
48B-11-8

Drawing Sinusoidal Input Currents of Series-Connected Diode Rectifiers by A Current Injection Technique

吳 俊 龍* · 崔 世 琬** · 金 榮 石*** · 元 忠 淵[§]
(Jun-yong Oh · Se-wan Choi · Young-seok Kim · Chung-yuen Won)

Abstract - This paper proposes a new series-connected diode rectifier which draws sinusoidal input currents. The proposed rectifier system is configured by adding an auxiliary circuit to the conventional 12-pulse series-connected diode rectifier and employing a current injection technique. A low kVA (0.02P_o(PU)) active current source injects a triangular current into the interphase reactor of the diode rectifier. The current injection results in near sinusoidal input current from the utility with less than 1% THD. The resulting system is suitable for high voltage and high power applications. Experimental and simulation results are provided from a 220V, 3kVA prototype rectifier system.

Key Words : diode rectifier, harmonic elimination, interphase reactor, current injection

1. 서 론

다이오드 정류기에 있어서 입력전류의 고조파 문제와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다[1-8]. 능동전력필터[2] 및 PWM 정류기[3]에 의한 방식은 성능이 우수하지만 많은 스위칭 소자와 센서등을 사용하고 제어가 복잡하여 효율, 용이성 및 경제성의 측면에서 어려움이 있다. 한편, 중·대용량급의 정류기로는 다중펄스(Multi-Pulsing)방식을 많이 사용하고 있다. 입력전류의 5차와 7차 고조파를 저감하기 위한 12-펄스 다이오드 정류기는 널리 알려진 방식이다[1]. 다이오드 브리지와 위상변압기의 추가 없이 펄스 수를 더욱 증가시키는 여러 방식이 제안되었는데[4-8], 이 방식들은 주로 병렬형 12-펄스 다이오드 정류기에 적용한 것으로 고전류용에 적합하다. 문헌[5]은 펄스 수를 증가시키기 위하여 상간변압기의 탭에 스위칭소자의 수를 늘려 가는 방식이고, 문헌[6-8]은 상간변압기에 전류를 주입하는 방식으로서 제어가 용이하고 주입전류의 용량이 매우 작은 장점이 있다. 문헌[7]은 상간변압기의 리액터의 용량을 최적화 시키는 방식으로 수동소자만으로 구현하였고, 문헌[8]에서는 상간변압기의 2차 측에 전류 또는 전압을 주입하여 입력전류를 36-펄스로 하는 방식이 제안되었다.

본 논문에서는 병렬형 12-펄스 다이오드 정류기에 근간을 둔 문헌[6]의 방식을 고전압용의 직렬형 12-펄스 다이오드 정류기에 적용하였다. 제안한 방식은 상간변압기의 2차 측에 삼각파형의 전류를 주입하여 입력전류의 고조파를 제거하는 방식으로 다음의 특징을 갖는다.

- 입력전류의 THD는 1%보다 작아 정현파에 가까운 전류 파형을 얻을 수 있다.
- 주입전류원의 용량(약 0.02P_o)은 능동전력필터(약 0.30P_o)의 용량에 비해 매우 작다.
- 주입전류원은 단상 전류제어형 전압원 인버터로 구성할 수 있으며 제어가 용이하다.

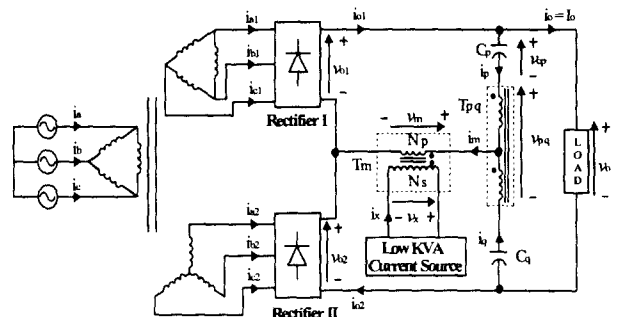


그림 1 제안하는 다이오드 정류기 시스템
Fig. 1 Circuit diagram of the proposed diode rectifier

*非 會 員 : 서울産業大 制御計測 工學科 碩士課程
 **正 會 員 : 서울産業大 制御計測 工學科 助教授
 ***正 會 員 : 仁荷大 電氣工學科 教授
 §正 會 員 : 成均館大 電氣電子工學部 教授
 接受日字 : 1999年 6月 23日
 最終完了 : 1999年 9月 30日

• 주입전류원은 전원 측의 외란에 영향을 받지 않아 견고하다.

따라서, 본 방식은 고품질의 전력이 요구되는 중·대용량 모터 구동장치 등의 앞단에서 정류기로 적용하면 효과적이다. 제안한 방식의 동작원리, 전류해석, 소자의 용량계산, 모의실험 및 220V, 3kVA 정류기 시스템으로부터의 실험결과를 기술하기로 한다.

2. 제안하는 다이오드 정류기

그림 1에 제안한 시스템을 나타낸다. 이 시스템은 기존의 12-펄스 직렬접속형 다이오드 정류기에 보조회로를 추가하여 구성된다. 보조회로는 직류전압 분할용 콘덴서 C_b 과 C_o , 두 대의 변압기 T_n 와 T_m 그리고 전류원 i_x 로 구성된다. 전류원 i_x 는 단상의 전류제어형 PWM인버터로 구현되며, 이 전류가 변압기 T_m 에 주입되면 정현파에 가까운 입력전류를 얻게 된다.

2.1 전류원 i_x 의 결정

본 절에서는 입력전류의 THD를 최소화하기 위한 전류 i_x 를 결정한다. 여기서, 출력전류 i_o 는 리플없는 직류로 가정한다. 주 변압기 결선으로부터 입력전류 i_a 는 다음과 같이 된다.

$$i_a = i_{a1} + \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{o2} - i_{o1}) \quad (1)$$

정류기 입력전류는 스위칭함수와 정류기 출력전류로 표현할 수 있다[6].

$$\begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} i_{o1}, \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a2} \\ S_{b2} \\ S_{c2} \end{bmatrix} i_{o2} \quad (2)$$

한편, 정류기 출력전류 i_{o1} 과 i_{o2} 는

$$i_{o1} = I_o + i_p \quad (3)$$

$$i_{o2} = I_o - i_q$$

로 되고, 변압기 T_m 의 1차측의 전류 i_m 은 다음과 같다.

$$i_m = i_p + i_q \quad (4)$$

변압기 T_n 의 동작으로,

$$i_p = i_q \quad (5)$$

이므로, 식(3)-(5)로부터 정류기 출력전류는 부하전류 I_o 와 전류 i_m 에 의해 다음과 같이 된다.

$$i_{o1} = I_o + \frac{1}{2} i_m$$

$$i_{o2} = I_o - \frac{1}{2} i_m \quad (6)$$

또한, 변압기 T_m 에서 전류 i_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$i_m = k i_x \quad (7)$$

여기서 $k = \frac{N_s}{N_p}$ 는 변압기 T_m 의 권수비를 나타낸다. 따라서 식 (1), (2), (6), (7)로부터 입력전류 i_a 는 다음과 같이 된다.

$$i_a = I_o S_x + \frac{1}{2} k i_x S_y \quad (8)$$

여기서,

$$S_x = S_{a1} + \frac{1}{\sqrt{3}}(S_{a2} - S_{c2}) \quad (9)$$

$$S_y = S_{a1} - \frac{1}{\sqrt{3}}(S_{a2} - S_{c2})$$

이다. 식 (8)은 입력전류 i_a 와 주입전류 i_x 의 관계를 나타내므로, 여기서 입력전류 i_a 를 정현파로 만들기 위해서는 i_a 대신 i_a 의 기본파 성분인 $i_{a,1}$ 을 대입하고, i_x 를 구하면 다음과 같다.

$$i_x = \frac{2(i_{a,1} - I_o S_x)}{k S_y} \quad (10)$$

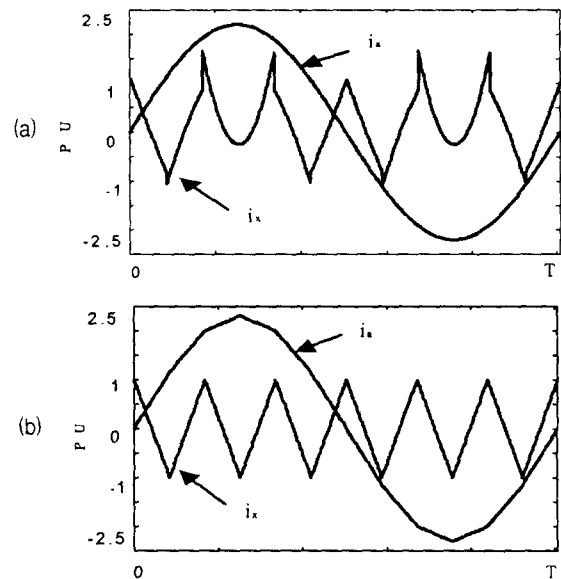


그림 2 (a) 식 (10)로부터 i_x 를 주입한 경우의 입력전류 (b) i_x 를 삼각파로 근사시킨 경우의 입력 전류 ($I_o = 1$ PU, $k = 1$ 로 가정)

Fig. 2 (a) Exact injection current i_x and input current i_a (b) Approximated injection current i_x and input current i_a (Assuming $I_o = 1$ PU, $k = 1$)

또한, 각 소자의 손실을 무시하면, 입력전력과 출력전력이 같으므로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{3} V_{LL} I_{a,1} = V_o I_o \quad (11)$$

여기서, V_{LL} 은 선간 입력전압의 실효값을 나타낸다. 두 개의 다이오드 브리지가 직렬접속이기 때문에

$$V_o = 2 \times 1.35 V_{LL} \quad (12)$$

되고, 식 (11), (12)로부터 부하전류의 크기에 대한 $I_{a,1}$ 을 구할 수 있다.

$$I_{a,1} = 1.5588 I_o \quad (13)$$

이와 같이 식 (10)에 의해 결정된 전류 i_x 를 변압기 T_m 에 주입하면 그림 2(a)에서의 계산결과가 보여주듯이, 정현파의 입력전류를 얻을 수 있다. 또한, 그림 2(b)는 전류 i_x 를 삼각파로 근사 시킨 후 주입한 경우의 입력전류도 THD가 1% 미만의 정현파에 가까운 파형이 됨을 알 수 있다. 이는 실제의 구현을 용이하게 하기 위한 것이다. 이 삼각 파형의 전류를 변압기 T_m 의 2차 측에 주입하였을 때 각부의 전류 파형을 그림 3에 나타내었다. 실선으로 표시한 것이 제안한 방식으로 전류를 주입한 후의 전류 파형이고 점선으로 표시한 것이 전류주입전의 12-펄스 전류 파형을 나타낸다.

2.2 전류원 i_x 의 용량

선간 입력전압 V_{LL} 과 부하전류 I_o 는 1(PU)로 가정한다. 변압기 T_m 의 1차측 양단간 전압 v_m 은

$$v_m = \frac{1}{2} (v_{o1} - v_{o2}) \quad (14)$$

$$= \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{3V_{LL}}{\pi(n^2-1)} (1 - \cos \frac{\pi}{6} n) \right\} \cos n(\omega t)$$

이므로, v_m 의 실효값은 다음과 같이 된다.

$$V_{m,rms} = 0.0549 V_{LL} \quad (15)$$

한편, 변압기 T_m 의 양단간 전압은

$$v_{pq} = (v_{o1} + v_{o2})_{ac} \quad (16)$$

$$= \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{6V_{LL}}{\pi(n^2-1)} (1 + \cos \frac{\pi}{6} n) \right\} \cos n(\omega t)$$

이므로, v_{pq} 의 실효값은 다음과 같이 된다.

$$V_{pq,rms} = 0.0276 V_{LL} \quad (17)$$

그림 2(b)로부터 i_x 의 실효값은

$$I_{x,rms} = \frac{2 I_o}{\sqrt{3k}} = 1.1547 \frac{I_o}{k} \quad (18)$$

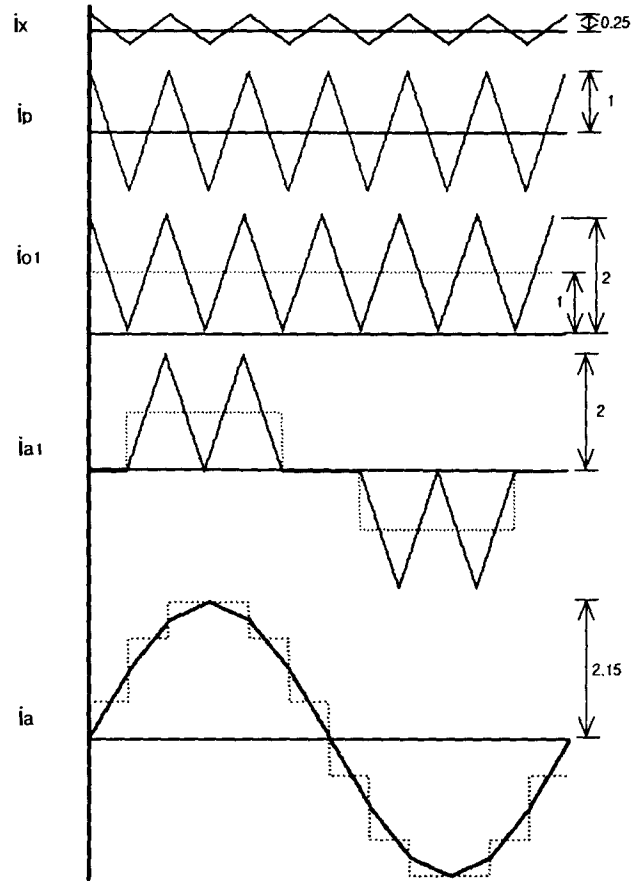


그림 3 각부의 전류파형 : — 전류주입후 --- 전류주입전 ($I_o = 1$ PU, $k = 4$ 로 가정)

Fig. 3 Various current waveforms : — After current injection --- Before current injection (Assuming $I_o = 1$ PU, $k = 4$)

로 된다. 한편, i_x 의 크기는 변압기 T_m 의 권수비로 조정할 수 있다.

$$V_{x,rms} = k V_{m,rms} \quad (19)$$

식 (12), (15), (18) 그리고 (19)로부터 전류원 i_x 의 용량 KVA_{source} 을 구하면 다음과 같다.

$$KVA_{source} = V_{x,rms} I_{x,rms} \quad (20)$$

$$= 0.023 V_o I_o$$

식 (20)에서와 같이 주입전류원 i_x 의 용량은 부하용량의 약 2% 정도로 매우 작다.

한편, 변압기 T_m 의 용량은 다음과 같다.

$$KVA_m = 2 V_{m,rms} I_{m,rms}$$

$$= 2 V_{x,rms} I_{x,rms} \quad (21)$$

$$= 0.046 V_o I_o$$

또한, $i_b = \frac{1}{2} i_m$ 이므로, 변압기 T_{bc} 의 용량은 다음과 같다.

$$KVA_{bc} = V_{bc,rms} I_{b,rms} \quad (22)$$

$$= 0.006 V_o I_o$$

즉, 기존의 직렬형 12-펄스 정류기에 추가한 변압기의 총용량은 부하용량의 약 5.2% 이다.

2.3 커패시터 C_b 와 C_q 의 용량산정

커패시터 C_b 와 C_q 에는 각각 동일한 파형의 전류 i_b 와 i_q 가 흘러 리플전압이 발생하는데 리플전압은 변압기 T_m 의 1차측 전압 v_m 의 파형을 왜곡시키나 전류 i_x 를 주입하는데는 큰 영향이 없다. 그림 4 에서 보듯이 커패시터에 흐르는 삼각 파형의 전류이고 주기는 $\frac{\pi}{3}$ 이다. 커패시터 양단의 전압 v_{cp} 의 파형은 그림 4 와 같은 리플을 갖는다. 이때, 리플전압의 크기를 V_{ripple} 이라고 하면

$$V_{ripple} = \frac{1}{\omega C_b} \int_0^{\frac{\pi}{12}} \frac{I_o}{\frac{\pi}{12}} d(\omega t) \quad (23)$$

$$= \frac{0.1308 I_o}{\omega C_b}$$

이고, 따라서 커패시턴스 C_b 는 다음과 같다.

$$C_b = \frac{0.1308 I_o}{\omega V_{ripple}} \quad (24)$$

한편, 커패시터의 평균전압은 그림 4 에서 보는 바와 같이

$$V_{ol,dc} = 1.35 V_{LL} \quad (25)$$

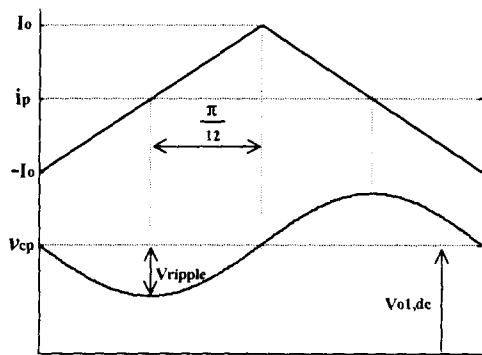


그림 4 커패시터 전류 i_b 와 커패시터 리플전압 v_{cp}

Fig. 4 Capacitor current i_b , capacitor ripple voltage v_{cp}

가 된다.

커패시터 전압의 %리플 K_v 를 다음과 같이 정의하면

$$K_v = \frac{V_{ripple}}{V_{cp}} \quad (26)$$

식 (24) - (26)로부터 커패시터 용량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_b = \frac{0.045 I_o}{K_v \omega V_{LL}} \quad (27)$$

2.4 i_x 의 제어기 구성

전류주입원 i_x 는 단상 전류제어형 PWM 인버터로 구현되고 입력 측의 직류 전압 원으로서 제안한 정류기의 출력을 직접 연결해서 사용한다. 그림 5에 삼각 파형의 i_x 를 만들어내기 위한 전류제어형 PWM 인버터의 제어기 구성을 나타낸다. 입력 전압과 동기되어 발생된 삼각파형에 저역 필터를 통과한 출력전류를 곱하여 지령전류 i_x^* 를 만들어 낸다. 또한 지령전류와 실제 전류 i_x 와의 차는 PI 제어기를 거쳐 삼각파 캐리어와 비교하여 PWM 구동신호를 발생시킨다. 즉, 출력전류의 크기에 따라 주입하는 삼각 파형 지령전류 i_x^* 의 크기를 조정하여 입력전압을 정현파가 되도록 할 수 있다.

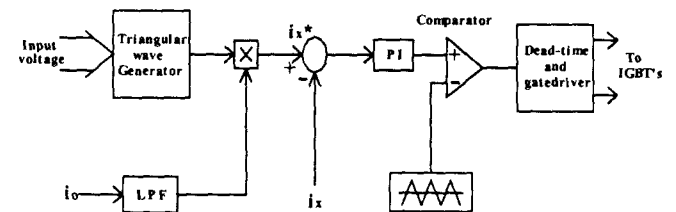
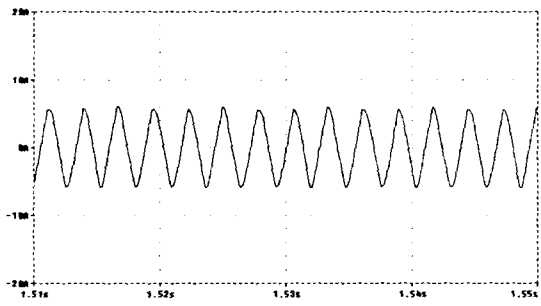


그림 5 전류주입용 단상 PWM 인버터의 제어 구성도

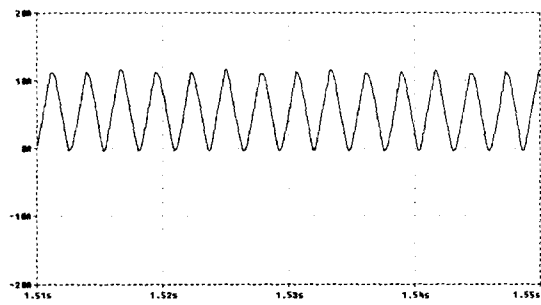
Fig. 5 Block diagram of PWM Inverter controller for current injection

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

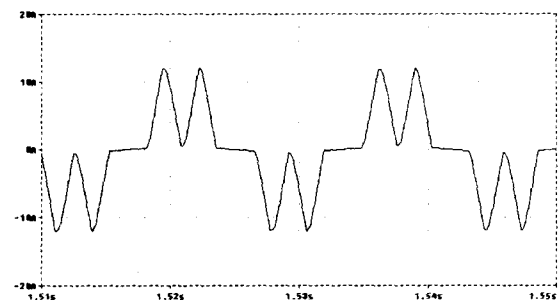
제안한 다이오드 정류기 시스템을 PSPICE로 시뮬레이션한 결과를 그림 6에, 220V, 3KVA의 정류기 시스템으로부터의 실험결과를 그림 7에 각각 나타내었다. 그림 6(a) 와 7(a)는 권수비 k 가 1.968일때의 주입전류 i_x 를 나타낸다. 그림 6(b) 과 7(b)는 주입전류 i_x 에 의해 변화된 정류기 출력전류 i_{ol} 를 나타내고 그림 6(c)와 7(c)는 정류기 입력전류 i_{il} 를 보여 준다. 그림 6(d)와 7(d)는 입력전류 i_a 로서 THD가 1%미만인 정현파에 가까운 전류가 된다. 이상의 파형으로부터 시뮬레이션과 실험결과가 일치함을 알 수 있다.



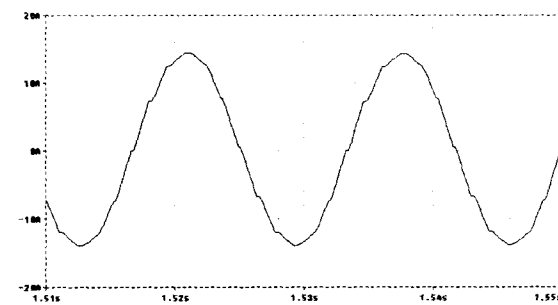
(a)



(b)



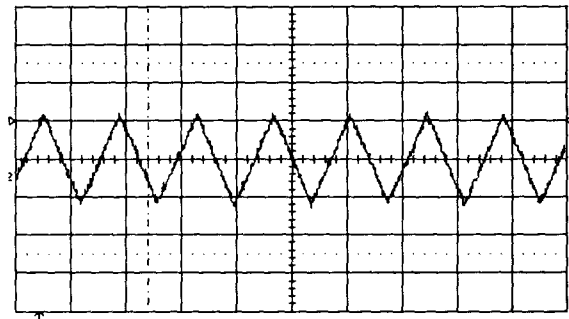
(c)



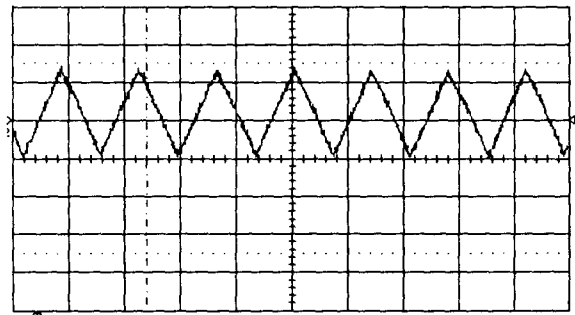
(d)

그림 6 시뮬레이션 결과 (a) 주입전류 i_x (b) 정류기 출력전류 i_{o1} (c) 정류기 입력전류 i_{a1} (d) 입력전류 i_a

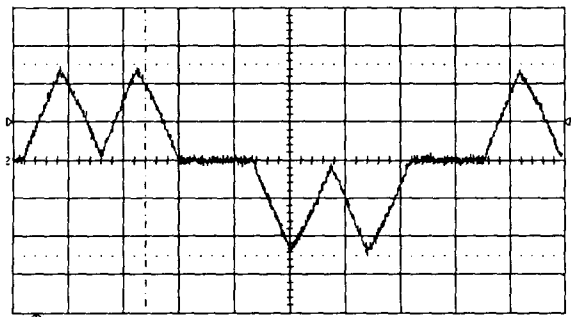
Fig. 6 Simulation results (a) Injected current i_x (b) Rectifier output current i_{o1} (c) Rectifier input current i_{a1} (d) Input current i_a



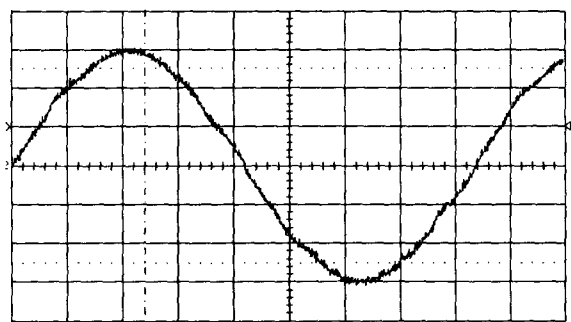
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7 실험결과 (5A/Div.) (a) 주입전류 i_x (b) 정류기 출력전류 i_{o1} (c) 정류기 입력전류 i_{a1} (d) 입력전류 i_a

Fig. 7 Experimental results (5A/Div.) (a) Injected current i_x (b) Rectifier output current i_{o1} (c) Rectifier input current i_{a1} (d) Input current i_a

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 직렬접속형 다이오드 정류기를 제안하였다. 기존의 직렬형 12-펄스 정류기에 추가된 보조회로에 삼각파로 근사시킨 전류 i_x 를 주입함으로써 THD가 1%보다 낮은 정현파에 가까운 입력전류를 얻게되었다. 더욱이, 주입 전류원의 용량은 부하용량의 2% 정도로 매우 작으며, 보조회로에 사용된 변압기의 총용량도 부하용량의 5% 정도이다. 따라서, 본 방식은 양질의 입력전력이 요구되는 중·대용량급의 다이오드 정류기의 전원 접속에 적합하다. 또한, 220V, 3KVA 정류기 시스템의 실험결과와 모의실험 결과를 비교하여 제안한 시스템의 타당성을 검증하였다.

본 연구(관리번호 98-중-03)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행 되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. Schaefer, "Rectifier Circuits: Theory and Design", John Wiley & Sons, Inc., 1965
- [2] Hirofumi Akagi, Akira Nabae and Satoshi Atoh, "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters", pp. 460-465, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-22, NO. 3, MAY/JUNE. 1986.
- [3] A. R. Prasad, P. D. Ziogas, S. Manias, "An Active Power Factor Correction Technique for Three-Phase Diode Rectifiers", pp. 83-92, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 6, No. 1, Jan. 1991
- [4] J. Arrillaga, A.P.B. Joosten and J.F. Baird, "Increasing the Pulse Number of AC-DC Converters by Current Reinjection Techniques", pp. 2649-2655, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, Aug. 1983.
- [5] S. Miyairi, etc. al, "New Method for Reducing Harmonics Involved in Input and Output of Rectifier with Interphase Transformer", IEEE Trans. on Industry Applications, pp. 790-797, Vol. IA-22, No. 5, Sep./Oct. 1986
- [6] S. Choi, P. Enjeti, H. Lee and I. Pitel, "A New Active Interphase Reactor for 12-Pulse Rectifiers Provides Clean Power Utility Interface", pp. 1304-1311, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, Nov./Dec. 1996.
- [7] T. Tanaka, N. Koshio, H. Akagi and A. Nabae, "A Novel Method of Reducing the Supply Current Harmonics of a 12-pulse thyristor rectifier with an interphase reactor", pp. 1256-1262, Vol. 2, Thirty-First IAS Annual Meeting, Oct, 1996.
- [8] K. Oguchi, H. Hama, T. Kubota, "Multilevel Current-

Source and Voltage-Source Converter Systems coupled with Harmonic Canceling Reactors", pp. 1300-1308, Vol. 2, Third-Second IAS Annual Meeting, 1997.

저 자 소 개



오 준 용(吳 俊 龍)

1975년 11월 17일생. 1998년 서울산업대 제어계측공학과 졸업(학사). 현재 동 대학원 석사과정

Tel : (02) 970-6538, Fax : (02) 949-2654



최 세 완(崔 世 琬)

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

Tel : (02) 970-6542, Fax : (02) 949-2654

E-mail : schoi@duck.snut.ac.kr



김 영 석(金 榮 石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1989년 한국전기연구소 선임연구원 실장. 현재 인하대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원.

Tel : (032) 860-7397, Fax : (032) 863-5822

E-mail : youngsk@dragon.inha.ac.kr



원 충 연(元 忠 淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1971년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년 3월~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수.

Tel : (0331)-290-7115, Fax : (0331)-290-7179

E-mail : won@yurim.skku.ac.kr