

새로운 고전압 대전력용 24펄스 다이오드 정류기 시스템

崔世琬, 金基勇

A New 24-Pulse Diode Rectifier for High Voltage and High Power Application

Sewan Choi, Kiyong Kim

요 약

본 논문에서는 새로운 24펄스 다이오드 정류기 시스템을 제안한다. 제안하는 다이오드 정류기 시스템은 기존의 직렬형 12펄스 다이오드 정류기에 수동의 보조회로를 추가함으로써 구성되어지고, 입력전류는 제 22차까지의 고조파가 제거되어 거의 정현파에 가까운 전류 파형을 얻는다. 또한, 출력 전압은 $n=24k, k=1,2,3...$ 의 고조파 성분을 갖는 24펄스 특성을 나타낸다. 더욱이, 이 보조회로의 용량은 출력용량에 비하여 매우 작으며, 능동 스위칭소자를 사용하지 않으므로 외란에 강하고 구현이 간단하다. 따라서, 본 방식은 중·대용량급의 고전압 비제어(uncontrolled) 직류전원이 필요한 인버터나 무정전 전원장치등의 앞단에서 입력고조파의 저감에 경제적이고 효율적이다. 220V, 3KVA 정류기 시스템의 실험을 통하여 제안한 시스템의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, a new 24-pulse diode rectifier system based upon the conventional series-connected 12-pulse rectifier is proposed with the least number of switching devices and low VA rating of the additional passive components. The proposed approach does not employ any active switching devices. Therefore, the system is rugged and simple to implement. Detailed analysis with VA rating calculation of the components is presented and experimental results from a 220V, 3kVA rectifier system verify the proposed concept.

Key Words: Multi-Pulse Rectifiers, 24-Pulse Diode Rectifiers, Harmonic Elimination, Utility input line Current

1. 서 론

다이오드 정류기는 전력전자 장비를 전원에 접속할 때 선단에서 많이 사용되어져 왔다. 이때 다이오드의 비선형 동작과 직류평활용 콘덴서 때문에 입력전원 전류는 왜곡되고, 많은 고조파를 함유하게 된다. 다이오드 정류기에 의해서 왜곡된 입력전류는 전력계통내 공통접속점(Point of Common Coupling)에서의 전압왜곡, 전력계통 소자들의 정격 증가, 민감한 전자장치의 오동작, 전기에너지의 비효율적인 사용 등을 야기시킨다.⁽¹⁾ 이러한 다이오드 정류기의 입력전류의 고조파를 저감하기 위한 방법이 많이 제안되어져 왔다.⁽²⁻⁷⁾ 자기소호

형 소자를 사용한 PWM 방식 정류기는 성능에서 우수한 반면, 다이오드 정류기에 비해 초기투자비용이 높고 효율이 낮으며 EMI등을 야기시킬 수 있다. 따라서, 중·대용량급의 비제어(uncontrolled) 직류전원에는 주로 다이오드를 사용한 다중화 또는 다상화 방식이 적용되고 있는데, 예를들면, 기존의 12펄스 다이오드 정류기는 두 개의 6펄스 다이오드 브리지를 위상변압기에 의하여 고전압용에서는 직렬로, 고전류용에서는 병렬로 연결하여 사용하는 것이다. 이때, 12펄스 다이오드 정류기의 입력전류에는 5차, 7차 고조파가 제거된다.⁽²⁾ 일반적으로 펄스수를 더욱 증가시키기 위하여는 다이오드 브리지와 위상변압기를 추가해야 하므로 장치의 부피, 용량, 가격 등

이 상승된다.^[3] 한편, 병렬접속형 정류기의 상간변압기에 탭을 절환하는 방식에서는 이 다이오드 브리지와 위상변압기를 추가할 필요가 없고 상간변압기의 탭에 연결된 스위칭소자의 수를 증가시키면 된다.^[4] 또한, 6펄스 정류기에 3상 4선식 변압기와 피드백 컨버터를 사용하여 전류를 주입시켜 12펄스 또는 24펄스 정류기로 변환시키는 방식도 제안되었다.^[5] 최근에 수동소자만을 사용하여 간단히 24펄스정류기를 구현한 연구가 보고되었는데, 문헌^[6]은 병렬접속에 의한 다이오드 정류기의 고조파 저감방식으로 고전류용에, 문헌^[7]은 직렬접속에 의한 다이오드 정류기로 고전압용에 각각 적합하다.

본 논문에서는 새로운 직렬형 24펄스 다이오드 정류기 시스템을 제안한다. 제안하는 다이오드 정류기 시스템은 기존의 직렬형 12펄스 다이오드 정류기에 수동의 보조회로를 추가함으로써 구성되어지고, 입력전류의 5차, 7차, 11차, 13차, 17차 그리고 19차 고조파가 제거되어 거의 정현파에 가까운 전류파형을 얻을 수 있다. 또한, 출력 전압은 $n=24k$, $k=1,2,3,\dots$ 의 고조파 성분을 갖는 24펄스 특성을 가진다. 더욱이, 이 보조회로의 용량은 출력용량에 비하여 매우 작으며, 능동 스위칭소자를 사용하지 않으므로 외관에 강하고 구현이 간단하다. 따라서, 본 방식은 중·대용량 급의 고전압 비제어 (uncontrolled) 직류전원의 입력고조파 저감에 적합하다.

2. 제안하는 24펄스 다이오드 정류기 시스템

2.1 보조회로의 동작

그림 1은 제안하는 24펄스 다이오드 정류기 시스템을 나타낸다. 제안된 24펄스 다이오드 정류기는 기존의 직렬형 12펄스 다이오드 정류기에 보조회로를 추가한 것이다. 이 보조회로는 두대의 변압기 T_{pq} 와 T_m , 직류전압 분할용 콘덴서 C_p 와 C_q 그리고 다이오드 D_p 와 D_q 로 구성된다. 그림 1에서 직류콘덴서 C_p 와 C_q 의 정전용량은 같고, 변압기 T_{pq} 의 중간탭을 이용하면 'p' 와 'q' 의 중간점 'm' 을 얻을 수 있다. 이때, 전압 V_{pm} 은 다음과 같이 된다.

$$V_{pm} = \frac{1}{2} (V_{o1} + V_{o2}) \tag{1}$$

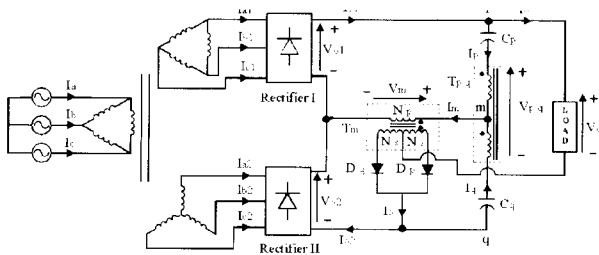


그림 1 제안하는 24펄스 정류기 시스템
Fig. 1 Circuit diagram of the proposed diode rectifier

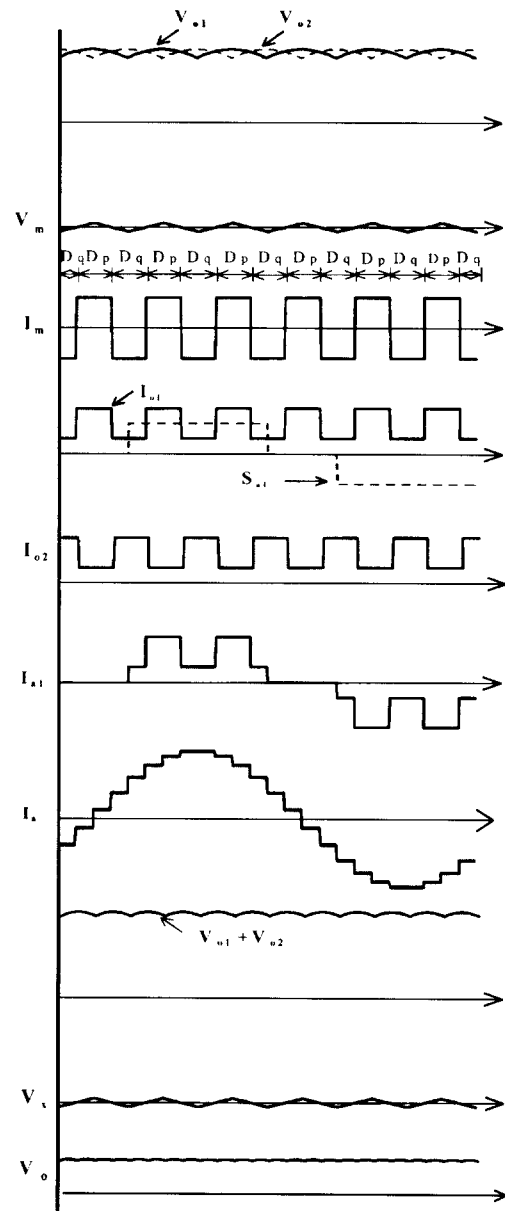


그림 2 계산 결과
($K=0.984$, $I_o=1(PU)$, $V_{LL}=1(PU)$ 일 때)
Fig. 2 Calculation results
(Assuming $k=0.984$, $I_o=1(PU)$ and $V_{LL}=1(PU)$)

그러므로, 변압기 T_m 의 1차측 전압은

$$V_m = \frac{1}{2} (V_{o1} - V_{o2}) \tag{2}$$

로 된다. 그림 2는 $N_s/N_p=0.984$, $I_o=1(PU)$, $V_{LL}=1(PU)$ 의 조건하에 계산된 각 전압, 전류의 파형을 나타낸다. 여기에

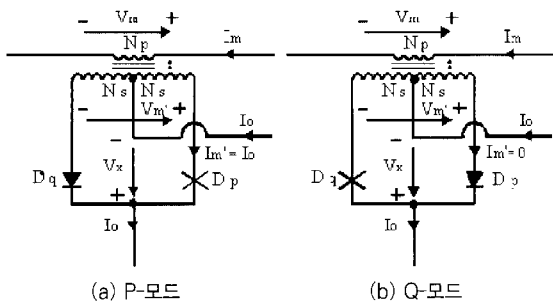


그림 3 변압기 T_m 의 동작
Fig. 3 Operation of transformer T_m

서 전압 V_m 은 삼각파형 이고, 주파수는 입력전원 주파수의 6 배 가 된다. 변압기 T_m 에 걸리는 전압 V_m 의 극성에 따라, 연결된 다이오드 D_p 와 D_q 는 다음 두 가지 모드로 동작한다.

◆ P-모드 ($V_m > 0$ 경우, 그림 3(a))

다이오드 D_p 는 온, D_q 는 오프되므로 다이오드 D_p 를 통하여 부하전류 I_o 가 흐르게 된다. 이때, 변압기 1차측 전류 I_m 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_m = KI_o \tag{3}$$

여기에서 $K = \frac{N_s}{N_p}$ 로서 N_p 는 1차측 권수이고, N_s 는 2차측 권수의 절반이 된다.

◆ Q-모드 ($V_m < 0$ 경우, 그림 3(b))

다이오드 D_q 는 온, D_p 오프 되므로 다이오드 D_q 를 통하여 부하전류 I_o 가 흐르게 된다. 이때,

$$I_m = -KI_o \tag{4}$$

로 되어, 식 (3)과 (4)로부터, 전류 I_m 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_m = \text{SGN}(V_m)KI_o \tag{5}$$

여기서 $\text{SGN}(\bullet)$ 은 부호함수이다.

2.2 입력 전류 해석

본 절에서는 입력전류의 해석을 통하여 입력전류의 THD가 최소가 되는 최적 권수비 K 를 구한다. 그림 1에서 주 변압기의 기자력(MMF) 관계식으로부터 'a' 상에 대한 전원측 입력 전류는 정류기 입력전류로 표현할 수 있다.

$$I_a = I_{a1} + \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{a2} - I_{c2}) \tag{6}$$

정류기 입력전류는 다음과 같이 스위칭 함수와 정류기 출력 전류로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} I_{o1}, \quad \begin{bmatrix} I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a2} \\ S_{b2} \\ S_{c2} \end{bmatrix} I_{o2} \tag{7}$$

정류기 출력 전류 I_{o1} 와 I_{o2} 는

$$\begin{aligned} I_{o1} &= I_o + I_p \\ I_{o2} &= I_o - I_q \end{aligned} \tag{8}$$

로 되고, 또한,

$$I_m = I_p + I_q \tag{9}$$

이고, 콘덴서 C_p 와 C_q 및 변압기 T_{pq} 의 동작으로,

$$I_p = I_q \tag{10}$$

이므로, 식(8)-(10)에 의해 다음 식을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned} I_{o1} &= I_o + \frac{1}{2}I_m \\ I_{o2} &= I_o - \frac{1}{2}I_m \end{aligned} \tag{11}$$

그러므로, 식 (5), (6), (7) 그리고 (11)로부터 입력 전류 I_a 는 다음과 같이 된다.

$$I_a = I_o(S_x + \frac{1}{2}\text{SGN}(V_m)KS_y) \tag{12}$$

여기서,

$$\begin{aligned} S_x &= S_{a1} + \frac{1}{\sqrt{3}}(S_{a2} - S_{c2}) \\ S_y &= S_{a1} - \frac{1}{\sqrt{3}}(S_{a2} - S_{c2}) \end{aligned} \tag{13}$$

식 (12)로부터 I_a 는 권수비 K 의 값에 따라 변하는 것을 알

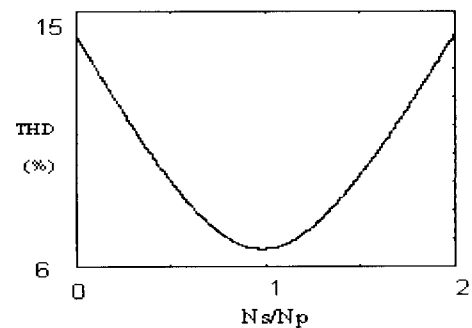


그림 4 권수비 $K = \frac{N_s}{N_p}$ 에 대한 I_a 의 THD 곡선

FIG. 4 Variation in THD of current I_a for varying $K = \frac{N_s}{N_p}$

수 있다. 그림 4는 권수비 K 에 대한 입력 전류 I_o 의 THD를 구한 것이다. 권수비가 $K = 0.984$ 일 때 THD는 6.62%로 최소가 된다. 즉, 제안한 시스템은 $n=22$ 까지의 모든 고조파를 제거하는 24펄스 시스템으로 동작한다.

2.3 출력 전압 해석

그림 3으로부터 출력전압은

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} + V_x \quad (14)$$

로 표현되고, 각각의 동작모드에 따라서 전압 V_x 는

$$V_x = \text{SGN}(V_m) \frac{N_s}{N_p} V_m \quad (15)$$

로 되어, 출력전압 V_o 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} + \text{SGN}(V_m) \frac{1}{2} K (V_{o1} - V_{o2}) \quad (16)$$

식 (16)으로부터 계산된 출력전압 V_o 를 그림 2에 나타내었으며, 24펄스 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

2.4 소자 정격 계산

6펄스 정류기 각각의 출력전압은 다음 식과 같이 푸리에 급수로 나타낼 수 있다.

$$V_{o1} = V_{LL} \left(1 - \sum_{n=6, 12, 18, \dots}^{\infty} \frac{2}{n^2 - 1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\omega t \right) \quad (17)$$

$$V_{o2} = V_{LL} \left(1 - \sum_{n=6, 12, 18, \dots}^{\infty} \frac{2}{n^2 - 1} \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right)$$

두 개의 브리지를 직렬로 접속하였으므로 출력전압 V_o 는

$$V_o = 2 \times 1.35 V_{LL} \quad (18)$$

로 되어, 식 (2)와 (17)로부터 변압기 T_m 의 1차측 권선에 걸리는 전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V_m = 2.70 V_{LL} \sum_{n=6, 12, 18, \dots}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \sin n\left(\omega t + \frac{\pi}{12}\right) \quad (19)$$

여기서 V_m 의 실효값은

$$|V_m| = 0.0673 V_{LL} \quad (20)$$

로 되고, 변압기 T_m 의 2차측 권선에 걸리는 전압의 실효값은

$$|V'_m| = 0.0673 \times 2 \times 0.984 V_{LL} \quad (21)$$

로 된다. 그림 2와 그림 3으로부터 전류 I_m 의 실효값은

$$|I_m| = 0.984 I_o \quad (22)$$

로 되어, 전류 I'_m 의 실효값은

$$|I'_m| = 0.707 I_o \quad (23)$$

이므로, 변압기 T_m 의 총용량은 다음과 같다.

$$VA_m = |V_m| |I_m| + |V'_m| |I'_m| = 0.059 V_o I_o \quad (24)$$

한편, 변압기 T_{pq} 에 걸리는 전압은

$$V_{pq} = (V_{o1} + V_{o2})_{av} \quad (25)$$

$$= -5.40 V_{LL} \sum_{n=12, 24, 36, \dots}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cos n\left(\omega t + \frac{\pi}{12}\right)$$

이고, V_{pq} 의 실효값은

$$|V_{pq}| = 0.0341 V_{LL} \quad (26)$$

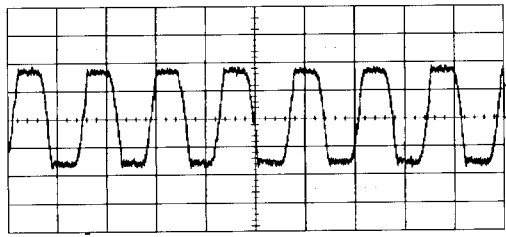
로 되며, $I_p = \frac{1}{2} I_m$ 이므로 변압기 T_{pq} 의 총용량은

$$VA_{pq} = |V_{pq}| |I_m| = 0.006 V_o I_o \quad (27)$$

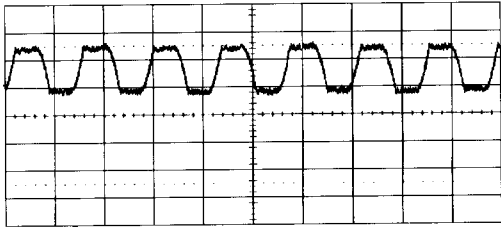
로 된다. 기존의 직렬형 12펄스 다이오드 정류기와 제안한 24펄스 시스템의 각 소자의 정격 및 변압기의 용량을 표 I에서 비교하였다. 표 I에서 보여지는 바와 같이 제안한 시스템에서 출력용량대비 추가된 변압기의 총용량은 0.066 P_o 로 매우 작다.

표 1 소자의 정격 비교
Table 1 Comparison of component ratings

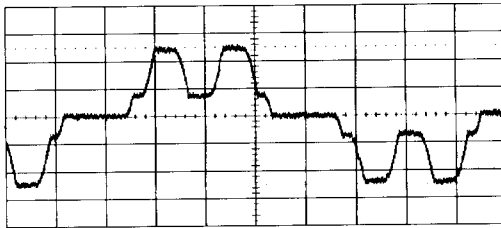
		기존의 12 펄스 시스템	제안하는 24 펄스 시스템
주변압기		1.03 $V_o I_o$	1.094 $V_o I_o$
정류 다이오드	V_{peak}	0.524 V_o	0.524 V_o
	$ I $	0.577 I_o	0.639 I_o
변압기 T_{pq}		-	0.059 $V_o I_o$
변압기 T_m		-	0.006 $V_o I_o$
다이오드 D_b 또는 D_a	V_{peak}	-	0.085 V_o
	$ I $	-	0.707 I_o



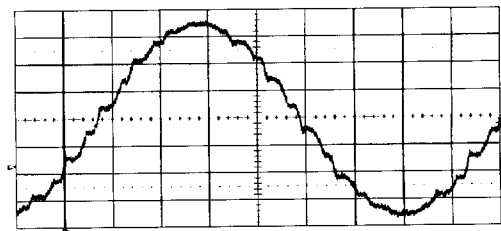
(a) 전류 I_m
(a) Current I_m



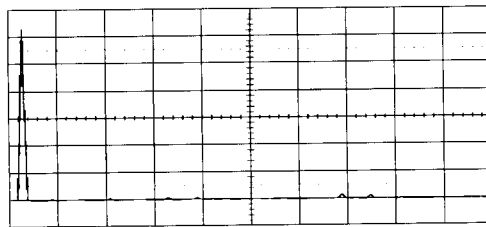
(b) 전류 I_{o1}
(b) Current I_{o1}



(c) 전류 I_{a1}
(c) Rectifier input current I_{a1}



(d) 전류 I_a
(d) Input current I_a



(e) 전류 I_a 의 FFT
(e) FFT of I_a

그림 5 제안된 24펄스 시스템의 실험결과(2A/Div)
Fig. 5 Experimental results for the proposed 24-pulse system(2A/Div)

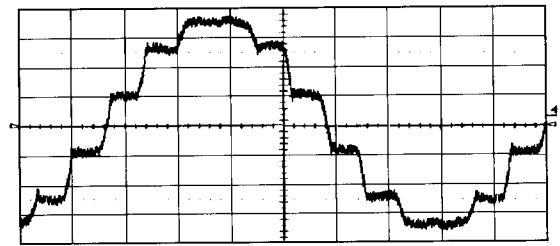


그림 6 기존의 12펄스 시스템의 실험결과(2A/Div) : 입력전류
Fig. 6 Experimental result for the conventional 12-pulse system(2A/DIV.):Input current

3. 실험 및 고찰

제안한 24펄스 다이오드 정류기의 구현을 위해 220V,3KVA 정류기 시스템이 제작되었으며, 실험결과를 그림 5, 그림 6에 나타낸다. 그림 5(a)는 변압기 T_m 에 연결된 두 개의 다이오드 동작에 의한 전류 I_m 을 나타낸다. 그림 5(b)에서는 정류기 출력 전류 I_{o1} 을 나타낸다. 그림 5(c)는 정류기 입력전류 I_{a1} 을 나타내고, 5(d)와 5(e)는 입력전류 I_a 와 I_a 의 FFT를 나타낸다. 그림 5(e)에서 입력전류 I_a 는 5차, 7차, 11차, 13차, 17차 그리고 19차 고조파가 제거되었음을 알 수 있다. 그림 6은 기존의 12펄스 다이오드 정류기의 입력전류 파형을 제안된 시스템과 비교하기 위해 제시하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 24펄스 다이오드 정류기 시스템을 제안하였다. 제안한 방식은 기존의 직렬형 12펄스 다이오드 정류기 시스템에 수동소자만을 추가하여 정현파에 가까운 입력전류를 갖는다. 이 방식은 능동소자를 사용하지 않으므로 외란에 강하고, 구현이 간단하며, 출력용량대비 추가된 변압기의 총용량은 $0.065 P_o$ 로 매우 작다. 또한, 문헌^[1]의 방식과 비교하여 동일한 성능을 가지며, 보조회로에서 다이오드의 수를 더욱 감소시켰다. 따라서, 본 방식은 중·대용량급의 고전압 비제어(uncontrolled) 직류전원이 필요한 인버터나 무정전 전원장치등의 앞단에서 입력고조파 저감에 경제적이고 효율적이다. 또한, 220V, 3KVA 정류기 시스템의 실험을 통하여 제안한 시스템의 타당성을 검증하였다. 또한 향후의 연구로서 사이리스터 정류기에 본 방식을 적용하는 과제가 진행중이다.

본 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE PES and Static Converter Committee of IAS, Jan. 1993.
- [2] J. Schaefer, Rectifier Circuits: Theory and Design, John Wiley & Sons, Inc., 1965.
- [3] G. Oliver, etc. al, "Novel Transformer Connection to Improve Current Sharing on High Current DC Rectifiers", IEEE IAS conf., 1993.
- [4] S. Miyairi, etc. al, "New Method for Reducing Harmonics Involved in Input and Output of Rectifier with Interphase Transformer", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-22, no. 5, Sep/Oct 1986.
- [5] 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.
- [6] S. Choi, B. Lee and P. Enjeti, "New 24-Pulse Diode Rectifier Systems for Utility Interface of High Power AC Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Applications, pp.531~541, vol.33, no.2, Mar./April 1997.
- [7] Y. Nishida and M. Nakaoka, "A New Harmonic Reducing Three Phase Diode Rectifier for High Voltage and High Power Applications", pp.1624~1632, IEEE IAS conf., 1997.

〈 저 자 소 개 〉



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대학교 전자공학과 졸업(학사). 1992년 미국 Texas A&M Univ. 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 및 Journal of Electrical Engineering and Information Science 편집위원.



김기용(金基勇)

1943년 1월 4일생. 1965년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 서울산업대학교 제어계측공학과 교수.