

고주파 공진형 인버터식 X선 발생장치의 설계

論 文

51B-1-5

Design of High Frequency Resonant Inverter Type X-Ray Generator

李成吉* · 朴秀剛** · 白亨來*** · 鄭壽福***

(Seong-Kil Lee · Su-Kang Park · Hyung-Lae Baek · Soo-Bok Chung)

Abstract - Most X-ray generator had been used do rectifier type transformer high tension generator which is supplied in a clinical diagnosis. But it is difficult to miniaturize and become light weight. Also, because the ripple rate of tube voltage is high, X-ray generating efficiency is very low. Therefore, it is supplied gradually from abroad being developed high tension generator for inverter type X-ray generator which use semi-conductor switching element for electric power that have high speed switching ability to solved these problem. But, semi-conductor element of big capacity are used by X-ray tube's big consumption power and diffusion is difficult in the small size hospital because production cost is ascending by doing digital control through DSP and product price becomes expensive. Therefore, in this paper, design and manufactured CR type voltage divider for feedback control of tube voltage of high frequency resonance type inverter and high tension transformer for high frequency to apply economical diffusion type X-ray generator which have wide output voltage and load extent. It is proved do X-ray generator and stability of X-ray tube's output characteristics through an experiment.

Key Words : Inverter type X-ray generator, High frequency resonance type inverter, High tension transformer

1. 서 론

X선을 발생시키기 위해서는 고진공의 X선관 음극측 필라멘트를 가열하여 열전자를 발생시키고, 음극과 양극의 양단간에 20~150kV 정도의 맥동률이 작고 안정화된 직류고전압이 X선관에 공급되어야 한다.[1] 이때 X선관에서 방출되는 X선의 에너지특성은 X선관에 가해지는 직류고전압의 파형 특성에 의존하게 되므로 관전압 안정특성이 매우 중요시된다.

현재 임상에 보급되어 있는 대부분의 X선 발생장치는 상용교류 전원을 이용해 교류 고압을 발생시키고 정류된 직류고전압을 X선관에 인가하여 X선을 발생하는 정류형 변압기식 고압발생장치가 사용되어 왔다. 그러나 이것은 원리적으로 구조가 소형, 경량화가 어려운 점과 관전압의 맥동률이 커서 X선발생 효율이 매우 낮고 X선관 출력제어장치의 동작이 정밀치 못해 신뢰성이 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 종래의 진단용 X선 발생장치의 문제점들을 개선하기 위해서 고속 스위칭능력을 갖는 전력용 반도체스위칭 소자를 이용한 인버터식 X선 발생용 고압발생장치가 개발되어 고압변압기의 입력전압을 고주파화 함으로써 변압기 크기를 소형, 경량화 할 수 있고, 관전압의 빠른 상승시간으로 인해 1ms 정도의

짧은 시간도 조사가 가능하였다. 그러나 X선관의 소비 전력이 큼으로 대용량의 반도체 소자들을 사용하고 DSP를 통한 디지털 제어를 함으로써 생산원가가 상승하고 제품가격이 비싸져 소형병원에는 보급이 어려운 실정이다.

따라서 본 논문에서는 정밀제어가 가능하고, 넓은 출력전압과 부하범위를 갖으며 경제적인 보급형 X선발생장치에 적용할 고주파 공진형 인버터와 고주파용 고압변압기, X선 발생장치의 특성분석 및 고정도의 관전압의 피드백제어를 위한 CR형 분압기를 설계 제작하여 X선관의 출력특성의 안정성을 입증하였다.

2. X선 발생용 고주파 고압발생장치

2.1 고주파 공진형 인버터

X선 발생장치는 고압변압기 2차측 절연을 위하여 절연 거리를 크게 설정하여 설계되어야 하는데 이것에 의해서 변압기의 누설인덕턴스가 증가하게 된다. 이 누설인덕턴스의 증가로 인하여 고압발생용 인버터의 주파수를 고주파화 할 경우 고압변압기의 임피던스가 크게 되어 변압기의 1차측에서 2차측으로 에너지 전달이 어려워짐으로 고압 발생장치에서 충분한 에너지 발생이 곤란하게 된다. 따라서 고압 발생장치를 대용량화 할 경우 공진용 커패시터를 추가하면 고압 변압기의 누설인덕턴스 성분과 함께 공진회로를 구성할 수 있어 고압 발생장치의 대출력화가 용이해진다. 또한 주파수를 높임으로써 철심 단면적과 권선의 감은 수를 줄일 수 있고 고압 변압기는 대폭 소형화할 수 있다. 이때 주파수를 고주파

* 正 會 員 : 光州保健大學 放射線科 教授
** 正 會 員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 博士科程修了
*** 正 會 員 : 朝鮮大 工大 電氣工學科 教授
接受日字 : 2001年 09月 12日
最終完了 : 2001年 12月 18日

화 하기 위해서 인버터를 사용한다.

식 (1)은 변압기의 유도기전력 E 를 나타낸다.[2]

$$E = K \cdot f \cdot B \cdot A \cdot n \quad (1)$$

(K : 비례정수, f : 주파수, B : 자속밀도, A : 철심단면적, n : 권선수)

본 논문의 X선발생장치에서는 전파브리지 직렬공진형 인버터를 사용하였다.

그림 1은 고주파 공진형 인버터를 도입한 X선 발생장치의 전력변환시스템의 구성을 나타낸다. 인버터에 공급되는 직류 전원은 저전압 정류장치를 이용하였고 직류 입력전압을 높은 주파수의 교류 출력전압으로 만들기 위해 고속 스위칭소자인 IGBT를 사용하여 공진형 PWM 인버터를 구성하였다. 인버터 출력을 고전압으로 승압시키기 위한 고압변압기와 고압케이블이 연결되고 부하로 작용하는 X-선관에 직류 고전압을 가하기 위한 다이오드 정류회로와 X-선관의 필라멘트 전류를 제어하는 고주파인버터로 구성되어 있다.

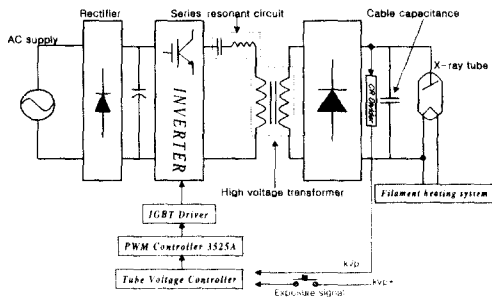


그림 1 고주파 공진형 인버터식 X선 발생장치의 구조
Fig. 1 Configuration of high frequency resonant inverter type x-ray generator

본 논문의 X선 발생장치에서 공진형 인버터의 공진 파미터의 설계는 인버터의 출력전류가 스위칭 소자의 정격인 400A를 넘지 않도록 하기 위해 공진인덕턴스의 값을 $10\mu H$, 공진 콘덴서는 $20\mu F$ 으로 하였고 이때 고압변압기의 1차권선의 저항은 0.7Ω 으로 설계하였다.

공진주파수는 약 11kHz이고 공진전류는 356A이다. 인버터의 스위칭 주파수인 20kHz보다 공진주파수를 낮게 한 이유는 인버터의 구형파 전압의 고조파를 더 고차로 함으로써 고조파를 제어하여 필터의 효율을 증가시키고, 스위칭 소자의 파괴를 막기 위해 인버터의 출력전류를 IGBT의 정격전류인 400A를 넘지 않게 하기 위함이다.

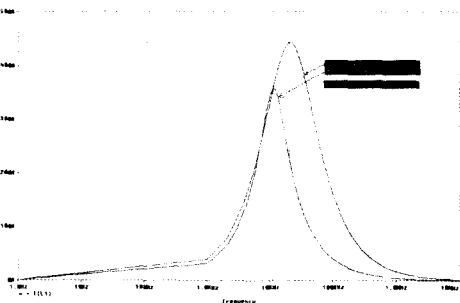


그림 2 공진 주파수 그래프
Fig. 2 Graph of resonant frequency

그림 2는 공진인덕턴스를 각각 $3\mu H$ 와 $10\mu H$ 로 변화시켰을 때 공진주파수와 공진전류의 관계를 나타내며 $3\mu H$ 일 때 공진주파수는 20kHz이고 공진전류는 442A이고 $10\mu H$ 일 때 공진주파수가 11kHz이고 공진전류는 356A이다.

2.2 고압변압기

본 논문에서 제작한 고압변압기는 고주파용으로 설계함으로 철심재료에는 고주파의 외부자계를 가할 때, 자성체에 유도되는 외부자계가 매우 작아서 인덕터 및 변압기의 철심으로 사용되는 페라이트를[3][4]사용하여 와전류를 줄임으로 음손실을 줄일 수 있었다. 그림 3은 고압변압기의 구조를 나타낸 것이다. 1차 권선과 2차 권선은 철심에 2각으로 나누어 감겨져 있고, 한 쪽은 양극측, 다른 한쪽은 음극측에 접속되어 있다. 2차 권선은 표유용량을 낮추기 위해 2개로 분할되어 있다. 그림 4는 변압기에 사용된 코어의 외형과 치수를 나타낸다.

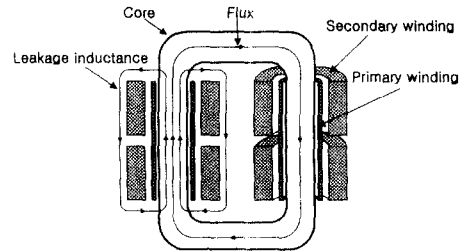


그림 3 고전압 변압기의 구조
Fig. 3 Configuration of high voltage transformer

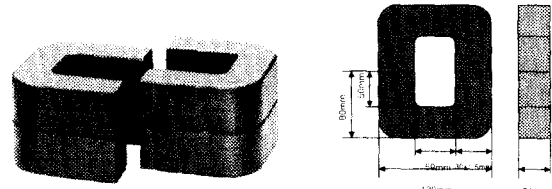


그림 4 코어의 외형
Fig. 4 Dimensions of core

그림 5에서는 고주파 고압변압기의 권선의 개략적인 구조를 나타낸다. 1차권선과 2차권선은 각각 2개로 분할하여 배치하였다. 이와 같이 1차 권선은 병렬로 접속함에 따라서 전류용량을 확보함과 동시에 누설인덕턴스를 저감시킬 수 있다.

1차권선은 1층 구조로 하고 턴수는 12회이고 2차권선은 권선수가 많기 때문에 다층구조로 되어 있고, 층 사이에 감은 절연지 장수를 바꾸어 내전압의 정전용량을 최적화하였다. 2차권선은 1각마다 2분할하여 각각 직렬로 접속함으로써 권선의 표유용량을 저감하였다.

통상 75kV이상의 내압을 견디기 위해 1차와 2차의 권선간에는 일정한 거리를 두어야 되는데 이것에 따라 누설자속이 생겨 누설인덕턴스가 작용한다. 고전압 변압기의 누설인덕턴스가 크다면 인버터의 고주파 동작과 함께 출력의 임피던스

를 증대시키게 되고 X선 고전압장치의 대출력화에 바람직하지 않다. 그래서 고전압 변압기 입력측에 직렬콘덴서를 삽입하여 직렬공진회로를 구성하고 이 누설인덕턴스에서 전류공진을 일으켜서 고전압 변압기로부터 부하에 충분한 전류를 공급하였다.

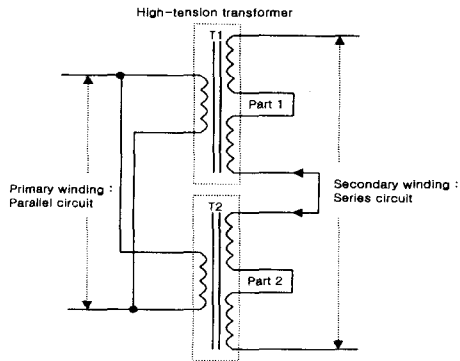


그림 5 변압기의 권선도
Fig. 5 Winding diagram of transformer

변압기 1차측 권선수 선정은 식(2)에 의해서 1차측 권선수 n_p 를 선정하였다.

$$n_p = \frac{(V_p - 0.05 V_p)}{4.44f B_{sat} A_c} \times 10^8 \quad (2)$$

(B_{sat} : 포화 자속밀도(gauss), A_c : 철심의 유효 단면적(cm^2))

또한, 고압변압기의 2차측 권선수 n_s 는 식 (3)과 같이 선정하였다.[5][6]

$$n_s = \frac{n_p (V_s)}{V_p} \quad (3)$$

변압기 1차 권선은 직접 코어위에 감았으며 2차 권선은 수지제품의 보빈 위에 감았다. 2차측권선을 25층으로 하여 각 층마다 30턴씩 감았고 중간 내압은 1.5kV정도이다. 다층으로 나누어 감았기 때문에 권선간의 부유용량이 증가하여 고압발생시 스파크가 생기는 현상을 예폭시 물냉기법을 이용하여 제거할 수 있었다. 그림 6은 고주파 고압변압기와 필라멘트 가열 변압기의 실물이다. 표 1은 고압변압기의 설계사양을 나타낸다.

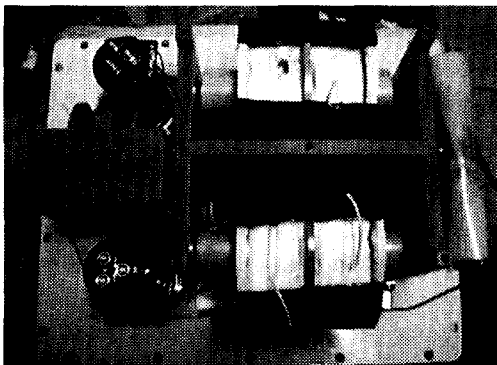


그림 6 필라멘트 가열 변압기와 고전압 변압기
Fig. 6 HFHV transformer and filament heating transformer

표 1 변압기의 사양

Table 1 Specification of transformer

Structure	core type, pyramid double winding type (1st : parallel, 2nd : serise) layer insulation : acryl spacer, insulation oil, insulation paper
Core wood & size	TDK PE 22, 110×160×20mm
1st turn number & standard winding	12turns Cu sheet (2×6mm)
2nd turn number & standard winding	3000turns(Φ:0.23mm) : enamel wire

2.3 CR 분압기

X선 발생용 고주파 고압 발생장치에서 X선 조사시간 동안 X선관에 걸린 직류 고압을 분압된 형태의 전압으로 정확히 측정하는 것은 X선 장비의 특성 분석 및 고정도의 관전압 제어에 있어 필수적인 요소가 된다.

고압을 측정하는데는 저항만으로 구성된 저항 분압기는 제작이 용이하므로 많이 사용되지만 이러한 형태의 분압기는 집지에 대한 분압기의 분포 표유용량에 기인한 주파수 특성이 낮기 때문에 분압기의 출력전압은 분압비에 비례하지 않는다. 때문에 이러한 대지에 대한 표유용량성분의 영향을 보상해 줄 수 있는 분압기가 고려되어져야 하는데 그 대표적인 형태의 분압기가 병렬 CR형 분압기라고 할 수 있다.

본 논문에서 설계, 제작된 병렬 CR형 분압기는 고압용 저항(200MΩ) 2개를 병렬로 1조씩 연결 5조를 직렬로 연결하고 끝단에 출력저항 33kΩ을 연결하고 이에 대해 각각의 저항에 커패시터를 연결하였다. 제작된 분압기의 분압비는 약 15,000 : 1로 하였다. 또한, 제작된 분압기는 고압변압기 및 고압 다이오드로 구성된 고압 정류부와 함께 절연유에 유침시켰다. X선용 고압 발생장치에서는 관의 양극측 또한 음극측의 고압 측정이 필요하므로 분압기가 두 개 필요하였다. 저항의 내 전력을 줄이기 위하여 저항 2개를 병렬로 사용하였고 콘덴서의 내압을 줄이기 위하여 직렬로 콘덴서를 연결하여 회로를 구성하였다. 분압기의 전달함수식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} \quad (4)$$

식 (4)에서 $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 가 되도록 각각의 저항값과 커패시터 값을 정하면 주파수에 독립적인 식 (5)와 같다.[7]

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

이와 같은 방법으로 검증하는 출력전압은 다양한 주파수의 리플도 제어가 가능할 뿐만 아니라 전원장치의 과도응답 특성을 향상시킬 수 있었다. 그림 7은 분압기의 회로를 나타낸다.

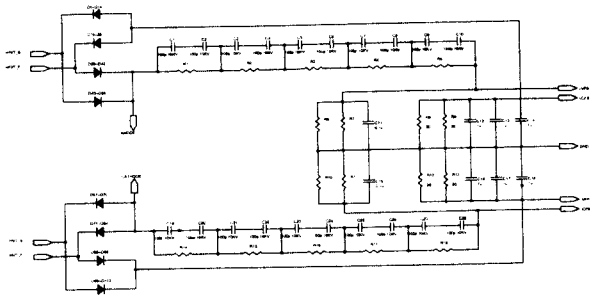


그림 7 병렬 CR 형태의 분압기
Fig. 7 Parallel CR type voltage divider

3. 실험장치 및 결과고찰

본 연구에서 설계한 X선 발생장치의 구성은 저압부인 고압변압기 전단에 구성되어지는 정류부와 평활콘덴서, 직렬공진형 인버터로 구성되어지고 고압부인 인버터의 선간 전압을 승압하여 고압을 얻기 위한 고주파 고압변압기와 고압을 정류하여 X선관 양단에 직류 고압을 공급하기 위한 고압 정류부와 X선관 입력 전압 공급선(feeder)으로서 출력측의 평활필터로 사용되는 고압 케이블이 있고, X선관 음극의 필라멘트를 가열하기 위한 필라멘트 가열회로로 인버터와 필라멘트 가열용 변압기로 이루어진다. 그림 8은 실험장치의 모습을 나타낸다. 표 2는 고주파 공진형 인버터의 사양을 나타낸다.

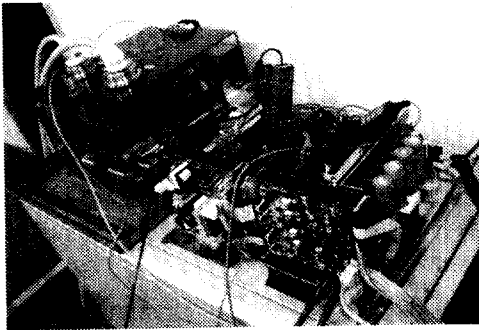


그림 8 실험장치
Fig. 8 Experimental equipment

표 2 인버터의 설계정수

Table 2. Parameters of inverter

Parameters	Value
Line voltage	AC 220[V]
DC link voltage	310[V]
Switching frequency	20[kHz]
Smoothing condenser	4700 μ F, 315[WV] \times 6
Resonant condenser	20[μ F]
Bridge diode	600[V], 50[A] \times 2
IGBT	400[A], 600[V]
Resonant inductance	10[μ H]

그림 9의 채널1은 인버터의 출력전류이고 채널2와 채널3의 신호는 180° 반전되어 IGBT에 각각 인가되는 신호이며 듀티비에 따라 인버터의 출력을 제어할 수 있다.

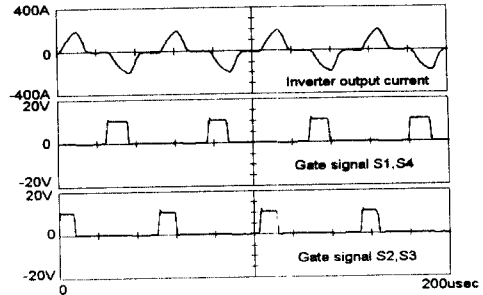


그림 9 인버터의 출력전류와 게이트 신호
Fig. 9 Output current and gate signal of inverter

그림 10은 관전압이 100kV, 관전류 100mA일 때 인버터의 DC링크 전압(채널1)과 IGBT의 컬렉터와 에미터간에 걸리는 Vce(채널2)와 이때 흐르는 인버터의 출력전류(채널3)를 나타낸다. 그림 11은 관전압, 관전류를 피드백 제어하기 위한 CR 분압기에서 검출된 관전압과 증성집전류의 검출을 통한 관전류를 나타낸다. 채널1은 고압변압기 1차측 전류이고 채널2는 관전압, 채널3은 관전류를 나타낸다.

그림 12는 고압변압기 1차측의 전압 및 전류파형을 나타내고 이때 측정된 전압은 공진콘덴서와 공진인덕터의 후단인 고압변압기 1차측의 전압, 전류파형으로 공진회로의 전압강하로 인해 인버터의 출력전압보다는 낮게 나타난다.

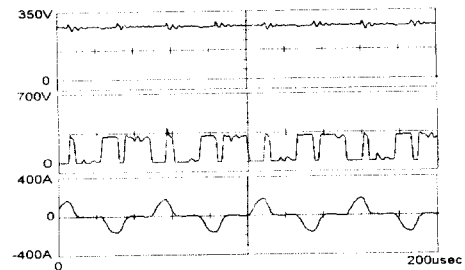


그림 10 IGBT의 컬렉터와 에미터간의 전압과 인버터의 출력전류파형

Fig. 10 IGBT C-E Voltage and current waveforms of inverter

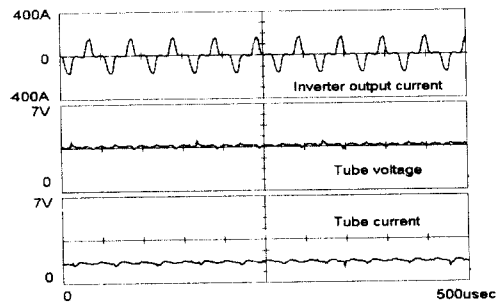


그림 11 CR분압기의 전압과 관전류파형
Fig. 11 Voltage of CR divider and tube current

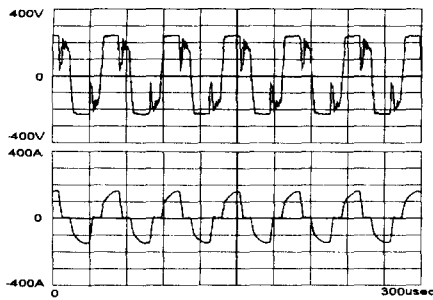


그림 12 고압변압기의 관전압과 1차측 권선에 흐르는 전류
 Fig. 12 Primary windings current and voltage waveforms of high tension transformer

그림 13은 CR분압기의 양극과 음극간의 관전압 파형을 나타내며 관전압이 높아짐에 따라 맥동률이 증가하였다. 그림 14는 고주파 공진형 인버터식 X선 장치를 이용해 관전류 50 mA, 조사시간 200 ms에서 관전압을 60kV, 80kV, 100kV, 120 kV로 변화시켰을 때의 관전압 파형으로 맥동률 (60kV: 6.2%, 80 kV: 6.8 %, 100 kV: 7.8 %, 120 kV: 8.8 %)의 변화폭이 매우 작고, 안정하게 나타났다.

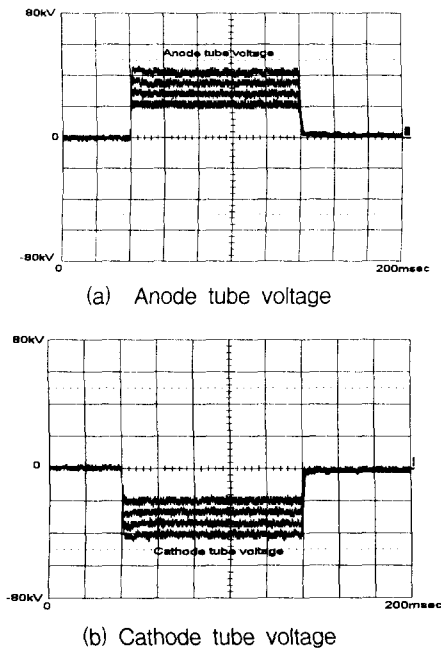


그림 13 CR분압기에 의한 관전압파형
 Fig. 13 Tube voltage waveforms with CR divider

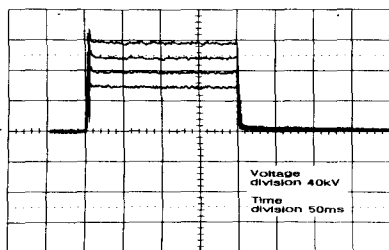


그림 14 X선관의 출력전압
 Fig. 14 Output voltage waveforms of X-tube

4. 결 론

고주파 공진형 인버터식 X선 발생장치를 설계, 제작하여 출력전압, 전류파형 등 출력특성을 실험하였다.

공진회로로 인버터를 구성하고 고주파로 동작시킴으로써 고압변압기를 포함한 전체시스템의 소형, 경량화를 도모하였고 X선 투시시 장시간 부하로 인하여 고압변압기의 2차측 권선중간의 부유용량이 증가하여 발생하는 스파크현상을 예폭시 진공물당기법을 이용하여 제거할 수 있었다. 또한, X선 장비의 특성 분석 및 고정도의 관전압의 피드백제어를 위해 고주파 고압변압기의 2차측의 관전압, 관전류 검출용 CR분압기를 설계하였다.

제작한 CR분압기는 실제의 출력특성과 거의 일치된 신호를 얻을 수 있어 인버터식 X선 발생 장치의 정확한 제어를 가능케 하였고 고밀도 전력, 저 노이즈와 빠른 과도 응답특성을 갖는 X선 발생장치를 제작할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] T.F. Wu and J.C. Hung, "A PDM Controlled Series Resonant Multi-level Converter Applied X-ray Generators" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.34, pp.1177-1182, 1999
- [2] H. S. Kim, C. Y. Won, D. W. Yoo, S. W. Ha, " A Study on High Power Resonant Converter for X-ray Generator", Proceedings of ICPE'95, p.p 288-294, 1995.
- [3] 高橋透影; "인버터식 X-선 고전압 장치의 특성과 임상 효과", 日本放射線技術學會雜誌, Vol. 46(12), pp.1901-1908, 1990.
- [4] Y. J. Kim, T. Hatakeyama, and M. Nakaoka, "Comparative Evaluations of Phase-Shifted PWM Resonant Inverter-fed DC-DC Converter with High-Voltage High-Frequency Transformer Link," Proceedings of PEDS'95, pp. 657-664, 1995.
- [5] Y. J. Kim, M. Nakaoka, H. Takano, and T. Hatakeyama, "Comparative Performance Evaluations of High-Voltage Transformer Parameter Resonant Inverter-Linked High-Power DC-DC Converter with Phase-Shifted PWM Scheme," Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, pp. 120-127, 1995.
- [6] M. Nakaoka, S. Nagai, Y. J. Kim, Y. Ogino, and Y. Murakami, "The State of the art Phase-shifted ZVS-PWM Series & Parallel Resonant DC-DC Power Converter Using Internal Parasitic Circuit Components and New Digital Control", Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, pp. 62-70,

1992.

[7] Jun Takahashi, Hiroshi Takano, and Mutsuo Nakaoka, "A State-of-the-art 50kW-10 kHz Soft-Switching Assisted PWM DC-DC Converter for X-ray Power Generator," Proceedins of PCC'93, Yo-kohama, Japan, pp. 165-170, 1993.

저 자 소 개



이 성 길 (李 成 吉)

1956년 5월 12일생. 1987년 2월 조선대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 8월 조선대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2002년 현재 광주보건대학 방사선과 교수.

Tel : 062-958 7663

E-mail : leesk@www.kjhc-c.ac.kr



백 형 래 (白 亨 來)

1949년 5월 14일생. 1971년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 건국대 전기공학과 졸업(공학). 2002년 현재 조선대 공대 전기공학과 교수. 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 부회장. 전력전자학회 부회장

Tel : 062-230-7030, Fax : 062-225 6072

E-mail : hnbaek@mail.chosun.ac.kr



박 수 강 (朴 秀 剛)

1972년 4월 24일생. 1995년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 현재 조선대 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

Tel : 062 230 7863

E-mail : sujin111@stmail.chosun.ac.kr



정 수 복 (鄭 壽 福)

1945년 1월 23일생. 1969년 조선대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 현재 조선대 공대 전기과 교수.

Tel : 062-230-7027

E-mail : sbjung@mail.chosun.ac.kr