

진단 X-선용 40kW 고주파 고압 전원 시스템

金學成*, 朴榮國**, 吳俊龍**, 成基峯**

High Frequency High Voltage 40kW Power System for Diagnosis X-ray

Hack-Seong Kim, Young-Kook Park, Jun-Yong Oh, and Ki-Bong Sung

요 약

본 논문에서는 의료 진단용 40kW(125kV, 80mA)급 X-선 전원 장치에 대하여 연구하였다. 의료 X-선용 고전압 발생 장치의 구성과 X-선 관전압과 관전류 그리고 피폭량 제어에 대하여 기존 제어 방식과 비교 설명하였고 제어기 설계시 고려할 사항에 대하여 언급하였다. 또한, 본 시스템의 핵심이라 할 수 있는 고주파 고전압 변압기의 등가회로를 통한 기생 성분에 대하여 기술하였으며 본 연구에서 제작된 의료 X-선용 HFG 시스템의 출력특성의 우수성을 X-선관 부하 변동에 따른 X-선 관전류와 관전압 파형을 통하여 입증하였다.

ABSTRACT

Recently, the inverter type X-ray generator is rapidly replacing the conventional single-phase or three-phase X-ray generator, it has several merits of space-saving, high accuracy and reproducibility. This paper presents a 40kW(125kV, 80mA) high tension generator system for diagnosis X-ray. The control circuit and design consideration of the proposed high tension power supply are given. Issues in the design of high voltage isolating transformer are discussed. Experimental results are presented to verify the performance of the designed power supply for varying load conditions. The proposed apparatus has several advantages, e. g., the fast rising time of tube voltage, accuracy and reduced component size etc.

Key Words : X-ray generator, high tension power supply, high voltage isolating transformer

1. 서 론

X-선 전원시스템은 고전압 발생기가 인버터화 되면서 고주파화가 진행되고 있으며 이러한 고주파의 주요 목적은 단시간 촬영의 고성능화 및 전원장치의 소형화, 그리고 출력의 저 리플화라 할 수 있고 이러한 고주파 인버터식 고전압 발생장치는 발생된 고주파 교류

전압을 직류 고전압으로 변환하는데 있어 전기 절연 거리를 확보하면서 동시에 장치를 소형화하는 것이 중요한 과제라 할 수 있다.

또한, 환자의 안전성을 고려한 최소 X-선 피폭량만을 투사하기 위한 고정밀 X-선량 제어인 mAs제어가 반드시 요구된다^{[1][6][8]}. 이에 따라 본 논문에서는 진단 X-선 발생용 HFG(High Frequency Generator)로서 개발 상용화된 40kW급(최대 관전압 125kV, 최대 관전류 800mA) X-선 전원 장치에 대하여 소개한다. 본 장치는 X-선 피폭량인 mAs량을 별도의 X-선량 측정 센서를 사용하지 않고, V/F 컨버터 회로만을 사용하여 간단하지만 고정밀도의 최소 피폭량 제어를 실현하였고, 기존 페라이트 위주의 고주파 고압 변압기에 철심

*정회원, 동양공업전문대학 자동화시스템과 부교수

E-mail : kimhs@dongyang.ac.kr

**정회원, (주)포스콤 연구소 연구원

접수일자 : 2002. 7.25

1차심사 : 2002.11. 5

2차심사 : 2003. 2. 3

심사완료 : 2003. 2.17

을 사용 코스트 절감을 꾀하였으며, 이와 함께 고전압 발생장치의 핵심인 고압 변압기의 설계에 있어서도 분할 권선 방식을 사용한 배압회로를 통하여 보다 용이한 절연 방식을 구현하였고, 인버터부의 고주파 구동을 통하여 기존 장치들 중 동급 용량 대비 고압 변압기를 포함한 고주파 고전압 발생회로의 크기를 최소화하였다. 또한, X-선 관전류 제어에 관계되는 필라멘트의 가열 방식을 3단계 순서인 예열, 오버-슛, 지령치 가열로 수행함으로써 관전류의 빠른 응답특성을 구현하였다. 이에 따른 시스템 동작과 특성은 실험 파형을 통하여 나타내었다.

2. 진단 X-선용 HFG 시스템

X-선용 HFG는 크게 다음과 같은 기술을 요구한다.

- 1) HFG 회로 설계 및 고주파 구동 기술
- 2) 고정밀 관전압(kVp), 관전류(mA), 폭사 시간(sec)에 따른 피폭량(mAs) 제어 기술
- 3) 사용자 인터페이스 기술(X-선 장치 구동용 패널)

2.1 HFG 회로 설계

X-선용 HFG의 회로 구성은 그림 1에 나타낸바와 같이 크게 고전압 인버터부, 고압 변압기와 배압회로를 포함하는 고전압 발생부 그리고 X-선관 전류제어를 위한 필라멘트 가열부로 구성되어진다^{[2][3][5]}.

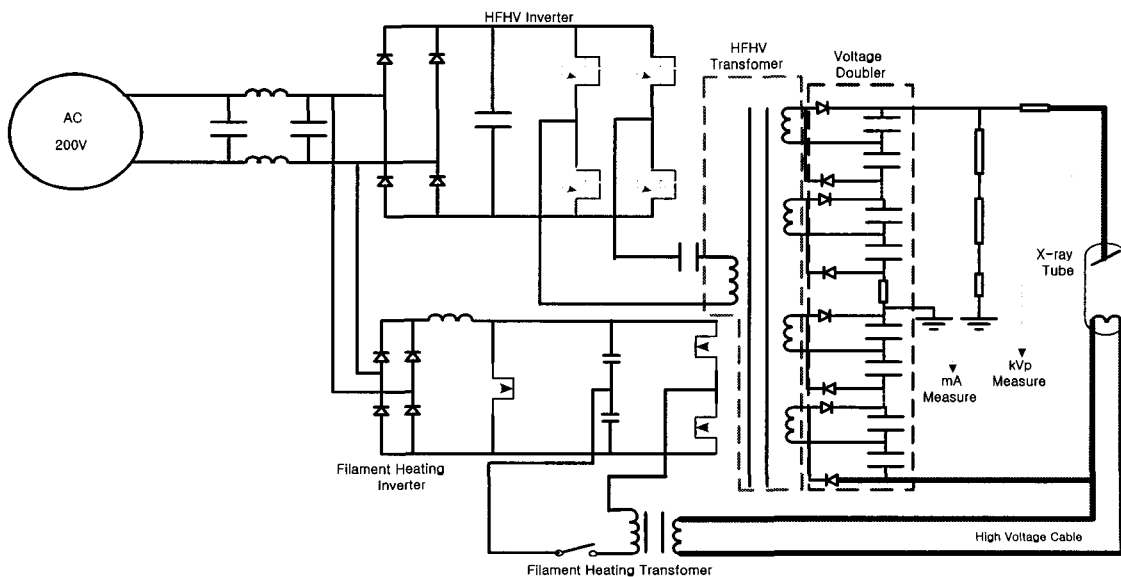


그림 1 진단 X-ray용 HFG 회로 구성도
Fig. 1 Configuration of HFG Circuit for Diagnosis X-ray

2.1.1 고주파 고전압 인버터부

인버터부는 전-브리지(Full-Bridge) 형태의 직류-교류 변환회로로 구성하였고, 반도체 스위칭 소자로는 IGBT를 채용 고정된 주파수에서 위상을 제어하는 위상천이 펄스폭(Phase-Shift PWM) 방식을 사용하여 스위칭 하였고, 고전압 변압기의 1차측에 20kHz의 고정된 주파수의 고주파 펄스 전압을 인가함으로써 장치의 소형경량화와 소음 감소를 도모하였다.

2.1.2 고주파 고전압 변압기

그림 2는 본 과제에서 제작한 고주파 고전압 변압기의 등가회로이다. 그림 2(a)는 고전압 변압기의 1차측과 2차측 단자가 서로 연결되었을 때의 기생성분인 표유용량, 누설자속 성분 등을 포함하는 회로를 나타내었다.

여기서,

- C_{10} : 고전압 변압기의 1차측 권선과 코어의 접지점 사이에 발생하는 표유용량 성분
- C_{20} : 부하와 고전압 변압기 2차측이 결합된 정전용량 성분(고전압 변압기의 2차측 권선의 각 코일층 사이의 정전용량과 2차측 권선과 절연유 함침된 고전압 변압기의 외함 접지점과의 정전용량 성분)
- C_{12} : 변압기의 1차측 권선과 2차측 권선 사이의 정전용량 성분

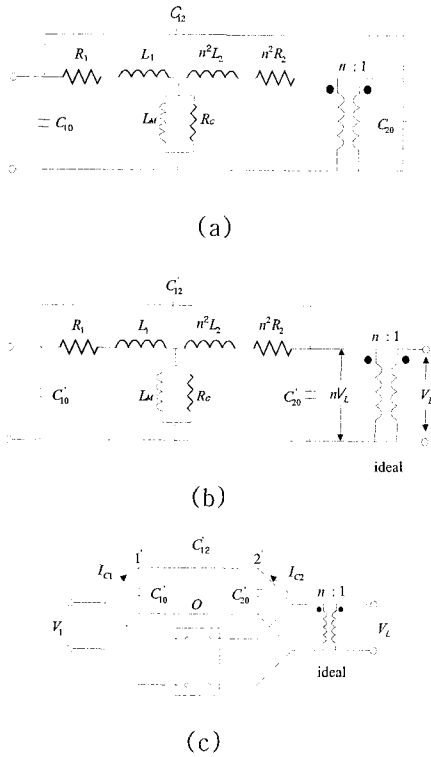


그림 2 고주파 고압변압기의 등가회로
 Fig. 2 Equivalent circuit of high frequency high voltage transformer

- R_1 : 고전압 변압기의 1차측 권선에 의해 발생되는 유효저항 성분
- $n^2 R_2$: 고전압 변압기의 2차측 권선에 의해 발생하는 유효저항 성분
- V_L : 2차측 출력전압
- $L_1, n^2 L_2$: 1, 2차측 누설 인덕턴스 성분

그림 3(b) 및 그림 3(c)는 표유용량 성분을 고전압 변압기의 1차측 관점에서 기술한 것으로서 만일 공통 단자 O 가 기준 노드라고 가정하면, 노드 1'과 노드 2'로 유입하는 전류는 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서 노드 1'과 노드 2'는 그림 2(a)에 대응된다.

$$I_{C1} = j\omega(C_{10} + C_{12})V_1 - j\omega \frac{C_{12}}{n} nV_L$$

$$\frac{I_{C2}}{n} = j\omega \left(\frac{C_{20} + C_{12}}{n^2} \right) nV_L - j\omega \frac{C_{12}}{n} V_L \quad (1)$$

이를 변압기의 1차측 관점에서 기술하면 그림 2(c)로부터 노드 1'과 노드 2'로 입력되는 전류는 식 (2)로 주어진다.

$$I_{C1} = j\omega(C'_{10} + C'_{12})V_1 - j\omega C'_{12} nV_L$$

$$\frac{I_{C2}}{n} = j\omega(C'_{20} + C'_{12})nV_L - j\omega C'_{12} V_1 \quad (2)$$

식 (1), (2)로부터 1차측 관점에서 표현되는 표유용량 성분은 다음 식과 같이 주어지며, 실제로 주어지는 표유용량 성분이다.

$$C'_{12} = \frac{C_{12}}{n}$$

$$C'_{10} = C_{10} + C_{12} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \quad (3)$$

$$C'_{20} = \frac{C_{20}}{n^2} + \frac{C_{12}}{n^2} \left(\frac{1}{n} - 1 \right)$$

승압형 변압기인 경우 변압기의 2차측에 대한 1차측의 권선비 n 은 1 보다 작기 때문에 식 (3)으로부터

$$C_{12} \left(1 - \frac{1}{n} \right) < 0 \quad (4)$$

이므로 그림 2(b)의 1차측 표유용량 C'_{10} 은 가상적인 음의 표유용량을 가질 수 있다. 또한, C'_{10} 성분은 C'_{12} 및 C'_{20} 성분들에 비해 아주 작기 때문에 회로 내에서 C'_{10} 성분은 다른 성분들에 비해 상대적으로 중요성이 적어 무시할 수 있다.

고전압 변압기의 자화 인덕턴스 성분 L_M 은 1차측 권선에 병렬로 연결되어 있고 다른 인덕턴스 성분이 훨씬 크기 때문에 무시할 수 있을 정도로 작다. 이는 자화 리액턴스 ωL_M 이 아주 높아서 shunt 효과가 무시되기 때문이다. 그리고 1차측 및 2차측 누설 인덕턴스 성분은 각각 L_1 및 $n^2 L_2$ 로 표현할 수 있다. 또한, 그림 2(b)의 등가회로에 표시된 R_c 성분은 고전압 변압기에 포함된 연자성체 코아에서 발생하는 손실량이다^{[4][5]}.

한편, 고주파 고전압 변압기를 제작할 때 코아의 선정에 유의해야 하는데 이는 고주파에서 와전류에 의해 발생하는 와전류 손실을 작게 하기 위함이다. 와전류 손실이 크면 고전압 변압기 자체에서의 에너지 손실량이 증가되므로 1차측의 에너지가 2차측으로 효율적으로 전달되기 어렵기 때문이다. 따라서 자성 재료가 갖는 전기 비저항은 투자율과 함께 변압기의 코아를 선정하는 중요한 매개변수가 된다.

코아재료의 단위 체적당의 와전류에 의한 전력손실은 다음과 같다.

$$P_e = \eta \frac{2\pi^2 f^2 B_m^2 a^2}{3\rho} \quad [J/s \cdot m^3] \quad (5)$$

여기서,

a : 재료의 두께

B_m : 자성재료의 표면 근처에서의 자화밀도

f : 재료에 인가되는 주파수

ρ : 전기 비저항

η : 손실이상 인자

식 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 와전류 손실은 사용 주파수의 제곱에 비례하기 때문에 사용 주파수가 증가하면 급격히 증가하므로 와전류 손실을 줄이기 위해서는 재료의 두께를 작게 하거나 재료의 전기 비저항이 큰 자성 재료를 선택하는 것이 바람직하다.

비정질 합금의 경우는 재료의 두께가 수십 μm 이하 정도로 매우 얇기 때문에 와전류 손실을 크게 줄일 수 있으며, 이 경우 식 (5)는 다음과 같이 기술된다.

$$P_e = \eta \frac{2\pi^2 f^2 B_m^2 a^2}{3N^2 \rho} \quad [J/s \cdot m^3] \quad (6)$$

여기서, N : 적층 횟수

고주파 변압기에 사용하는 자성재료는 규소강, 망간-아연 페라이트 및 비정질을 사용할 수 있다^{14),16)}.

위의 수식에서 알 수 있듯이 HFG의 가장 핵심 부분으로서 최적의 HFG 동작 주파수와 전력변환 효율을 위해 변압기 설계시에 등가회로에 따른 기생성분인 누설 인덕턴스와 표유 정전용량성분 예측이 필수적이며 이를 통하여 장치의 동작 주파수가 선정되고, 원하는 고전압 파형을 얻는 것이 가능해진다. 또한, 최대 전압 정격에서의 고전압 절연 거리 확보와 이의 최적화 설계에 따른 고압 탱크의 크기나 무게의 저감이 가능해 진다^{13),14)}.

본 장치에서 사용된 고주파 고압 변압기는 철심(0.05T)을 사용하였고, 고주파 고전압 변압기의 1차측 권선수를 12턴, 2차측 권선수를 870턴으로 하는 다중분할 권선(8단) 방식에 의한 배전압 회로를 채택하여 고압 절연의 편이성과 향후 용량 증가시의 유연한 대응이 가능하도록 설계, 제작함으로써 동급 대비 고압 변압기를 포함한 고압 탱크의 크기를 최소화 하였다. 또한, 대기간 정전용량 보상용 CR 분압 저항회로를 통한 고전압 X-선 관전압의 실제값을 고전압 발생용 제어회로에 피드백 함으로서, X-선 관전압의 모니터링과 고정밀도의 X-선 관전압 발생이 가능하도록 하였다.

2.2 X-선 관전압, 관전류, X-선량의 제어

그림 3에서는 진단 X-선용 HFG 시스템의 제어 블록도를 나타내었다. 관전압, 관전류 그리고 X-선량은 모두 구동 패널의 CPU를 통해 지령치가 설정되고, 이 지령치에 대한 모든 제어는 고전압-제어기에서 실제값이 피드백 되어 설정치를 추종하도록 구성하였다. X-선 조사중 관전압은 고압 발생회로부에 내장되어 있는 CR 분압저항 회로를 통해 관전압 PI제어기에 피드백 되어지고, 관전압 제어기의 출력 관전압 제어량에 따라 설정 관전압을 추종할 수 있도록 구성하였다. 또한 관전류인 mA제어는 기존의 제어기가 X-선 촬영시, 환자가 가장 영향을 받는 X-선 피폭량인 mAs량을 피드백하지 않고, 단지 mA값만을 검출하여 X-선 발사 시간만으로, 필라멘트 가열량에 따른 관전류를 제어함으로서 정밀한 피폭량 제어를 수행하지 못하였다.

이에 본 장치에서는 X-선 피폭량인 mAs량을 별도의 X-선량 측정용 센서를 사용하지 않고도 X-선량에 해당하는 mAs값을 V/F 컨버터회로를 사용 검출할 수 있도록 함으로서 X-선관에 흐르는 전류인 mA값뿐만 아니라, 인체에 직접 영향이 있는 mAs값을 1 Pulse당 0.02mAs로 카운트하고 제어함으로서, 실제 X-선량에 해당하는 mAs량을 정밀하게 검출할 수 있도록 하여 최소 피폭량 제어를 실현하였다.

따라서 X-선 피폭에 따른 환자의 안정성을 높일 수 있도록 하였고 실제 제작된 시스템에서는 X-선 발사 모드가 시간을 기준으로 구동할 수 있는 타임 모드와 X-선량을 기준으로 운전할 수 있는 mAs 모드를 모두 사용할 수 있도록 구성하였다. 또한, 정밀하고 응답특성이 빠른 관전류제어를 위하여 관전류와 직접 관계가 있는 필라멘트 가열에 있어 기존의 예열 다음에 mA 지령치 가열을 하는 2단계 방식을 개선, 3단계 방식인

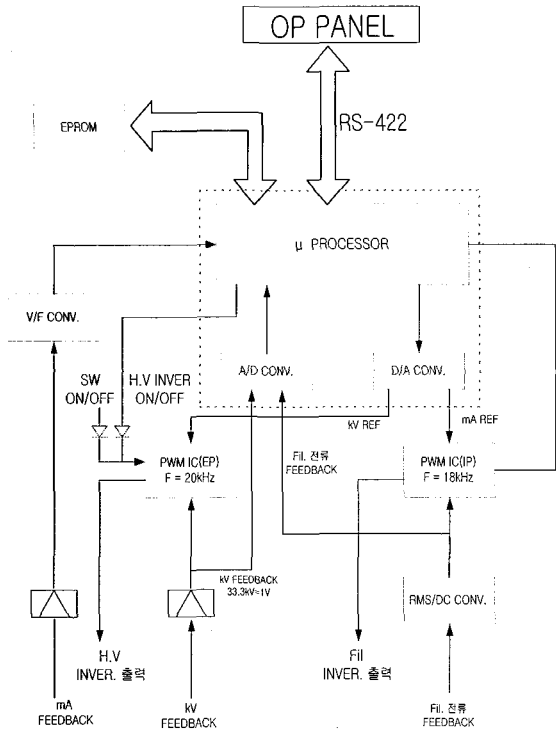


그림 3 진단 X-선용 HFG 제어회로 블록도
Fig. 3 Block Diagram of HFG Control Circuit for Diagnosis X-ray

예열 다음에 오버-슛 시간을 추가하고 mA 지령치 가열을 행함으로서 관전류의 빠른 응답 특성을 구현하였다. 또한, 필라멘트 가열 전류를 RMS-DC 컨버터회로를 사용하여 측정하고 제어함으로서 실제에 가까운 필라멘트 가열 전류가 제어되고 이에 따른 보다 정밀한 X-선 관전류(mA)를 얻을 수 있었다.

3. 실험 결과

그림 4는 본 장치에서 제작한 최대 125kV, 800mA 급 X-선용 고압 변압기와 필라멘트 가열용 변압기 등을 포함하는 고주파 고전압 발생회로부이고, 그림 5는 본 실험에 사용되어진 시제품 사진을 나타내었다.

그림 6에서 그림 10까지는 X-선관의 부하 변동 즉, X-선 발생에 필요한 관전압 관전류의 설정치를 달리 하였을 때의 X-선관 양단에 걸리는 관전압(위)과 X-선관에 흐르는 관전류의 파형(아래)을 나타내고 있는데 일반적으로 진단용 X-선 시스템에서 허용하는 ±10%의 직류 관전압 리플 함유량보다 상당히 적은 관전압 리플을 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한, X-선

량에 영향을 주는 관전류인 mA파형이 상승 시간과 하강 시간 모두 매우 양호함을 보여 주고 있다.

위의 파형으로 알 수 있듯이 본 연구에서 개발된 최대전압 125kV, 40kW용량의 X-선 발생 장치는 촬영인체 부위에 따른 X-선 관전압, 관전류 그리고 X-선 발사 시간의 제어 동작이 매우 안정된 상태임을 알 수 있다.

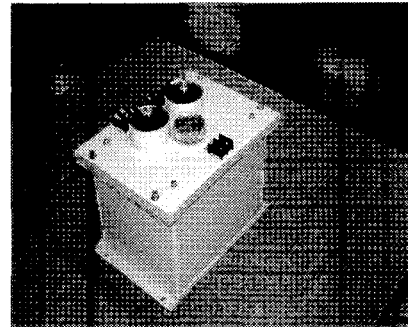


그림 4 고주파 고전압 발생 회로부
Fig. 4 High frequency high voltage generating circuit

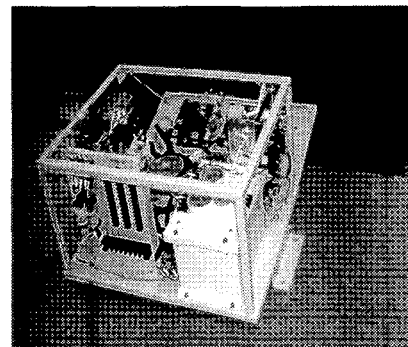


그림 5 40kW HFG 시스템
Fig. 5 40kW HFG system

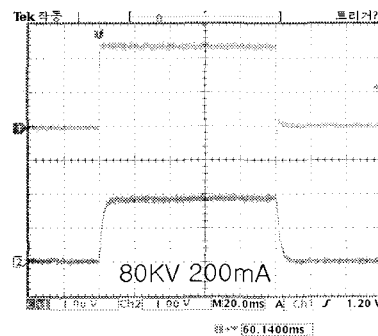


그림 6 X-선관전압(33.3kV/div), 관전류(100mA/div)
Fig. 6 X-ray tube voltage, tube current(20ms/div)

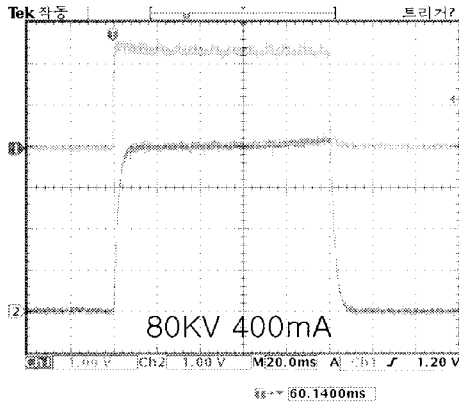


그림 7 X-선관전압(33.3kV/div), 관전류(100mA/div)
Fig. 7 X-ray tube voltage, tube current(20ms/div)

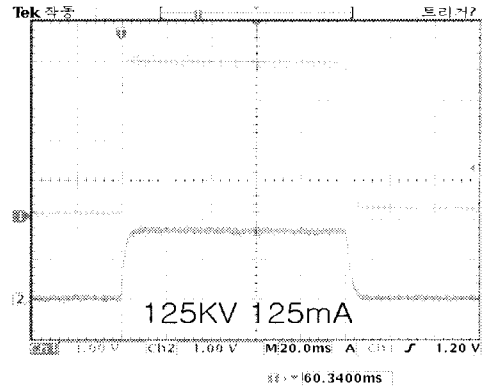


그림 10 X-선관전압(33.3kV/div), 관전류(100mA/div)
Fig. 10 X-ray tube voltage, tube current(20ms/div)

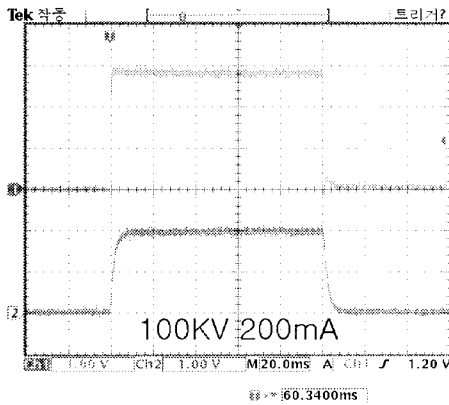


그림 8 X-선관전압(33.3kV/div), 관전류(100mA/div)
Fig. 8 X-ray tube voltage, tube current(20ms/div)

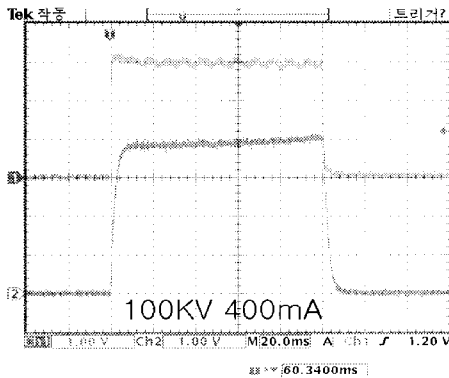


그림 9 X-선관전압(33.3kV/div), 관전류(100mA/div)
Fig. 9 X-ray tube voltage, tube current(20ms/div)

4. 결 론

의료 진단용 40kW급 X-선 전원 장치에 대하여 고압 발생 장치의 구성과 X-선 관전압, 관전류, 피폭량 제어에 대하여 기존 제어 방식과 비교 설명하였고 특히, 본 시스템의 핵심이라 할 수 있는 고주파 고전압 변압기의 등가회로를 통한 기생 성분에 대하여 기술하였다.

또한, 제작된 HFG 시스템의 출력 특성으로서 부하 변동에 따른 X-선 관전류와 관전압 파형을 실험을 통하여 나타내었다.

향후 과제로는 X-선 관전압 관전류 용량의 증대에 따른 새로운 고전압 회로 방식의 개발과 그리고 시스템 구동 판넬부의 PC 기반 제어와 또한 투시와 촬영이 모두 가능한 2-Tube HFG 시스템의 개발이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 安部,小倉,青柳,他, "インバータ式 X線装置の特性(共振形, 最高出力:50kW)", 日放技學, Vol. 48(2), pp. 221~225, 1992.
- [2] Izumi Ogura, and T. Aoyagi, "Analysis of the Basic Motion of the Resonance Type Inverter X-ray Generator by the Model Circuit", 東京都立醫,療技術短期大學紀要, 第 6号, pp. 193~207, 1993.
- [3] 유동욱 외 6인, "이온주입형 정밀고압 발생장치 연구", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 158~161, 1998. 7.
- [4] 백주원 외 5인, "고압 대전류 펄스 자계를 이용한 저온 살균장치 시스템 연구", 전력전자학회 전력전자 학술대회 논문집, pp. 162~165, 1998. 7.

- [5] Kelly J.P and Trout E.D, "Physical Characteristics of the Radiation from 2-Pulse, 12-Pulse, and 1,000-Pulse X-Ray Equipment", Radiology100, pp. 653~661, 1971.
- [6] K.T. Compton et al: *Magnetic Circuit and Transformers*, John-Wiley and Sons, New-York, Chap. 18, 1943.
- [7] Rs. A. McCurrie : *Ferromagnetic Materials*, Academic, London, Chap. 2, 1994.
- [8] Hino, H., Hatakeyama, T. and Nakaoka, M., "Resonant PWM Inverter Linked DC-DC Converter using parasitic Impedances of High Voltage Transformer and Its Applications to X-Ray Generator", PESC Record, pp. 1212~1219, 1988.

저 자 소 개



김학성(金學成)

1964년 11월 8일생. 1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 한국전기연구원(Post Doc.). 1997년~현재 동양공업전문대학 자동화시스템과 부교수.



박영국(朴榮國)

1969년 11월 15일생. 1991년 수원대 전자재료과 졸업. 1995년 국민대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년~현재 (주)포스콤 연구소 선임연구원.



오준용(吳俊龍)

1975년 11월 17일생. 1998년 서울산업대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2001년~현재 (주)포스콤 연구소 전임연구원.



성기봉(成基峯)

1955년 9월 4일생. 1994년~현재 (주)포스콤 연구소 연구소장.