

# X-Ray 진찰용 고전압 공진형 DC-DC 컨버터 설계

백종무, 주해중\*, 조문택, 이충식

대원대학, 동국대학교\*

## High Voltage Resonant DC-DC Converter Design for X-Ray Imaging

Moontaek Cho, Jongmu Baek, Haejong Joo\*, Chungsik Lee

Daewon University College, Dongkuk Univ.\*

### 요약

본 논문은 공진형 인버터로 구성된 X-ray 고전압 발생기와 고주파 고전압 변압기의 운영 시스템을 제안하였다. X선 발생장치는 무소음화와 소형화하였으며, 50[kHz]이상의 구동 주파수로 동작하게 하였고, 일반전원을 사용할 때 발생한 전력으로 인한 노이즈, 조사조건의 저하문제 등의 문제점을 해소하였다.

또한, X선관 전압 제어기와 관전류 제어기 및 고주파 고전압 변압기의 필라멘트 가열용 변압기를 고주파용으로 설계, 제작함으로써 X선 장치의 효율적 운영이 되도록 하였다.

### Abstract

In this paper, including the X-ray high voltage resonant inverter generators and high frequency high voltage transformer operating systems is proposed. X-ray generator removes the noise and was smaller, 50[kHz] to work more with the driving frequencies, and that occurred when the normal power supply available due to noise, survey the conditions and solve the problems of the poor was a problem.

In addition, X-ray tube voltage, frequency controllers and tube current controller filament heating voltage transformer for high frequency transformer design and manufacture of doing X-ray devices were to become more efficient operation.

중심단어 : X-ray, generator, transformer

### I. 서론

독일 뢰트겐에 의해 발견된 지 100여년이 조금 넘는 X선은 의료 및 산업 분야에서 필수적인 진단과정으로 확고한 자리를 잡았으며, X선 발생장치는 상용교

류 전원을 이용해 교류 전압을 발생시키고 정류된 직류 고전압을 X선관에 인가하여 X선을 발생시키는 정류형 변압기식 고압발생장치가 사용되어왔다<sup>[1],[4]</sup>.

또한 전력변환 및 제어장치 부분에 있어서 인버터와 컨버터 기술은 고속 스위칭이 가능한 전력용 반도체 소자들을 진단용 X선 장치에 적용함으로써 고전압

Corresponding Author: 이충식

주소 : 충북 제천시 신월동 대학로 274, E-mail: cslee@mail.daewon.ac.kr, Tel: +82-10-5316-0849

투고 일자: 2010년 09월 08일, 심사일자: 2010년 09월 30일, 수정 일자: 2010년 11월 8일, 게재 확정일자: 2010년 12월 13일

고주파수용 변압기의 중량과 부피를 축소시켰고, X선관에 안정된 직류 고전압을 인가하여 출력을 보다 정밀하게 제어하기 위한 DC-DC 컨버터가 결합된 인버터식 X선 장치가 개발되어 보급되어가고 있다.

따라서 본 논문에서는 동작주파수를 높게 한 공진형 고주파 인버터를 X선 장치에 응용함으로써 고전압 발생 변압기를 소형화시켜 정밀제어가 가능하고, 정밀한 출력전압과 부하범위를 갖는 X선 고전압 발생장치와 고압 고주파수용 변압기를 설계, 제작하여 출력전압, 전류 파형 출력특성을 실험하여 X선관의 안정성을 입증하였다.

## II. 본 론

### 1. X선 고전압 발생장치

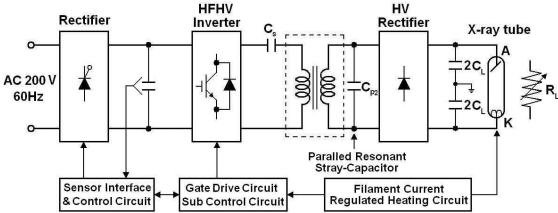


그림 1. 공진형 인버터로 구성된 X-ray 고전압 발생기

그림 1은 공진형 인버터로 구성된 X-ray 고전압 발생 장치를 나타냈다. 인버터에 공급되는 직류공급전원은 저전압 정류장치인 다이오드 브릿지 정류기와 직류입력전압을 고주파수의 교류출력 전압으로 만들기 위해 고속 스위칭 소자인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)와 공진 회로로 고주파 고압 변압기 내의 누설인덕턴스 성분과 표유 용량 성분에 추가로 외부 캐패시터를 직렬로 연결하여 직렬 공진형 인버터로 동작시키고, 마그네틱 코어의 손실과 노이즈 저감과 자계요소의 활용도를 위해 Phase-Shift PWM 방식으로 스위칭 제어되는 Phase-Shift PWM 공진형 인버터를 구성하였다.

### 2. 고주파 고전압 변압기

고주파 고압용 변압기는 페라이트를 사용하여 와전류를 줄임으로써 저항 손실을 줄일 수 있었다. 이것은,

1차권선과 2차권선 철심에 2각으로 나누어 감겨져 있고, 한 쪽은 애노드측, 다른 한쪽은 캐소드측에 접속되어 있다<sup>[2]</sup>.

고전압 변압기는 입력측에 직렬로 캐패시터를 삽입하여 직렬공진회로를 구성하고 이 누설인덕턴스에서 전류공진을 일으켜서 고전압 변압기로부터 부하에 충분한 전류를 공급한다.

또한, 권선의 저항 손실이 문제가 되는데 이것은 권선의 단면적을 크게 하므로써 줄일 수 있으나 누설리액턴스를 고려하지 않고 저항분을 줄이게 되면 고압 케이블의 정전용량과 누설 리액턴스 성분이 공진을 일으키기 때문에 경부하에서 관전압 파형이 진동을 일으키는 원인이 될 수 있다. 따라서 누설 리액턴스는 가능하다면 적게 하여야 한다<sup>[3],[5]</sup>.

그림 2는 고주파 고전압 변압기의 구조를 나타낸다. 고주파 고전압 변압기의 누설 인덕턴스는 이론적으로 다음과 같이 계산된다.

$$X_{L2} = 4\pi^2 f_{inv} N_2^2 \frac{u_1 + u_2}{2h} \left( \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} + \delta_0 \right) \times 10^{-7} \quad (1)$$

$$L_{r2} = \frac{X_{L2}}{2\pi f_{inv}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$L_r = \frac{L_{r2}}{n^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $X_{L2}$  : 누설인덕턴스 [H]

$L_{r2}$  : 2차측 누설인덕턴스 [H]

$L_r$  : 1차측으로 환산한 누설인덕턴스 [H]

$N_2$  : 2차측 권수

$n$  : 변압기의 권선비

$u_1, u_2$  : 1차, 2차측 권선의 1턴에 해당하는 길이의 평균값 [m]

$h, \delta_0, \delta_1, \delta_2$  : 그림 2에 도시된 각 치수

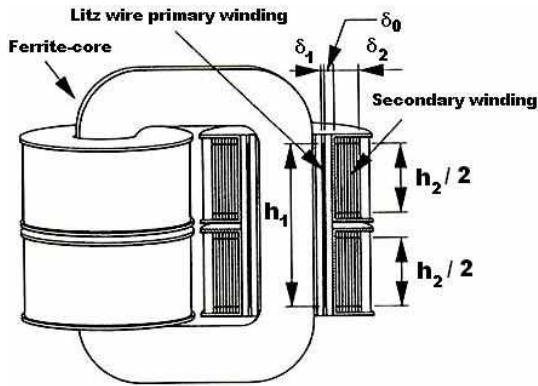


그림 2. 고주파 고전압 변압기

고주파 고전압 변압기의 표류 용량은 식 (4)와 같이 계산된다.

$$C_p = n^2 C_{p2} = \frac{8\pi \epsilon_e \epsilon_0 r h_2 n^2}{3d(m-1)j^2 b} \dots\dots\dots (4)$$

- $C_{p2}$  : 2차권선의 표류용량 [F]
- $C_p$  :  $C_{p2}$  의 1차측 환산 값[F]
- $\epsilon_0$  : 진공의 유전률 [F/m]
- $\epsilon_e$  : 유침절연지의 등가 비유전상수
- $r$  : 2차측 권선의 반지름의 평균값[m]
- $h_2$  : 1차, 2차측 권선의 높이[m]
- $d$  : 2차측 권선의 층간 거리[m]
- $m$  : 2차측 권선의 층수
- $j$  : 각 leg당 2차 권선의 분할 수
- $b$  : leg의 수

### 3. 공진형 DC-DC 컨버터

그림 3은 직·병렬공진형 DC-DC 컨버터를 나타낸다. 이것은  $S_{w1} \sim S_{w4}$ 의 위상차를 제어하는 기술을 채용하고 있다.

$S_{w1}$ 에 대해  $S_{w4}$ 를  $S_{w3}$ 의 위상을 제어하여 출력을 0에서 최대까지 제어할 수 있다.

저항  $R_L$ 은 관전압과 관전류의 비율에 따라 결정되

고, 고전압 케이블의 정전용량은 평활용 캐패시터  $C_L$ 로 이용된다.

2차 권선의  $R_L$ 과  $C_L$ 은 1차 권선에 의해 감소되고, 고전압 발생장치는 누설 인덕턴스( $L_r$ ), 표류용량( $C_p$ ), 동손( $R_r$ )과 철손( $R_i$ )을 포함한다.  $R_1$ 은 회로의 임피던스를 나타낸다.

이 장치에서는 인버터 회로의 전류파형이 정현파형이 되고 소자의 차단전류를 작게할 수 있는 공진형을 채용하고 있다.

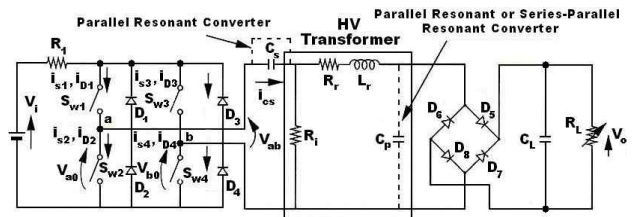


그림 3. 공진형 DC-DC 컨버터

그림 4 Phase-shift PWM 공진형 DC-DC 컨버터의 스위칭 시퀀스의 동작 파형을 표시한 것이다.

비례, 적분, 미분제어계의 제어방식으로 제어대상인 비선형보정과 입력전압 조정을 더한 구성으로 실제 관전압을 목표 관전압에 일치하도록 제어한다. 또한 동일한 출력을 얻기 위해 인버터식 고전압장치는 입력 전원전압을 보다 높게 하고 인버터 회로에 흐르는 전류를 억제할 수 있도록 설계하였다<sup>[6],[7]</sup>.

정류기를 거쳐 맥동한 직류전압을 DC-DC 컨버터를 사용하여 DSP를 통해 디지털 제어를 하면 고조파를 제거하여 역률이 개선되므로 안정된 직류전압을 공급할 수 있다.

인버터 회로에는 50kHz이상의 고주파 스위칭으로 구동되는 PWM 인버터를 사용하였다.

X선관의 필라멘트 전압 및 전류를 제어하기 위하여 DC-DC 컨버터로써 직류출력전압을 가변하였고 필라멘트의 전압은 이 직류전압을 IGBT로 구성된 인버터로 필라멘트 가열용 변압기 1차측에 교류전압을 인가하여 필라멘트 2차측과 연결된 X선관 캐소드측의 필라멘트를 가열시켰다. 그리고 가열된 필라멘트로부터

피드백 저항으로부터 전류를 피드백 받아 필라멘트를 전류를 제어하였다.

그림 5는 고전압 발생기의 전체 시스템의 블록도이며, 그림 6은 X-ray 신호의 플로우 차트이다.

#### 4. 소프트웨어 구성

발생기와 PC의 인터페이스는 직렬 통신을 기반으로 하며 제공된 ActiveX인 Poskom.ocx를 사용하였고, Hand Switch, Power On/Off는 Parallel 통신을 기반으로 하며 Inpout32.dll Library를 사용하여 처리했다.

그림 6는 하드웨어 및 소프트웨어 블록도이다.

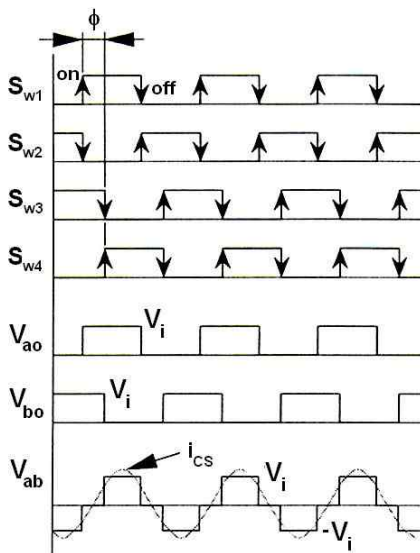


그림 4. IGBT에 공급되는 PWM 게이트 신호와 공진형 DC-DC 컨버터의 상전압 및 선간전압

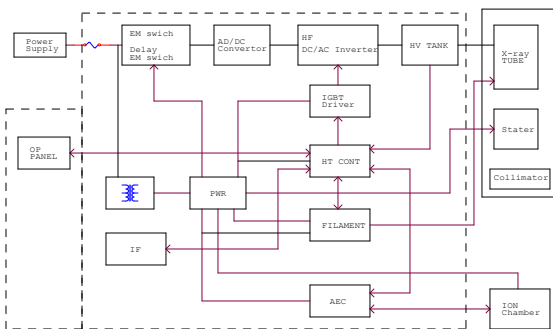


그림 5. 고전압 발생기의 전체 시스템 블록도

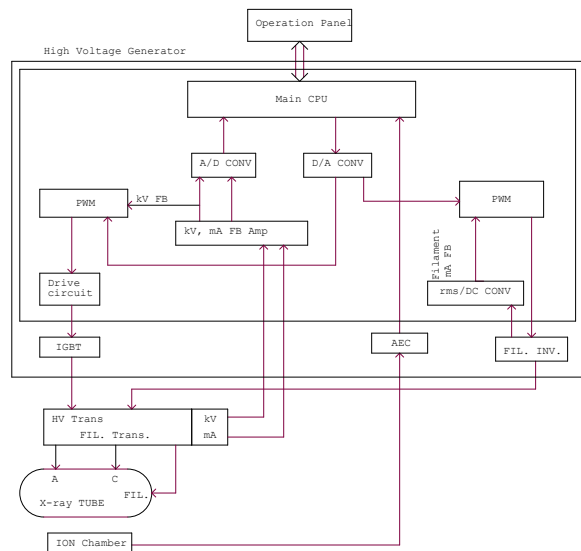


그림 6. X-ray 신호의 플로우차트

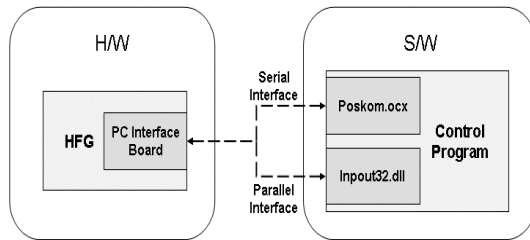


그림 7. H/W, S/W BLOCK DIAGRAM

### III. 실험파형 및 결과

X선관에서 출력측의 평활필터로 사용되는 고압 캐이플은 음극의 필라멘트를 가열하기 위한 필라멘트 가열회로로 인버터와 필라멘트 가열용 변압기로 이루어지는데, 이 때 필라멘트의 예열전압 파형을 그림 8과 그림 9에 나타냈다.

그림 10은 관전압 40[kV], 관전류 50[mA]일 때의 파형이고, 그림 11은 관전압 40[kV], 관전류 100[mA]의 파형이다.

그림 12~그림 15는 관전압을 각각 20[kV], 25[kV], 35[kV], 40[kV]로 변화할 때 애노드와 캐소드의 파형으로 관전압의 맥동율은 변화폭이 매우 작고 안정하게 나타났으며, X선 발생장치를 구현하여 조사한 결과 관

전압(오차 3%이내)과 관전류(오차 5%이내)의 재현성을 확인할 수 있었다.

비교적 낮은 관전압일 때는 관전류의 대소에 관계 없이 일정한 선량분포를 보이고 있으나 높은 관전압 높은 관전류로 갈수록 출력이 불안정하게 나타났다.

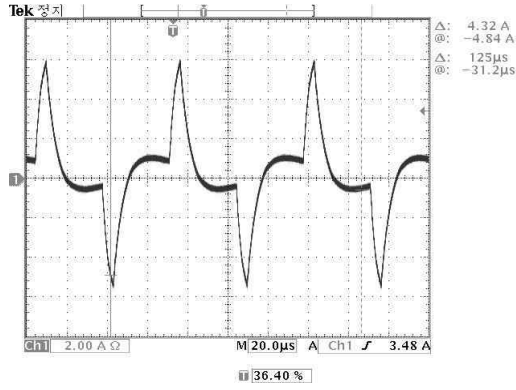


그림 8. 필라멘트(S) 예열전압 파형

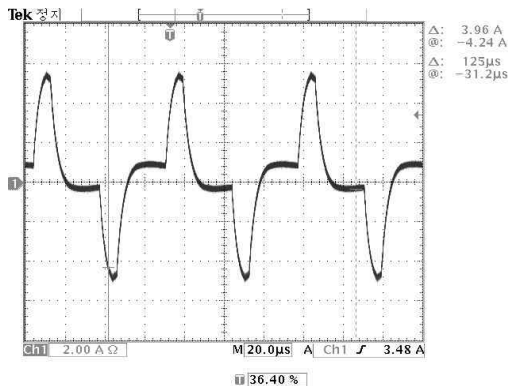


그림 9. 필라멘트(L) 예열전압 파형

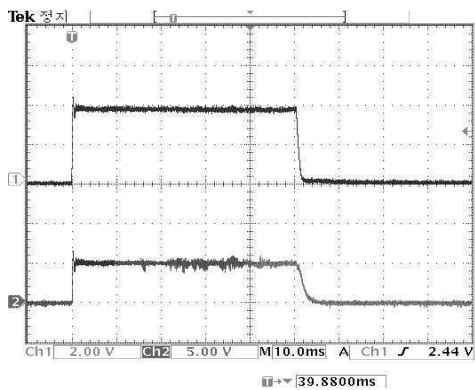


그림 10. 관전압, 관전류 파형 (40[kV], 50[mA])

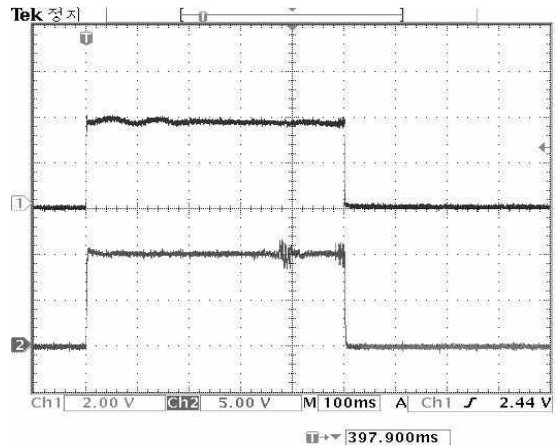


그림 11. 관전압, 관전류 파형 (40[kV], 100[mA])

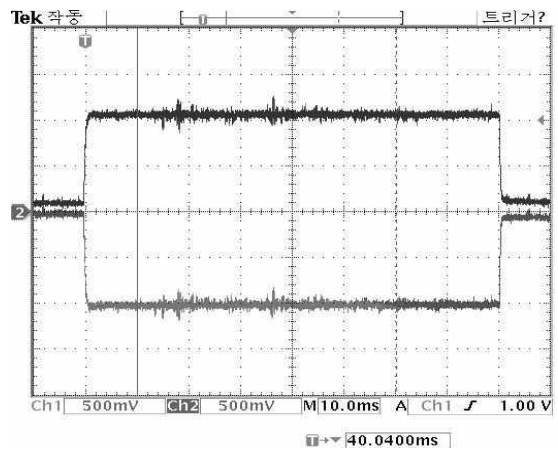


그림 12. 관전압의 애노드와 캐소드 파형 (20[kV])

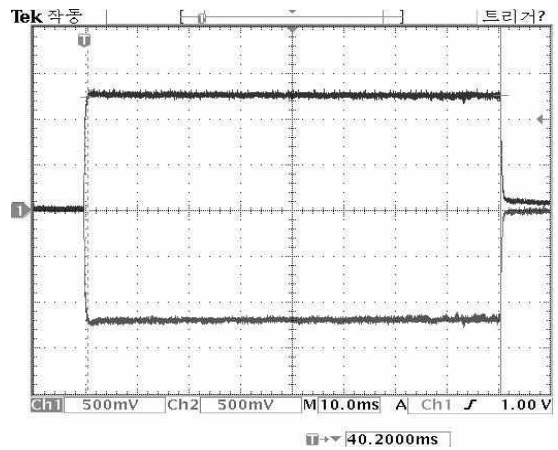


그림 13. 관전압의 애노드와 캐소드 파형 (25[kV])

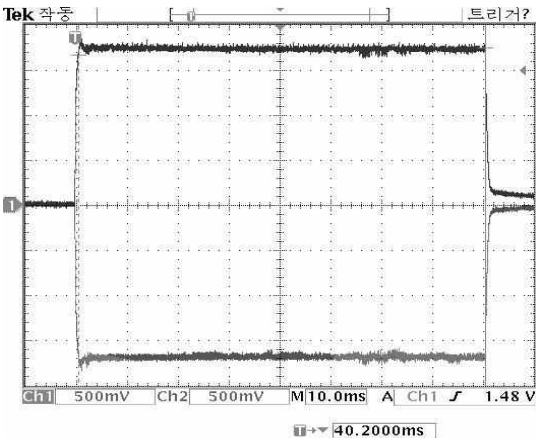


그림 14. 관전압의 애노드와 캐소드 파형 (35[kV])

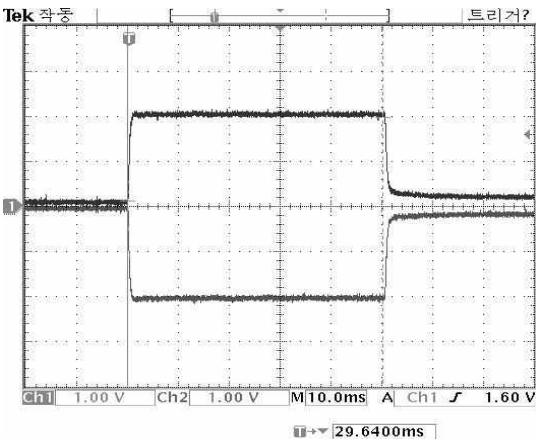


그림 15. 관전압의 애노드와 캐소드 파형 (40[kV])

#### IV. 결 론

본 논문은 X선 발생장치의 무소음화와 소형화를 위하여 구동 주파수를 50[kHz] 이상으로 동작하게 하였고, 일반전원을 사용할 때 발생한 전력으로 인한 노이즈, 조사조건의 저하문제 등의 문제점을 해소하였다.

또한, X선관 전압 제어기와 관전류 제어기를 구성하였고, 고주파 고전압 변압기의 필라멘트 가열용 변압기를 고주파용으로 설계, 제작하여 장치의 소형 경량화를 하였으며, 고밀도전력, 저노이즈와 빠른 과도 응답특성을 갖도록 하여 X선 장치의 효율적 운전이 되도록 안정성을 입증하였다.

#### 참고문헌

- [1] 김정민, "진단용X선 장치와 계측기술의 발전과정", 화상연구, Vol.5, No.2, 1997..
- [2] T.F.Wu, J.C.Hung, "A PDM Controlled Series Resonant Multi-level Converter Applied X-ray Generators", IEEE Transactions on Industry Application, Vol.34, pp.1177~1182, 1999.
- [3] 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, pp.288~294, 1995.
- [4] 이성길, 최성관, "인버터식 X선 발생장치용 고주파 공진형 고압변압기 등의 설계", 한방기학회지, Vol.24, No.22, pp.5~11, 2001.
- [5] 김학성, 김현준 외, "X-ray용 고주파 공진형 고전압발생장치에 관한 연구", 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, Vol.18, pp.400~404, 1995.
- [6] M.Nakaoka, S.Nagai, Y.J.Kim, Y.Ogino, Y.Murakami, "The State of the art Phase-shifted ZVS-PWM Series & Parallel Resonant DC-DC Power Converter Using Internal Parasitic Circuit"
- [7] 김학성 외 3인, "진단 X-선용 40kW 고주파 고압 전원 시스템", 전력전자 학술대회 논문집, pp.192~198, 2003.