

## 고주파 공진형 인버터 X선 장치의 단시간 출력특성에 관한 연구

이성길\*, 임홍우°, 이상일, 조금배, 백형래\*\*

\* 광주보건전문대학 \*\* 조선대학교

### A Study on the Output Characteristics of High-Frequency Resonant Inverter Type for X-ray Generators in Short Exposure Time.

S. K. Lee\*, H. W. Lim°, S. I. Lee, G. B. Cho, H. L. Baek\*\*

\* Kawng-ju Health college \*\* Chosun University

#### Abstract

This paper deals with a characteristic of output for high frequency resonant inverter type x-ray generator in short exposure time. In the same tube-voltage, the waveform is stable in long exposure time (200msec) but more decreasing exposure time (50msec), the waveform is distorted. The ripple factor of tube-voltage waveform distorted more and more increase tube-voltage and in this case output is also unstable. High-frequency resonant inverter type X-ray generator using PSU source which introduced in resent is stable tube-voltage waveform and low ripple factor.

#### 1. 서론

최근들어 고주파 인버터를 이용한 다양한 PWM 공진모드 DC-AC 전력컨버터가 연구되어 왔으며 다양한 응용이 소개가 되어왔다. 이러한 고주파 인버터를 이용한 의료용 고압 변압기에 있어서의 관전압은 실제 20kV에서 150kV 사이로 광범위하게 변하고 관전류는 1mA에서 1000mA의 넓은 범위에

서 동작한다. 이때 방출되는 X선의 에너지특성은 X선관에 가해지는 직류 고전압의 파형에 의존하게 되므로 관전압 안정특성이 매우 중요시 여겨진다. X선을 이용한 진단에 있어서 피사체 움직임에 의한 동적인 Artifact를 없애기 위해서는 X선 노출이 짧아야 하고 그렇기 위해서 X선관에서 방출되는 X선의 단위시간당 선량률이 높아야 한다. 이를 위해 가해지는 직류 고전압은 상승시간이 짧고 맥동률이 작은 파형의 전압이 필요하고, 이는 넓은 부하 범위에서도 신속하고 정확한 제어를 필요로 한다.<sup>1)</sup> 따라서 모든 부하 조건에 적합하도록 적절한 제어시스템이 요구되며 적절한 파라미터값의 설정은 숙련된 조작자의 경험을 중요하게 여겨왔다. 기기의 소형화를 위해서는 일반적으로 시스템이 높은 주파수에서 동작하는 것이 유리하지만 높은 스위칭 손실과 스위칭 서지를 발생시켜 문제가 된다. 공진형 인버터는 시스템에서 발생하는 손실과 스위칭 서지 문제를 효과적으로 해결 할 수 있다.<sup>2,3)</sup>

본 논문에서는 X-ray 발생기의 공진형 변압기를 이용한 PWM 인버터의 실제 관전압 관전류의 단시간 특성과 이 시스템을 토대로 모델링한 시뮬레이션 파형을 비교하였고 최근 소개된 PSU 전원을 이용한 인버터식 X선 장치의 출력특성을 분석하였다.

## II. 공진형인버터식 X선 장치

그림1은 고주파 공진형 PWM 인버터를 도입한 X선 발생장치의 전력변환처리 시스템을 도식화한 것이다. 인버터에 공급되는 직류전원은 저전압 정류장치를 이용하였고 직류 입력전압을 높은 주파수의 교류 출력전압으로 만들기 위해 스위칭 소자로 IGBT를 사용한 공진형 PWM 인버터, 인버터 출력을 고전압으로 승압시키기 위한 고전압 변압기, 고압케이블로 연결되어 부하로 작용하는 X선관에 직류 고전압을 인가하기 위한 다이오드 정류기 회로, 그리고 X선관에 필라멘트 전류를 가하는 또다른 고주파 인버터로 구성되어 있다. 고속 스위칭 소자로 IGBT를 사용해 full bridge 인버터를 구성하였다.<sup>4)</sup>

직류고전압을 공급하는 고압케이블의 분포용량은 인버터의 주파수가 증가하게 되면 직류 고전압의 평활 필터로써 훌륭한 역할을 한다. 변압기의 등가 회로는 일반적으로 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스를 사용하여 설명되지만, X선 장치에서 사용되는 고전압 변압기에서는 고전압 변압기의 각 권선층에 존재하는 분포용량이 반드시 고려되어야 한다. 그 이유는 X선 장치에 사용되는 고전압 변압기는 권선비가 매우 크기 때문에 2차측의 권선은 1차측의 권선에 포개져서 여러개의 코일층으로 감겨지게 되며 각각의 권선층은 절연체로 격리되기 때문에 2차측의 각 권선층 사이에는 고전압변압기 고유의 큰 분포용량이 존재한다. 고압변압기는 이러한 고유 임피

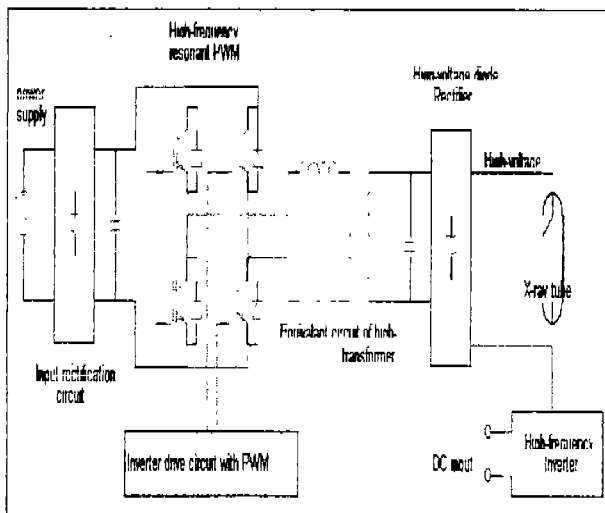


Fig.1 Schematics diagram of transformer resonant inverter type X-ray power generator

던스가 별도의 공진소자를 부가하지 않고도 효율적인 공진용 LC소자로써 작용한다. 일반적으로 고전압 변압기는 X선 장치인 경우 전압을 최대 150kV 정도까지 승압하기 위해서 100~1000정도의 권선비를 갖기 때문에 2차측 권선은 여러개 층으로 구성되고 그 누설 인덕턴스는 10~100 $\mu$ H정도이다. 이 인덕턴스는 인버터의 스위칭 소자가 스위칭 동작을 완전히 수행하는데 소요되는 시간을 어느 한계 이하로 하는것을 제한하여 실제 사용에 있어서 인버터의 동작 주파수를 제한하는 요인이 된다. 따라서 이러한 스위칭 손실의 증가와 동작주파수의 제한등과 같은 단점을 보완하기 위하여 고전압 변압기의 고유임피던스를 공진소자로 이용하게되는 것이다. 실제적인 인버터식 X선 장치 제어회로는 그림2와 같다.

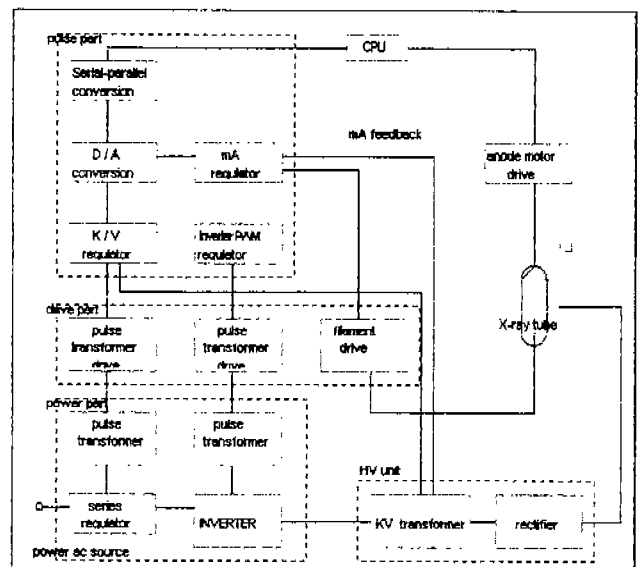


Fig.2 Control block diagram of high frequency inverter type X-ray generator

## III. 실험결과

### A. 고전압 변압기의 모델링

그림3(a)에서와 같이 고전압 변압기 인덕턴스의 등가회로는 자화 인덕턴스  $L_{ex}$ , 1차측과 2차측 누설 인덕턴스  $L_{11}$ 과  $L_{12}$ , 그리고 권선비가 N 인 이상 변압기 I.T로서 구성된다.  $L_{ex}$ 는 다른 인덕턴스들에 비해 매우 크나 1차 권선과 병렬로 연결되어 있어 무시될 수 있다.  $L_{11}$ 과  $L_{12}$ 는 서로 직렬이고 2차

측 인덕턴스  $L_{12}$ 는 권선비N에 의해 1차측으로 환산되어  $L_{12}'$ 로 된다. 이들은 다시 고전압 변압기의 전체 누설인덕턴스인  $L_1$ 와 같이 등가적으로 해석할 수 있다. 또한 고전압 변압기의 분포용량은 그림 3.(b) 에서와 같이 1차측 권선과 접지된 철심 사이에 존재하는  $C_{1g}$ , 1차 2차 권선 각각에 존재하는  $C_{12}$ , 2차 권선 각 코일층 사이에 존재하는  $C_2$ , 2차 권선과 접지된 철심사이에 존재하는  $C_{2g}$ 로 해석할 수 있고  $C_{2g}$ 는 다른 것에 비해 매우 작기 때문에 무시될 수 있다.  $C_{1g}$ ,  $C_{12}$  그리고  $C_2$ 는 대략 10~100pF 의 값을 갖지만  $C_2$ 가 권선비N에 의해 1차측으로 환산한 값  $C_2'$ 에 비해  $C_{1g}$   $C_{12}$ 는 무시할 만큼 작다. X선관의 전류는 음극 필라멘트의 가열 전류제어에 의해 조절된다. 따라서 X선관 회로는 가열전류에 의존하는 가변저항으로 취급이 가능하다.<sup>5)</sup>

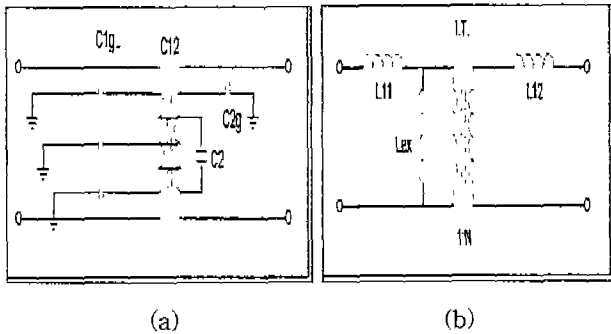


Fig.3 Equivalent circuit of high-voltage transformer

**B. 시뮬레이션 결과 파형**

그림4는 고전압 변압기의 모델링을 토대로 시뮬레이션한 결과 파형이다. 관전압의 상승시간은 약

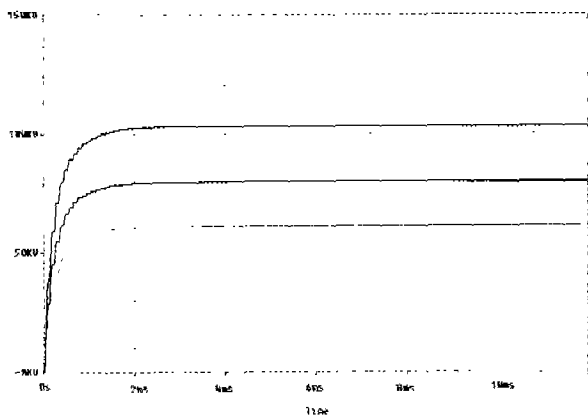


Fig.4 Tube voltage waveforms result in simulating

2msec 정도이고 관전압이 상승할수록 관전압 파형의 리플은 증가함을 볼 수 있다(60kV: 3.92%, 80kV: 4.43%, 100kV: 5.54%, 120kV: 6.20%). 가변 입력주파수와 X선관을 저항성 부하로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였고 인버터 입력전압을 조절하였고 관전류는 부하로 사용된 가변저항을 조절하였다. 또한 인덕턴스와 커패시터에 따라 공진주파수를 설정하였다.

**C. 공진형 인버터식 X선 장치의 실험파형**

그림5는 공진형 인버터식 X선 장치를 이용해서 관전류 100mA, 조사시간 100msec, 관전압을 60, 80,100,120KV로 변화시켰을 때 나타나는 관전압의 파형으로 그림4의 시뮬레이션 파형과 거의 유사하게 나타났다 (60kV: 6.3%, 80kV: 6.64%, 100kV: 7.47%, 120kV: 8.16%). 그러나 실제 임상에서 X선 촬영시 사용되는 관전류범위는 50mA~1000mA 정도로 훨씬 높고 조사시간(exposure time)은 짧게 촬영을 하는 경우가 많아 X선관에 가해지는 부하조건을 변화시켰을 때 관전류가 낮은 조건 (50mA,120KV)에서 그림6과 같이 관전압 파형의 맥동률이 안정적이나 (관전류가 높아지면 (200mA,120KV) 그림7과 같이 관전압 파형의 맥동률이 약 25% 정도로 매우 불안정하게 나타났다. 각 조건 하에서 출력되는 방사선량을 측정된 결과 Table 1과 같다. 비교적 저관전압일때는 관전류의 대소에 관계없이 일정한 선량 분포를 나타냈으나 고관전압 고관전류로 갈수록 출력이 불안정하게 나타났다.<sup>6,7)</sup> 이러한 현상은 인버터에 입력되는 전원이 단상 상용전원을 정류하여 사용하므로 불안정해서 발생하는 것으로 사료된다.

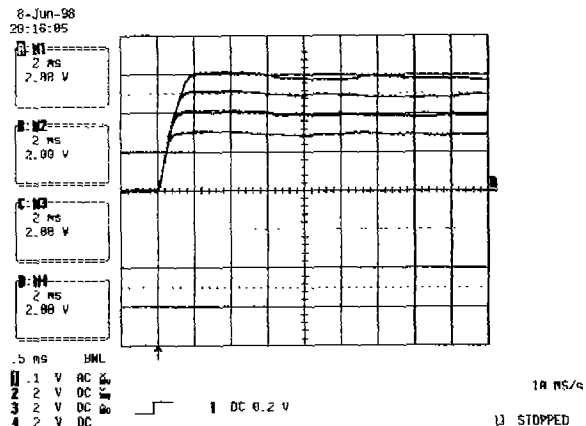


Fig.5 Tube voltage waveform of inverter type X-ray generator(60kV, 80kV, 100kV, 120kV)

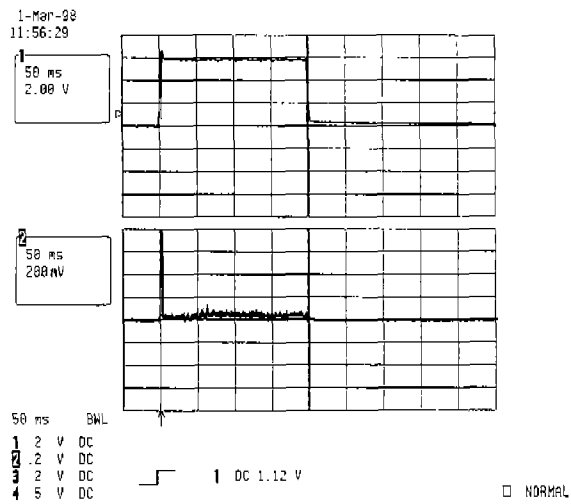


Fig.6 Tube voltage waveform of inverter type X-ray generator(50mA, 120kV, 200ms)

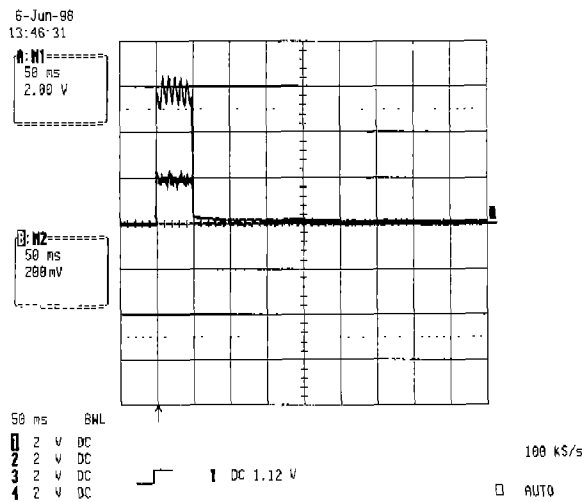


Fig.7 Tube voltage waveform of inverter type X-ray generator(200mA, 120kV, 50ms)

Table 1 Output radiation dose of resonant inverter type X-ray generator (mR)

| KV  | mAs | 10 mAs    |            |             |              |
|-----|-----|-----------|------------|-------------|--------------|
|     |     | 50mA*0.2s | 100mA*0.1s | 200mA*0.05s | 300mA*0.032s |
| 60  |     | 45.68     | 46.53      | 47.53       | 49.13        |
| 80  |     | 77.033    | 80.67      | 80.6        | 83.3         |
| 100 |     | 115.17    | 119.4      | 120.23      | 122.73       |
| 120 |     | 154.3     | 158.17     | 148.8       | 133.2        |

**D. PSU 전원을 이용한 인버터식 X선 장치 출력특성**

단상 입력전원을 사용한 인버터식 X선장치는 고관전압 고관전류 제어 시 관전압 파형의 맥동률이 떨어지고 출력이 불안정해지는 것을 개선하기 위해서 개발된 HF generator에 PSU (power storage unit)<sup>8,9,10)</sup>를 사용해서 관전압 관전류 파형을 측정 한 결과 그림8과 같이 저관전류 (50mA), 고관전압 (120KV) 일 때는 파형이 안정한 분포를 나타냈으나 고관전압(120KV) 고관전류(200mA), 50msec 조건으로 조사했을 때 출력파형은 그림9에서와 같이 조사 시간이 길어짐에 따라 관전압은 점점 감소한 파형이 나타났고 각 조건하에서의 출력선량을 측정 한 결과 Table 2와 같다. 고관전압 고관전류에서도 비교적 선량 분포가 안정하게 나타남을 볼 수 있다.

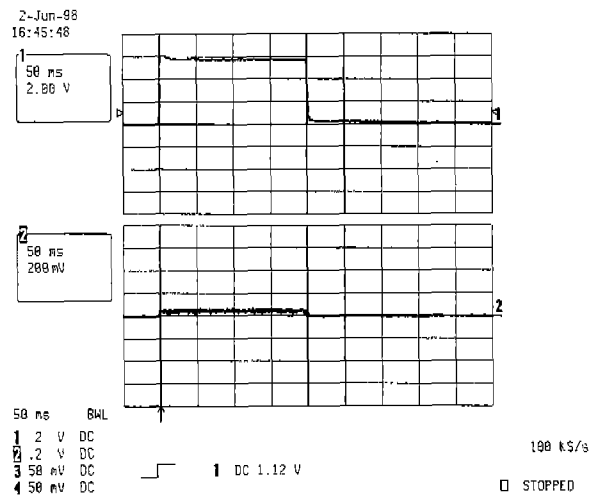


Fig.8 Tube voltage waveform of inverter type X-ray generator using PSU (50mA,120kV, 200ms)

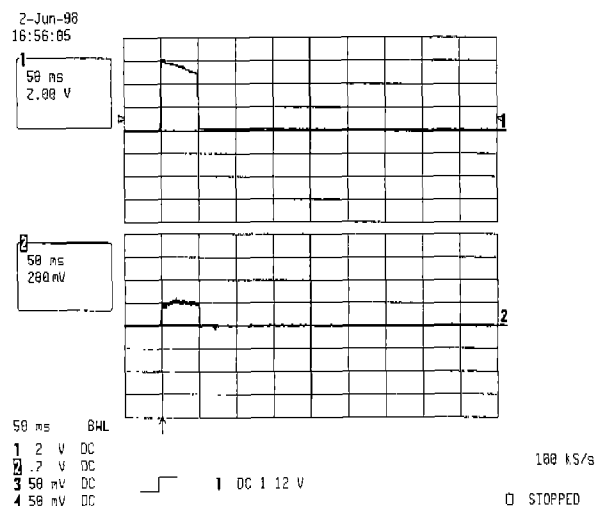


Fig.9 Tube voltage waveform of inverter type X-ray generator using PSU (200mA,120kV, 50ms)

Table 2 Output radiation dose of resonant inverter type X-ray generator using PSU source. (mR)

| KV  | mAs | 10 mAs    |            |             |              |
|-----|-----|-----------|------------|-------------|--------------|
|     |     | 50mA*0.2s | 100mA*0.1s | 200mA*0.05s | 300mA*0.032s |
| 60  |     | 46.50     | 47.12      | 47.08       | 46.59        |
| 80  |     | 79.25     | 81.04      | 82.12       | 80.58        |
| 100 |     | 116.45    | 117.21     | 116.30      | 116.89       |
| 120 |     | 155.41    | 156.14     | 154.90      | 153.28       |

#### IV. 결론

공진형 인버터를 이용한 X-선 발생 변압기를 모델링하고 실제 장치의 출력특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동작 주파수를 높게한 공진형 고주파 인버터를 X선 장치에 응용함으로써 고전압 발생 변압기를 소형화 할 수 있었다.
2. 공진형 변압기를 모델링해서 시뮬레이션한 결과 관전압 변화시 맥동을 변화폭은 실제 장치를 측정 한 값과 거의 같은 비율로 나타났다.
3. 단상전원을 사용한 인버터 장치보다 PSU 전원을 사용했을 때 단시간 조사시 출력이 안정했다.
4. 단시간 특성의 안정화를 위해 향후 급격한 부하변동에 대한 실험이 요구되며 PSU 전원을 사용한 전체의 모델링을 수행하고자 한다.

#### 참고 문헌

1. H.Hino, T.Hatakeyama, M.Nakaoka : "Resonant PWM inverter linked DC-DC converter using parasitic impedences of high voltage transformer and its applications to X-ray generator", PESC, 88 Record 19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Vol. 66, No.6, pp.969~983, 1989.
2. Y.Cheron, H.Foch and J.Salesses "A study of a Resonant Converter Using Power Transistors in a 25kW X-rays Tube Power Supply" IEEE Power Electronics Specialists Conference, ESA Proceedings, 1985 pp.295-306
3. 吉田熙宣 ; "인버타식 X-선 고전압 장치의 특성과 임상 효과, 日本放射線技術學會雜誌, vol. 46, No.12, pp.1880~1884, Dec. 1990.

4. Marian, K. Kazimierczuk, and Manikatan k ; "Fixed Frequency Phase-Controlled Full-Bridge Resonant Converter with a series Load", IEEE. Trans. Power Electron, Vol. 10, pp.9~17, January 1995.
5. Edward E. Christensen : An Introduction to the Physics of Diagnostic Radiology, pp.29~48 Lea & Febiger, 1978.
6. 青柳泰可 ; "X-線寫眞に 影響するX線裝置の電氣的諸現象に關する研究(第3報)", 東方醫學會雜誌 21-1, pp. 25-147, 1978.
7. William R. Hendee, "Medical Radiation Physics", second edition, Year Book Medical Publishers, Inc. pp. 155~170, 1979.
8. 官崎茂, "X-線像を 左右する 診斷用X-線裝置の特性と信頼性", 日本放射線技術學會雜誌, 44-11, pp. 1639~1656, 1988.
9. 松尾 他 ; "인버타식 포타블裝置의 檢討" 日本放射線技術學會雜誌, 36-9, pp.1080, 1989.
10. Ashoka K.S.Bhat, " Fixed-Frequency PWM Series-Parallel Resonant Converter " IEEE Transactions on Industry Applications, Vol28, No.5,1002(1992)