

◆ 원 저 ◆

인버터식 X선발생장치의 출력특성개선이 환자피폭선량 경감에 미치는 효과

노모은 · 이성길 · 김영근

광주보건대학교 방사선과

The Effect on Patient Dose Reduction with Improvement of the Output Characteristics for Inverter Type X-ray Generator

Mo Eun Roh · Seong Kil Lee · Young Keun Kim

Department of Radiological Technology, Gwangju Health College University

Abstract

The conventional types of X-ray generators were bulky in physical size and heavy in weight, and the control accuracies of the output voltages were not always satisfactory. The high frequency switching inverter and converter technology on power conversion and control systems have been greatly closed up introducing power semiconductor devices. To decreasing the volume and the weight of high voltage transformer, and to stabilize ripple. In this paper, the newly developed x-ray generator in a low cost using duty modulation PWM inverter. This system verify improved performance by stabilize ripple of X-ray tube voltage and compared the reproducibility, linearity and dose in single phase, three phase and PSU.

Key Words : High frequency switching inverter, Tube voltage, Ripple, Linearity

I. 서 론

1985년 독일의 W.C. Roentgen에 의해 X-선이 발견된 이후 여러 분야에서 폭발적으로 이용되고 있으며, 특히 의료분야에서는 질병의 진단과 치료에 그 이용 건수가 날로 증가하고 있는 추세이다. 오늘날 기계공학과 의료전자기술의 발달로 진단용 X-선장치의 기능이 다양화 되고 여러 가지 형식의 X-선 발생장치가 보급됨

으로서 X-선 출력의 향상과 함께 정밀도와 효율성은 과거 어느 때보다 향상되고 있다. X-선을 발생시키기 위해서는 고진공의 X-선관 음극 측 필라멘트를 가열하여 열전자를 발생시키고, 음극과 양극 양단간에 20~150 kV 정도의 맥동률이 작고 안정화된 직류고전압이 X-선관에 공급되어야 한다. 이때 X-선관에서 방출되는 X-선의 에너지특성은 X-선관에 가해지는 직류고전압의 파형 특성에 의존하게 되므로 관전압 안정특성이 매우 중요시된다.^{1~2} 현재 임상에 보급되어 있는 대부분의 X-선 발생장치는 상용교류 전원을 이용해 교류 고압을 발생시키고 정류해서 직류 고전압을 X-선관에 인가하여 X-선을 발생하는 정류형 변압기식 고압발생장치가 사용되어 왔으나, 이것은 원리적으로 구조가 소형, 경량화가 어려운 점과 관전압의 맥동률이 커서 X-

Received January 19, 2011, 1st Revised February 04, 2011/ 2nd Revised February 15, 2011/ Accepted for Publication March 02, 2011

Corresponding Author: 이성길

(506-701) 광주광역시 광산구 북문대로 419번길 73

광주보건대학교 방사선과

Tel: 062) 958-7663 Fax: 062) 958-7669

E-mail: leesk@ghc.ac.kr

선 발생 효율이 매우 낮고, X-선관 출력제어장치의 동작이 정밀치 못해 신뢰성이 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 종래의 진단용 X-선장치의 문제점들을 개선하기 위해서 고속 스위칭능력을 갖는 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 인버터식 X-선 발생용 고압발생장치가 개발되어 이러한 문제점을 해결되어가고 있으나 인버터식 X-선장치는 대부분 수입에 의존하고 있으며 고압변압기의 입력전압을 고주파화 함으로써 변압기 크기를 소형, 경량화 할 수 있고, 관전압의 빠른 상승시간으로 인해 1 ms 정도의 짧은 시간도 조사가 가능하지만 X선관 소비 전력이 큼으로 대용량의 반도체 소자들을 사용하고 제어방식이 DSP를 통한 디지털 제어를 함으로써 생산원가 상승으로 인한 장치가격이 비싸 소형 병원에는 많이 보급되지 못하고 있는 실정이다.^{3~4} 따라서 본 논문에서는 정밀한 제어가 가능하고, 넓은 출력전압과 부하범위를 갖고, 신뢰성이 높으며 경제적인 보급형 고주파 공진형 인버터식 X-선발생장치를 설계 제작하여 출력특성의 안정성과 제어회로에 대한 재현성 및 직선성과 환자의 피폭선량 경감에 미치는 효과 등을 고찰하였다.

II. 실험 기기 및 방법

1. 고주파 공진형 인버터

Figure 1은 고주파 공진형 PWM 인버터를 도입한 X-선 발생장치의 전력변환처리 시스템을 나타낸다. 인버터에 공급되는 직류전원은 저전압 정류장치를 이용하였고 직류 입력전압을 높은 주파수의 교류 출력전압으로 만들기 위해 고속 스위칭소자로 IGBT를 사용해 전파정류회로를 구성한 공진형 PWM 인버터, 인버터 출력을 고전압으로 승압시키기 위한 고전압변압기, 고압케이블로 연결되어 부하로 작용하는 X-선관에 직류 고전압을 가하기 위한 다이오드 정류회로, 그리고 X-선관에 필라멘트 전류를 가하는 고주파 인버터로 구성되어 있다.

직류 고전압을 공급하는 고압케이블의 분포용량은 인버터의 주파수가 증가하게 되면 직류 고전압의 평활 필터로써 훌륭한 역할을 한다. 변압기의 등가회로는 일반적으로 자화인덕턴스와 누설인덕턴스를 사용하여 해석되지만, X-선 장치에서 사용되는 고전압변압기에서는

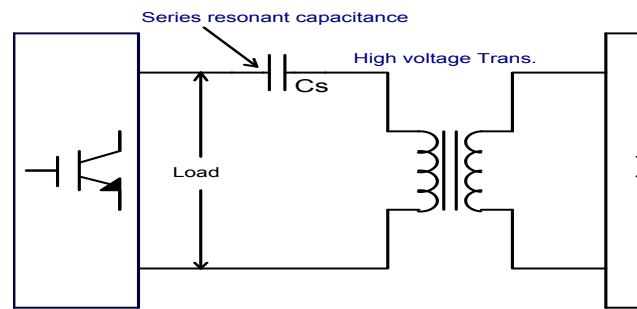


Fig. 1. Serial resonant load circuit

고전압변압기의 각 권선층에 존재하는 분포용량이 반드시 고려되어야 한다. 그 이유는 X-선 장치에 사용되는 고전압변압기는 권선비가 매우 크기 때문에 2차 측의 권선은 1차 측의 권선에 포개져서 여러 개의 코일층으로 감겨지게 되며, 각각의 권선층은 절연체로 격리되기 때문에 2차 측의 각 권선층 사이에는 고전압변압기 고유의 큰 분포용량이 존재한다. 또한, 고전압 변압기 2차 측과 X-선관 사이에 고압케이블로 연결이 되어 있어 250~300 pF/m 정도의 분포 정전용량을 갖는다.³ 고전압변압기는 이러한 고유 임피던스가 별도의 공진소자를 부가하지 않고도 효율적인 공진용 LC소자로써 작용한다. 일반적으로 고전압변압기는 X-선 장치인 경우 전압을 최대 150 kV 정도까지 승압하기 위해서 215 정도의 권선비를 갖기 때문에 2차측 권선은 여러 개 층으로 구성되고 그 누설 인덕턴스는 10~100 μH 정도이다. 이 인덕턴스는 인버터의 스위칭 소자가 스위칭 동작을 완전히 수행하는데 소요되는 시간을 어느 한계 이하로 하는 것을 제한하여 실제 사용에 있어서 인버터의 동작 주파수를 제한하는 요인이 된다. 따라서 이러한 스위칭 손실의 증가와 동작주파수의 제한 등과 같은 단점을 보완하기 위하여 고전압변압기의 고유임피던스를 공진소자로 이용하게 되는 것이다. 고주파 고압변압기는 Figure 2와 같다.

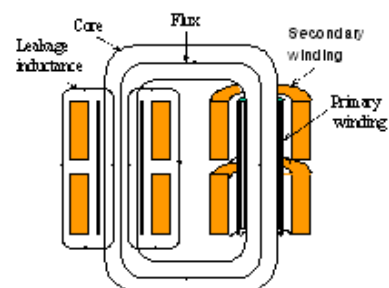


Fig. 2. High voltage transformer

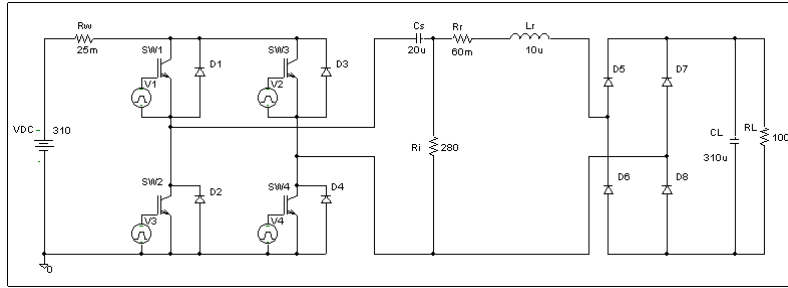


Fig. 3. Circuit model of resonant inverter

Table 1. Circuit parameters of resonant inverter

| symbols | Items/circuit topologies | value |
|-----------|--------------------------|----------|
| R_w | 배선저항 (mΩ) | 25 |
| C_s | 공진콘덴서용량 (μF) | 7.96 |
| R_i | 고압변압기 철손저항 (Ω) | 280 |
| R_r | 고압변압기 동손저항 (Ω) | 60 |
| L_r | 고압변압기 누설리액턴스 (μH) | 7.96 |
| C_L | 고전압케이블의 정전용량 (μH) | 310 |
| R_L | X선관 부하저항 (Ω) | 0.1~1000 |
| f_{INV} | 스위칭주파수 (kHz) | 20 |

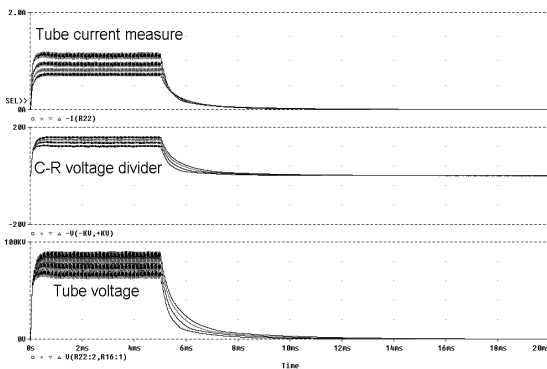


Fig. 4. Tube voltage and tube current waveforms of variable load

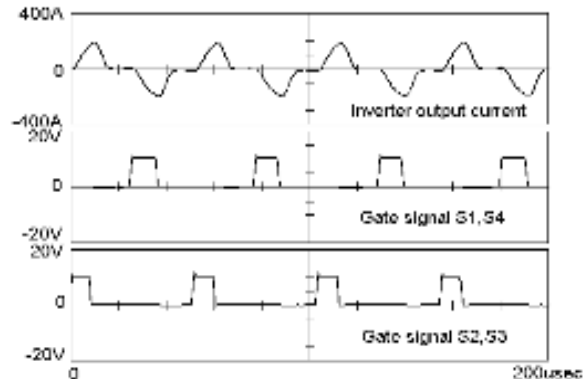


Fig. 5. Output current and gate signal of inverter

2. 시뮬레이션

고주파 공진형 인버터의 이론적인 동작 특성과 하드웨어를 구성하는데 필요한 각 파라미터를 추출하기 위하여 Pspice를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 조건으로 직류 입력 전압을 310 V, 스위칭 주파수는 20 kHz 로 설정하였다. Figure 3은 직렬 공진 방식의 인버터식 X-선 발생장치의 시뮬레이션으로

사용된 회로도를 나타내고 사용된 파라미터는 Table 1에 나타내었다.

Figure 4의 회로를 사용하여 스위칭 신호의 듀티를 0.4로 시뮬레이션 하였을 때 고압변압기 1차측의 전압, 전류 파형을 나타낸다. Figure 5는 관전류 및 C-R분압기 전압파형과 관전압 파형으로 관전압이 높아질수록 맥동율이 점차 상승함을 알 수 있다.

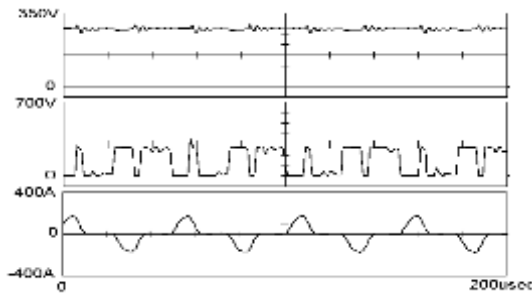


Fig. 6. IGBT E-C Voltage and current wave forms of inverter

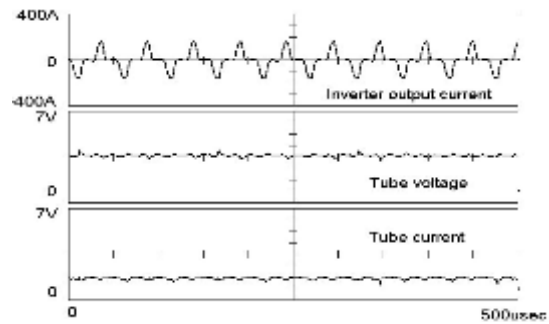


Fig. 7. Voltage of CR divider and Measuring tube current

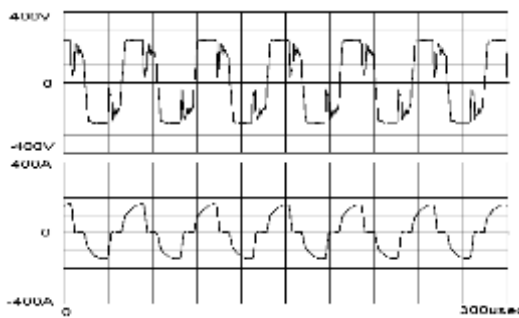


Fig. 8. Primary windings current and voltage waveforms of H.T

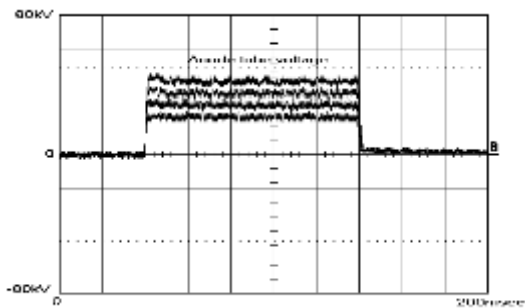


Fig. 9. Tube voltage waveforms of CR divider

III. 결 과

Figure 5는 공진형 인버터의 IGBT에 인가되는 스위칭 파형을 나타낸다. 이때 ch. 1은 인버터 출력 전류이면서 고압변압기 1차측에 흐르는 전류이고, ch. 2는 IGBT S1과 S4, ch. 3는 IGBT S2와 S3에 인가되는 신호이다. ch. 2과 ch. 3의 신호는 180° 반전되어 IGBT S1~S4에 각각 인가되며 신호의 듀티비에 따라 인버터의 출력전류가 증가함을 알 수 있다.

Figure 6은 관전압이 100 kVp, 관전류 100 mA 일 때 인버터의 DC 링크 전압(ch.1)과 IGBT 스위치의 양단에 걸리는 Vce(ch.2)와 이때 흐르는 인버터 출력전류(ch.3)를 나타낸다. Figure 7은 관전압, 관전류를 피드백 제어하기 위한 C-R 분압기에서 검출된 관전압과 중성점 전류 검출을 통한 관전류를 나타낸다. ch.1은 고압변압기 1차 전류이고 ch.2는 관전압, ch.3은 관전류를 나타낸다. Figure 8는 고압변압기 1차측의 전압 및 전류파형을 나타내고 측정된 전압은 공진콘덴서와 공진인덕터의 후단인 고압변압기 1차측의 전압, 전류파형으

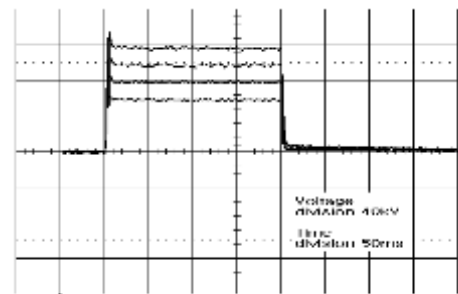


Fig. 10. Output voltage waveforms of X-tube

로 공진회로의 전압강하로 인해 인버터의 출력전압보다는 낮게 나타난다.

Figure 9은 C-R분압기의 양극과 음극간의 관전압 파형을 나타내며 관전압이 높아짐에 따라 맥동율이 증가하였다. Figure 10은 고주파 공진형 PWM 인버터식 X-선 장치를 이용해 관전류 50 mA, 조사시간 200 ms 에서 관전압을 60 kVp, 80 kVp, 100 kVp, 120 kVp로 변화시켰을 때의 관전압 파형으로 맥동률(60 kVp : 5.6%, 80 kVp : 6.1%, 100 kVp : 6.7%, 120 kVp : 7.3%)의 변화폭이 매우 작고, 안정하게 나타났다.

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

| kVp | mAs | | 10 mAs | | |
|-----|---------------|-----------------|-----------------|------------------|--|
| | 50 mAs, 0.2 s | 1000 mAs, 0.1 s | 200 mAs, 0.05 s | 300 mAs, 0.032 s | |
| 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 | |

Table 3. X-ray output reproducibility of inverter type generator using single, three phase, PSU source

| CV | source | | | |
|--------------|--------------|-------------|-----|--|
| | single phase | three phase | PSU | |
| 0 - 0.009 | 4 | 5 | 5 | |
| 0.01 - 0.019 | 3 | 3 | 2 | |
| 0.02 - 0.029 | 1 | | 1 | |
| 0.03 - 0.039 | | | | |
| 0.04 - 0.05 | | | | |

Table 4. Linearity of the inver type X-ray generator

| kVp | source | | | |
|--------|--------------|-------------|-------|--|
| | single phase | three phase | PSU | |
| 60 kVp | 0.073 | 0.095 | 0.07 | |
| 80 kVp | 0.069 | 0.09 | 0.067 | |

같은 조건 하에서 출력선량을 측정한 결과 Table 2와 같이 어떤 관전압에서도 장시간 조사일 때 동일한 mAs가 주어지더라도 단시간 때보다 출력선량이 약간 저하되는 현상이 나타났다. 출력의 재현성에 관한 진단용 X-선 장치의 검사기준에서 측정한 조사선량의 평균치에 대한 표준편차를 말하는 변동계수(cv) 4~6는 0.05 이하여야 하는데 Table 3에서와 같이 모든 전원에서 이 조건을 만족하고 있다. 또한 직선성 7~11도 Table 4와 같이 상당히 우수하게 나타났다.

IV. 고찰 및 결론

본 논문에서 제안한 X-선 발생장치의 전체 회로는 Figure 11과 같으며 입력교류 전압을 직류로 변환하기

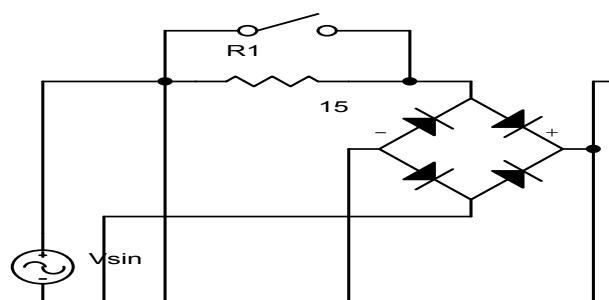


Fig. 11. Whole configuration of X-ray generator

위한 정류부와 평활콘덴서, 직렬공진형 인버터와 인버터의 선간 전압을 승압하여 고압을 얻기 위한 고주파 고압변압기와 고압을 정류하여 X-선관 양단에 직류 고압을 공급하기 위한 고압 다이오드로 구성된 고압 정류

부, X선관 입력 전압 공급선(feeder)으로서 출력측의 평활 필터로 사용되는 고압 케이블과 X-선관 음극의 필라멘트를 가열하기 위한 인버터와 필라멘트가열용 변압기로 이루어진다.

고주파 공진형 인버터식 X-선 발생장치를 시뮬레이션한 결과와 제작한 X-선 발생장치의 출력전압, 전류 파형 및 출력특성이 거의 일치하게 나타났으며 공진회로를 구성하고 고주파 동작시킴으로써 장치의 소형, 경량화를 도모하였다. 전체시스템의 제어는 모니터링 기능이 우수한 범용 저가의 8 bit의 프로세서를 사용하였고 소프트 스타트기능이 내장된 PWM IC를 사용하여 공진형 인버터의 출력제어를 하였다. 또한 관전압의 리플이 적고 정전압 장치의 파형에 가까운 안정한 출력특성을 얻을 수 있었고 전압 상승시간이 1 ms 이하로 짧아 고정밀 제어가 가능하였다.

참고문헌

1. Wu TF, Hung JC. A PDM Controlled Series Resonant Multi-level Converter Applied X-ray Generators. *IEEE Transactions on Industry Applications* 1999; 34: 1177-82.
2. Kang SS, Kim CS, Ko SJ. Usefulness of Non-Invasive Measurement Tool on Performance Evaluation of Inverter Type X-ray Unit. *Journal of Korean Society of radiological technology* 2008; 31: 123-7.
3. Stanton L, Lightfoot MA, Mann S. A Penetrometer for field kV Calibration of Diagnostic X-ray machine. *Radiology* 1966; 87: 87-98.
4. Kim JM, Oh JH. Usefulness of inverter type REX-650 R/F X-ray equipments, *Journal of Korean Society of radiological technology* 2003; 26: 31-7.
5. Lee SK, Choi SK. Design of High Frequency Resonant High-tension Transformer in Inverter Type X-Ray Generator. *Journal of Korean Society of radiological technology* 2001; 24: 5-11.
6. Im IC. An ability test for the use of indirect radiographic unit, *Journal of Korean Society of radiological technology* 2004; 27: 37-41.
7. Ko SG, Ahn BS, Jang SS, Choi JW, Shin YS. A Study of X-ray Output for Diagnostic X-ray Equipment. *Journal of Korean Society of radiological technology* 1995; 18: 61-73.
8. Park JJ. The Experiment and Theory of High Frequency Generator for X-ray Equipment. *Journal of Korean Society of radiological technology* 1994; 17: 97-109.
9. Kim JM. A Comparative Study on Output of Four Type Diagnostic X-ray Equipments. *Journal of Korean Society of radiological technology* 1997; 20: 34-43.
10. Makoto Katoh, Characteristics and Clinical practice of the Inverter-Type Mobile X-ray Generator. *J Radiol Technol* 1991; 10: 185-97.
11. John PK, Trout ED. Physical characteristics of the Radiations from 2-pulse, 12-pulse, and 1000-pulse X-ray Equipment. *Radiology* 1971; 100: 653-661.