

인버터식 X선장치의 관전압 맥동율 개선에 관한 연구

이성길*, 임홍우, 조금배, 정수복, 백형래**

*광주보건대학 **조선대학교

A Study on the Improvement of ripple factor tube voltage waveforms in inverter type X-ray generator

Seong-Gil Lee*, Hong-Woo Lim, Geum-Bae Cho, Soo-Bok Chung, Hyung-Lae Baek**

*Kwang-ju Health College, **Chosun University

Abstract

In order to radiate X-ray, the low ripple stabilized high voltage DC over the range of 40KV to 150KV is directly inflicted to X-ray tube. The energy characteristics of the radiated X-ray depend on the pulsating waveforms of the DC voltage supplied X-ray tube. In general, the low ripple voltage waveforms with fast rising times are required to increase with the dosage per unit time lest the exposure time should be longer in order that the motion artifacts of an object may be eliminated in actual.

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 new power semiconductor devices. To decreasing the volume and the weight of high voltage transformer, and to stabilize ripple, a high frequency PWM inverter is connected between DC source and high voltage transformer.

This paper describes the output characteristics according to stabilize ripple of X-ray tube voltage and compared the reproducibility, directibility and dosage.

I. 서론

질병의 진단 및 치료의 핵심적인 역할을 하고 있는 X선은 발견된지 100여년 밖에 되지 않는 짧은 역사지만 의료 분야에서는 필수적인 진단과정으로 확고히 자리를 잡았고 그 이용분야도 단순촬영 및 조영촬영, 전산화단층촬영(C·T), D·R(Digital Radiography) 등으로 매우 다양화 되어가고 이용률도 계속 증가되어 가고 있다. 이러한 X선을 인체에 조사해서 사진 촬영시 진단적 정보를 제공함과 동시에 방사선이 생체조직과 상호작용 결과 전리(Ionization)현상을 일으켜 장해를 수반할 가능성이 있으므로 사용에 있어 안정성(stability)과 최적성(optimization) 및 피폭의 최소화(minification)가 반드시 이루어져야 한다.¹⁾

오늘날 기계공학과 의료전자 기술의 발달로 진단용 X선장치가 보급됨으로서 X선 출력의 향상과 함께 정확도와 효율성은 과거보다 월등히 향상되어가고 있다. X선을 발생시키기 위해서는 고진공(10⁻⁷mmHg)의 X선관에 전자를 발생시키고 고전압을 공급하여 발생하는 X선의 물리적 성질은 파동성과 입자성의 2중성이 있고 에너지특성(파동성)은 직류전압의 파형에 의존하게 되므로 관전압 안정특성이 매우 중요시 되며, 발생된 X선의 양(입자성)에 관계되는 관전류는 진단의 종류에 따라 0.5mA에서 1000mA의 범위로 변화되기 때문에 진단용 X선 장치의 출력은 대략 20kW에서 100kW의 범위이다.^{2,3)}

현재 임상에 보급되어 있는 대부분의 X선발생 장치는 상용교류전원을 이용해 교류고압을 발생, 정류해서 직류 고전압을 X선관에 인가하여 X선을 발생하고 있는데, 이와 같은 장치는 변압기를 소형화하기 어렵다는 점과 관전압의 맥동율이 커서 X선발생 효

율이 낮고 X선관 출력 제어장치의 동작이 정밀치 못해 신뢰성이 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 이러한 진단용 X선 발생장치의 문제점을 개선하기 위해 고전압 전원 공급장치에 대한 여러 가지 연구가 진행되어왔고 새로운 전력 반도체소자도 개발되어 오고 있다.

전력변환과 제어장치 부분에 있어서 고속스위칭 인버터와 컨버터 기술은 이들 새로운 전력반도체 소자들을 도입하여 진단용 X선장치에 사용함으로써 고전압 변압기의 중량과 부피를 줄이고 X선관에 직류 고전압을 안정하게 인가시킬 수 있었고 출력을 보다 정밀하게 제어하기 위한 DC-DC컨버터가 결합된 인버터식 X선 장치가 개발되어 보급되어가고 있다.⁴⁾

인버터식 X선 고전압 발생장치는 방형과 방식과 공진형방식이 있고 인버터의 주파수를 고주파로 함으로 기기는 소형화가 가능하지만 높은 스위칭 손실과 스위칭 서지를 발생시켜 문제가 된다. 공진형 인버터는 시스템에서 발생하는 스위칭 손실과 고주파 노이즈 감소를 효과적으로 해결 할 수 있다.

본 논문에서는 진단용 X선발생장치의 고주파 공진형 변압기에서 공진회로를 분리하는 방식을 모델링하고 X-선 관전압의 리플이 안정하게 하기위해 설계된 이중 분할 공진회로로 구성된 시스템의 출력특성에 관하여 기술한다.

II. 고주파 공진형 PWM인버터식 X선장치

본 연구에 사용된 X선발생장치의 전체 구성도는 그림1과 같으며 인버터에 공급되는 직류공급전원은 저전압 정류장치를 이용하였고 직류입력전압을 높은 주파수의 교류출력 전압으로 만들기 위해 고속스위칭 소자로 IGBT(1200V/300A)를 사용해 전파정류회로를 구성한 공진형 PWM인버터, 인버터 출력전압을 고전압으로 승압시키기 위한 고주파 고전압변압기, 이 고압을 정류하여 X선관 양단에 직류고압을 공급하기 위한 다이오드로 구성된 공급 정류부, 그리고 X선관 입력전압 공급선으로서 출력측의 평활 필터로 사용되는 고압cable, 또한 X선관 음극측 필라멘트를 가열하기 위한 필라멘트 가열회로를 초퍼-인버터와 필라멘트 가열용 변압기로 이루어진다.⁵⁾

변압기의 등가회로는 일반적으로 자화 인덕터스와 누설 인덕터스를 사용하여 설명되지만, X선 장치에서 사용되는 고전압 변압기에서는 고전압 변압기의 각 권선층에 존재하는 분포용량이 반드시 고려되어야 한다. 그 이유는 X선 장치에 사용되는 고전압변압기는 권선비가 크며 2차측의 권선은 절연체로 격리되기 때문에 2차측의 각 권선층 사이에는 고전압변압기 고유의 큰 분포용량이 존재한다. 또한, 고전압 변

압기 2차측과 X선관 사이에 고압케이בל로 연결이 되어있어 250~300 pF/m 정도의 분포 정전용량을 갖는다. 고전압변압기는 이러한 고유 임피던스가 별도의 공진 소자를 추가하지 않고도 효율적인 공진용 LC소자로써 작용한다. 일반적으로 고전압변압기는 X선 장치인 경우 전압을 최대 150kV 정도까지 승압하기 위해서 400~600 정도의 권선비를 갖기 때문에 2차측 권선은 여러개 층으로 구성되고 그 누설 인덕터스는 10~100 μH정도이다. 이 인덕터스는 인버터의 스위칭 소자가 스위칭 손실의 증가와 동작주파수의 제한 등과 같은 단점을 보완하기 위하여 고전압변압기의 고유임피던스를 공진소자로 이용하게되는 것이다. 또한, X선발생시스템에서 구성된 고압 발생용 인버터와 필라멘트가열용 인버터의 IGBT 스위칭 주파수는 20kHz로 고정시켜 놓고 위상전이각을 조정함으로써 연속적인 인버터의 출력전압 제어가 가능하도록 한다.

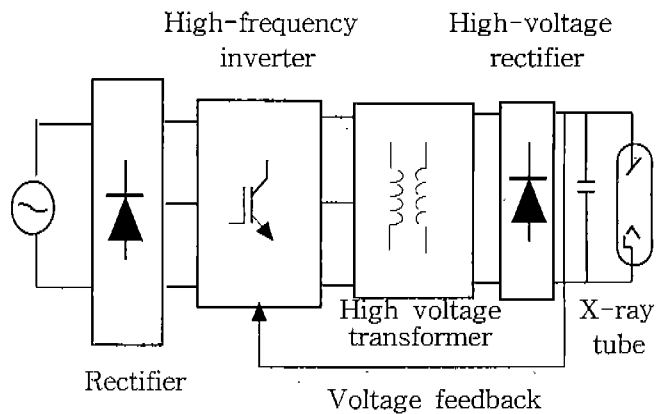


Fig. 1 Block diagram of High-Frequency PWM inverter type X-ray generator

III. 직렬공진형 인버터식 X선 고전압장치의 modeling 및 시뮬레이션

1. 고전압 변압기

그림2는 고전압변압기의 구조를 나타낸 것이다. 1차 권선과 2차 권선 철심(두께 50μm의 규소강판)에 2각으로 나누어 감겨져 있고, 그림1에서 표시한 것과 같이 한 쪽은 anode측, 다른 쪽은 cathode측에 접속되어 있다. 2차 권선은 부유 용량을 낮추기 위하여 2개로 분할되어 있다. 통상 75kV이상의 내압에 견디기 위해서는 1차와 2차 권선 사이에 일정한 거리가 떨어져 있고, 이것에 의해서 누설 자속이 생겨 누설 인덕터로서 작용한다. 이 누설 자속은 철심을 통하지 않는 자속이고, anode측과 cathode측 권선간의 결합

계수가 높지 않게 하는 요인이 된다. 고전압변압기의 누설 인덕턴스가 크면, 인버터 동작주파수가 고주파화 되어 출력측의 임피던스를 증대시키게 되고 X선 고전압장치의 출력을 높이는데 있어서는 좋지 않게 된다. 따라서 고전압 변압기의 입력측에 직렬로 콘덴서를 삽입해서 직렬 공진회로를 구성하고 누설 인덕턴스와 전류 공진을 일으켜서 고전압 변압기로부터 부하로 충분한 전류가 공급되는 방식을 취하고 있다.

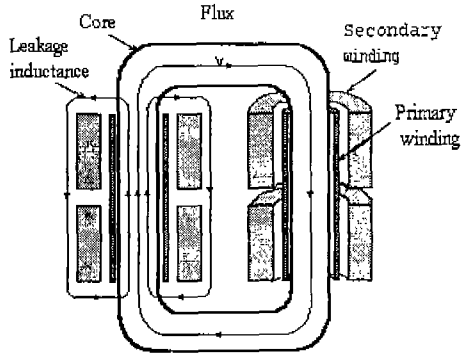


Fig. 2 High-voltage transformer

2. 시스템 모델링

X선관의 양극과 음극 전압을 평형하게 하기 위해서는 고전압변압기의 1차 또는 2차 권선을 2분해서 제작해 교차시키는 방식과 고전압 변압기의 1차 권선을 직렬로 접속하는 방법 등이 있으나 내전압이나 누설 인덕턴스의 설계에 제약을 주고, 양극과 음극측 1차 권선의 전류 위상이 일치하는데 이는 양자의 1차 권선의 전압 분담이 균등하지 않는 문제점을 가진다.

그림3은 공진회로를 분리하는 방식을 나타내고 있다. 기존의 회로에서는 1개의 공진용 콘덴서($15\mu\text{F}$)와 2개의 1차 권선(각 $30\mu\text{H}$)을 접속한 공진회로로 되어 있는 것에 대해서 종래의 절반의 용량($7.5\mu\text{F}$)의 콘덴서 2개를 양극과 음극측으로 공진회로를 분리하고 있다.

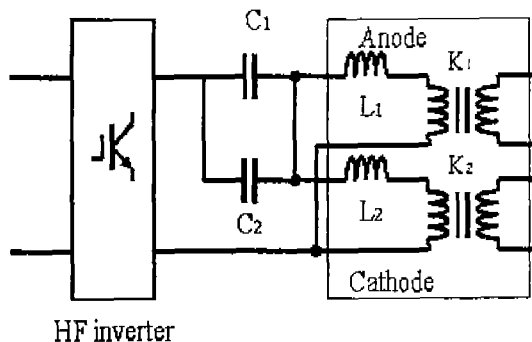


Fig. 3 Splitting resonant circuit into two parts

3. 시뮬레이션

그림 4는 기존의 회로와 공진회로를 분리하는 방식에 있어서 X선 고전압장치의 시뮬레이션 모델링을 나타내고 있다. 공진회로 분리 방식에서는 콘덴서 C1과 C2(각각 $7.5\mu\text{F}$)를 접속하여 양극측과 음극측으로 공진회로를 분리하였다. 이 그림에서는 인버터 출력 이후만 고려하였고 고전압 변압기와 고전압 정류기를 각각 양극측과 음극측으로 분리하고 있다. 인버터 출력 전압은 단형파 이지만 여기에서는 편의상 인버터 출력 전압의 기본파와 함께 주파수가 20kHz 인 정현파로서 취급한다. 그리고 이 주파수는 누설인덕턴스 L1, L2와 공진 콘덴서 C1, C2에 의해서 정해지는 공진 주파수와 같다.

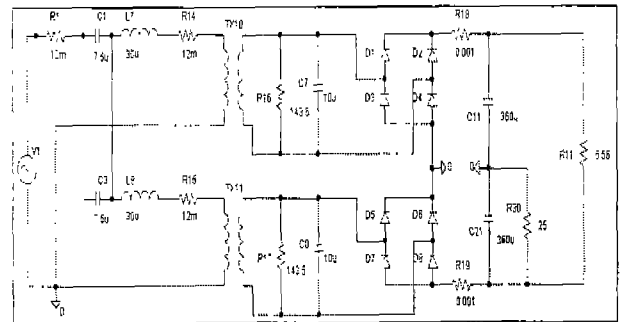


Fig. 4 High voltage transformer modeling

또한, 출력측 양극과 음극사이의 부하저항(X-선관)은 R로 나타냈다. 시뮬레이션 툴로써는 Pspice (Design Center com, version 8.0)를 사용하였으며 효율성 있게 진행하기 위해 고압변압기의 권선비가 1이 되도록 파라미터를 정하고 2차측 이후는 모두 1차측으로 환산해서 시뮬레이션 한 결과 그림 5와 같이 나타났다. 시뮬레이션 결과에 의하면 부하저항이 3배 변하면 출력전압은 30%정도 저하된다. 10%부하 저항의 차로 양극 전압과 음극측 전압의 유의차가 생기는 일을 오히려 생각하기 어렵다. 여기에서 공진 콘덴서를 2개로 분할하여 양극과 음극측에 독립 공진회로를 구성하는 방법을 검토했다.

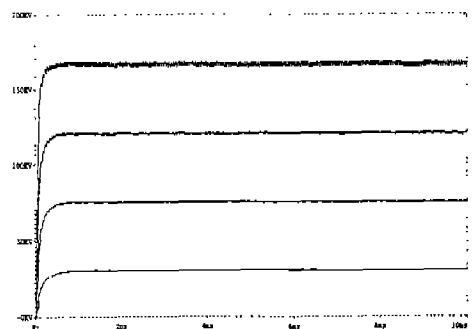


Fig. 5 The output voltage waveforms of simulation

IV. 실험 및 고찰

1. 고주파 공진형 인버터식 X-선발생장치의 출력특성

그림6은 기존의 인버터식 X-선발생장치의 관전압 출력파형을 각 전압별(60, 80, 100, 120KV)로 나타낸 것이고 그림 7은 공진회로를 분리하는 방식으로 구성된 X-선 고전압 발생장치의 관전압 출력파형을 나타낸 것이다. 관전압이 상승할수록 리플이 증가함을 볼 수 있지만 비교적 안정된 관전압을 가지며 공진회로를 분리한 시스템에서 유리한점은 커패시터의 용량을 줄임은 물론 전체시스템의 크기도 상당히 줄일수 있다는 잇점을 가지고 있다. 그림8과 그림9는 공진회로를 분리한 시스템에서 관전류 증가에 따른 관전압 리플 변화를 나타낸 것이다.

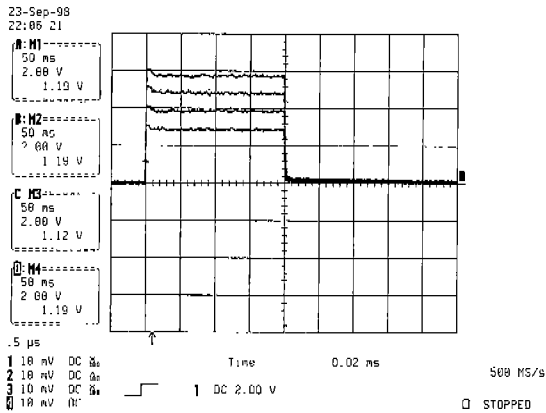


Fig. 6 Output voltage waveform in conventional type

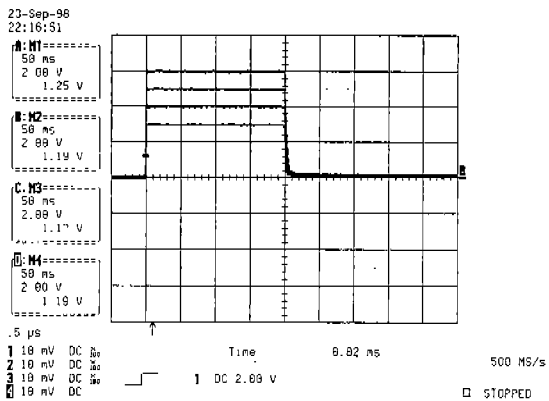


Fig. 7 Output voltage waveform in splitting resonant circuit into two parts

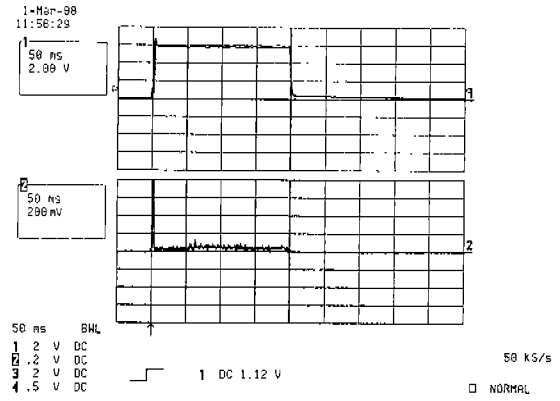


Fig. 8 Output voltage and current waveform in splitting resonant circuit into two parts at 120KV, 50mA, 200ms

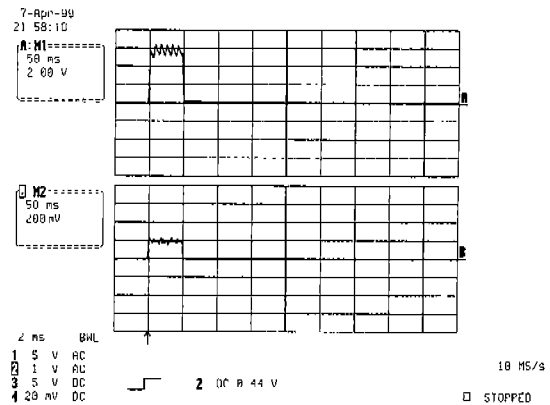


Fig. 9 Output voltage and current waveform in splitting resonant circuit into two parts at 120KV, 200mA, 50ms

2. 출력선량의 직선성 및 재현성

X-선 출력의 직선성은 같은 $mAs(mA \times sec)$ 에서 출력의 동일성을 측정하는 실험으로 관전압 100KV 일 때 50, 100, 200, 300mA에서 관전류와 시간의 곱으로 조사한 결과 그림10과 같이 나타났다.

장치가 가진 최단 조사 시간의 비직선성 정도는 관전류에 따라 직선성이 다르고 저 관전류 될수록 직선성은 저하된다.

출력의 재현성에 관한 X-선장치의 검사기준에서 측정된 조사선량의 평균치에 대한 표준편차를 말하는 변동계수(CV)는 0.05 이하여야 하는데, 본 시스템에서 사용된 시스템은 0.03~0.039로 이 조건에 만족하고 있다.

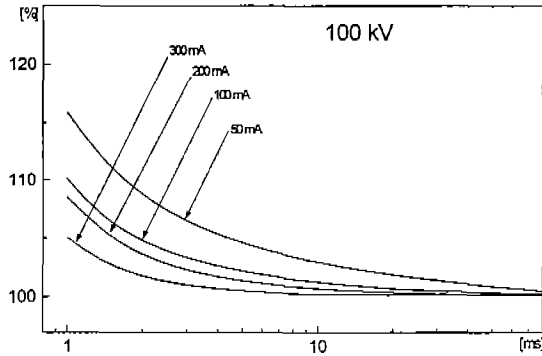


Fig. 10 Linearity of X-ray output in splitting resonant circuit into two parts

V. 결론

고주파 공진형 인버터식 X-선발생장치에서 공진회로를 분리하는 방식에 대한 모델링을 하고 백동률 변화에 따른 출력변화 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 부하저항이 3배 변하면 출력전압은 30%정도 저하된다. 10%부하 저항의 차로 양극측 전압과 음극측 전압의 유의차가 생기는 일은 생각하기 어렵다.
2. 고주파 공진형 인버터식 X-선장치에 이중 분할 공진회로로 구성된 시스템을 응용함으로써 커패시터 용량과 전체시스템 크기를 줄일 수 있었다.
3. 출력선량의 재현성은 CV가 0.05이하로 안정했고 직선성도 허용범위 이내이다.

참고 문헌

- [1] Myeong Hwan Park, Joon Il Lee : "A Study on Radiation Quality of the Diagnostic X-ray Equipments", Journal of K.S.R.T, Vol.20(1), pp.55~59, 1997.
- [2] Ji Yeul. Kim, : "Basic Radiobiology" Ryo Moon Gak, pp.86~108, 1987
- [3] H.Hino, T.Hatakeyama, K.Kawase, M.nakaoka, "High Frequency Parallel Resonant Converter for X-ray Generator Utilizing Parasitic Circuit Constan of High Voltage Transformer and Cables". Proceeding of ITELEC, Vol.2, pp.20, 1990.
- [4] 유동욱, 하성운, 백주원, 김종수, 김학성, 원충연, "고주파 공진형방식 X-선 발생장치에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp.209~211, 1995

- [5] H.Hino, T.Hatakeyama, M.Nalaoka, "Resonant PWM Inverter Linked DC-DC Converter Using Parasitic Impedance of High-Voltage Transformer and Its Applications to X-ray Generator" Proceeding of PESC, Vol.2, pp.1212-1219, 1988