

고주파 공진형 방식 X-선 발생장치에 관한 연구

유동욱*, 하성운*, 백주원*, 김종수*, 김학성**, 원충연**
 ** 한국 전기연구소, * 성균관 대학교 전기공학과

A Study on High Frequency Resonant Type X-ray Generator

Yoo Dongwook*, Ha Sungwoon*, Baek Joonwon*, Kim Jongsoo*, Kim Hackseong**, Won Chungyuen**
 * KERI, ** Dept. of Electrical Eng. Sung kyun kwan Univ.

ABSTRACT

This paper is concerned with High Frequency, High Voltage Generator for X-ray using zero-voltage soft-switching PWM DC-DC high-power converter by Resonant method, which makes the most of the parasitic LC parameters of high-voltage transformer link, for diagnostic X-ray power generator. The converter circuit basically utilizes phase-shift pulse width modulated series Resonant full-bridge PWM DC-DC high-power converter operating at a constant frequency: 25kHz. The converter output regulation is digitally controlled using DSP (Digital Signal Processor) for obtaining a fast rising time and adjust output voltage within a wide load range.

1. 서론

X-선은 1895년 독일의 Röntgen이 발견한 이래 새로운 빛으로써 주목받기 시작하였고 그 이후 약 100년 동안 발생기술 또한 크게 발전하여 인체 내부의 골격 및 국부적인 관측을 위한 의료용 X-선 장치로서 진단용 의료 기기의 핵심이 되었다. 현재의 X-선관은 X-선관 양단에 구동 전원 장치에서 발생한 고전압을 인가하여 텅스텐 필라멘트를 가열시켜 전자를 발생시키고 있으며 이 고전압은 20kV에서 최대 150kV의 직류이고 또한 방사된 X-선의 에너지 특성은 X-선관에 공급된 직류전압의 리플 파형에 의존 된다. 지령전압의 빠른 상승 시간과 함께 저리플전압은 단위 시간당 X-선 노출 시간을 최소화 할 수 있다. 따라서 X-선 발생 전원으로로서의 요구조건은 다음과 같다.

첫째, 순시대전력을 발생시킬 수 있는 고에너지밀도의 전원이고 둘째, 적절한 X-선 정보를 얻기 위한 제어성이 좋은 전원이며 셋째, 전원 on/off시 재현성이 좋고 내구성이 좋은 것 등이다.

위의 요구조건을 충족시켜주기 위해서 과거부터 정류형 변압기식 전원이 사용되고 있으나 이것은 원리적으로 구조가 소형, 경량화되기 어렵다는 점과 X-선관의 제어에 대한 신뢰성이 문제점으로 지적되어 왔다. 그러므로 본 논문에서는 고주파 대전력 변환기술로서 공진회로를 이용 X-선 발생전원장치를 소형 경량화, 고효율화를 실현하고 새로운 디지털 제어기법을 이용하여 장치의 고신뢰성을 목적으로 하였다. 이에 따른 적용기술로는 스위칭 방식으로서 소프트-스위칭 방식(Soft-Switching Method)을 이용하여 주 전력변환회로의 스위칭 반도체 소자인 IGBT의 스트레스 저감 및 효율 상승을 도모하였다. 그리고 TMS 320C31 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 연산시간 지연에 따르는 실시간 디지털 제어의 문제점을 해결하여 순간 부하 임피던스 변동에도 안정된 응답특성을 갖는 X-ray용 고주파 고전압 발생장치를 연구하였다.

2. X-Ray용 고주파 공진형 고전압 발생 시스템

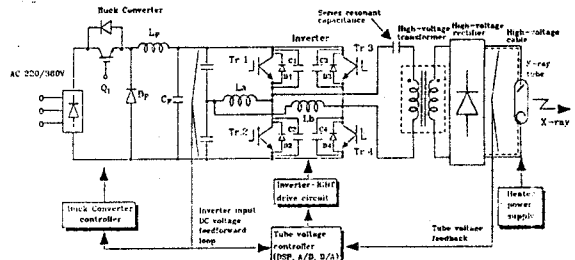


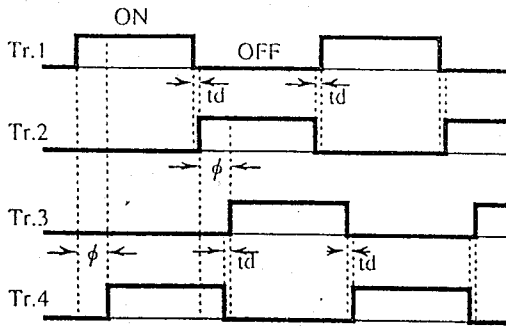
그림 1. X-Ray용 전력 발생장치 전체 시스템 구성도

그림 1.은 제안된 X-Ray 전력 발생장치의 전체 시스템 구성도로서 DC-DC 컨버터 시스템을 나타내고있다. 이 컨버터 시스템은 입력으로서 직류전압을 공급하기 위하여 3상 상용 교류전원(AC 200/400V)을 직류로 만들기 위한 3상 다이오드 모듈로 구성된 정류부와 안정화된 인버터 입력 직류 전압을 공급하기 위한 강압형 쇼퍼부, 고정된 주파수로 고주파 스위칭 동작을 위한 공진 Pole PWM 직렬 공진형 인버터부, 인버터의 순간 전압을 송입하여 고전압을 얻기 위한 고주파 고압 변압기부, 이 고전압을 정류하여 X선관에 고전압 직류 전원을 인가하기 위한 고압 다이오드로 구성된 고압 정류부 그리고 X선관의 애노드와 캐소드에 고전압을 인가 하기 위한 고전압케이ابل부 또한 전체 시스템을 제어 하기 위한 DSP Controller부로 나눌 수 있다.

그림에서 공진 Pole PWM 인버터부에서는 영전압 소프트 스위칭을 위하여 스위치와 병렬로 커패시터(C1-C4)를 연결하고 준공진 인덕터 L_a 와 L_b 를 삽입하였다. 여기서 커패시터는 접속 스위치의 턴-온과 턴-오프시 dv/dt 를 감소시키기 위한 Voltage clamped 스너버이고 페라이트 코어에 Litz Wire로 감은 인덕터 L_a 와 L_b 는 인버터의 전류(轉流) 모드가 이루어지는 동안 공진 극에 삽입되어 턴-온시 영전압을 얻게하는 역할을 한다. 그리고 공진회로 요소로서 고주파 고전압 변압기의 기생 인덕턴스 성분과 표유 커패시턴스 성분에 직렬 커패시턴스 성분을 추가하여 직렬 공진 인버터로 동작되고 출력은 Phase-shift PWM 방식으로 고주파 인버터 내부에서 조절할 수 있게 구성되어 있다. 또한 출력단의 고전압 케이ابل은 X-선관 전압 feeder로서 출력의 Smoothing 필터로서 사용되어진다. 그리고 이 시스템 출력단의 순간 부하 변동시 빠르고 정확한 출력 전압의 보상을 위하여 DSP(TMS320C31)제어기에서는 입력단에서 직류 Link전압(Input dc voltage feed forward loop)을 출력단에서 필라멘트 양단간의 전압(Tube voltage feedback loop)을 검출하여

PID 알고리즘을 수행 그 출력값을 Phase-Shift PWM Controller 에 전달함으로써 위상 전이 지연 시간(Phase-Shifted delaying time) ϕ 를 조정하여 인버터의 출력 전압을 조절 함으로써 순간 부하 변동시 빠른 전압 보상을 가능하게한다.

3. Phase-Shift PWM 제어



ϕ : Phase - shifted delaying time
 td : Dead time

그림 2. PWM 인버터의 스위칭 timing pulse sequence

스위칭 주파수를 가변시킴으로서 제어되는 주파수변환 컨버터 방식은 마그네틱 코어 손실과 노이즈, 자계소자의 낮은 활용도 등 많은 단점을 가지고있는데 이와같은 결점은 인버터의 동작 주파수를 고정시킬 수 있는 Phase-control 인버터를 사용함으로써 극복할 수 있는데 그림 2.에서는 Phase-shift PWM 제어 기법인 데드타임(td)이 포함된 인버터 스위칭을 온-오프 하는 게이팅 전압 신호와 그 순서이다. 인버터 출력전압의 주파수를 결정하는 스위치 S1과 S2의 게이팅 전압 신호는 0.5의 듀티비를 갖는 기준 게이팅 신호가되며 S1과 S2의 게이트 전압 신호에 대하여 S3와 S4의 게이팅 신호는 역시 0.5의 듀티비를 가지고 동기 전이 되어진다. 따라서 S3와 S4의 Phase-shifted 지연시간 ϕ 는 0에서 T/2까지 가변되어지므로써 고정된 주파수 내에서 인버터의 출력전압을 제어할 수 있다. 또한 데드 타임 td는 lossless 커패시터 leg내의 영전압 스위칭 동작을 얻기 위하여 특별히 고려되어야 할 시간이다. [1], [2], [3]

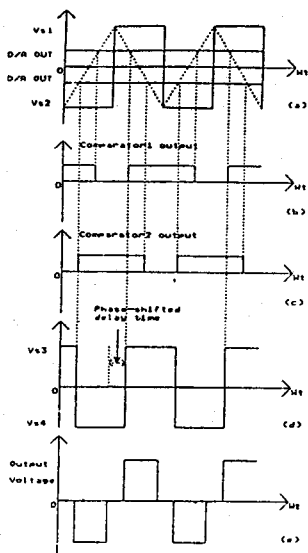


그림 3. Phase-shift PWM Controller의 동작 원리

그림 3.은 Phase-shift PWM Controller의 동작파형을 보여주 고있는데 (a)는 인버터의 기준상 전압 파형을 나타내고 이 기준상의 전압 파형 주기와 일치하는 삼각파의 파형과 전압 Controller의 제어 출력인 D/A컨버터의 DC 출력을 비교한 파형 이 (b)와(c)에 나타내었다. 그리고 이에 따른 Phase-shifted delay time을 갖는 전압파형을 (d)에 나타내었다. (e)는 지령치(D/A output voltage)에 따른 인버터의 Phase-Shift된 전압파형을 보여준다.

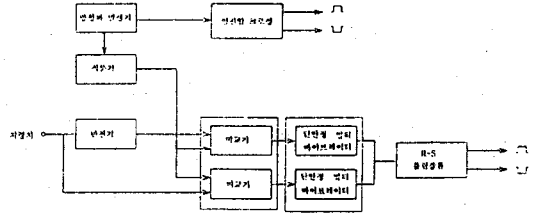


그림 4. Phase-Shift PWM Controller의 블록도

그림 4.는 제작된 Phase-shift PWM Controller의 블록도이다.

4. 실험 결과

본 실험에서 제작한 고주파 고압 변압기의 설계 사양은 표 1. 과 같다.

표 1. 고주파 고압 변압기의 설계 사양

구 조	Core size	1차 Turn수 및 권선규격	2차 Turn수 및 권선규격	누설 인덕 턴스 Lt(uH)
내철형	TDK UU (120x160x 20) 2조	8 AL sheet (0.21x40mm)	800 ($\phi 0.4$)	18

변압기의 유기기전력 e는

$$e = K \cdot f \cdot B \cdot A \cdot N (V)$$

K: 정수 f: 주파수 B: 자속밀도 A: 철심단면적 N: 권선의 권수

이므로 본 연구의 인버터 주파수가 25KHz이기 때문에 K, B, A가 일정하다면 상용주파수의 변압기와 비교해서 권선의 권수N이 약 1/400로 되기 때문에 전체적으로 크게 소형화할 수 있다.

그림 5.와 그림 6.은 인버터의 동작특성을 실험한 파형이고 그림 7.은 PID 제어기의 출력값인 D/A출력파형과 컨버터 최종 출력단의 고전압 직류 파형으로서 고압 변압기 2차측 출력 파형을 고압 다이오드를 통하여 얻어진다. 실제의 X선 발생장치에서는 X선관에 전력을 공급하기위해 고전압 케이블이 사용 되고 있다. 이 고전압 케이블 자체에는 250 pF/m 전후의 정전용 량이 있기 때문에 일반적인 X선장치의 케이블길이를 16m로 하 면 고전압 케이블 한 본당의 정전용량 Cc는

$$C_c = 250 \text{ pF/m} \cdot 16 \text{ m} = 4000 \text{ pF}$$

으로 된다. 다시 어스전위에 대해서 +측과 -측에 케이블을 접속하기위해 등가적인 X선관양단의 합성정전용량은 2000 pF로 된다. 그러나 본 실험에서는 이러한 등가 합성정전 용량을 추가로 고려하지 않고 실험 하였다.

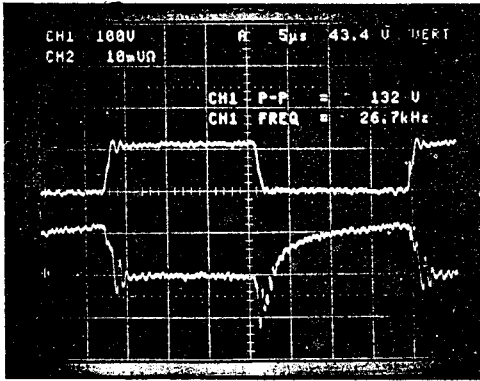


그림 5. IGBT E-C간 전압 전류 파형

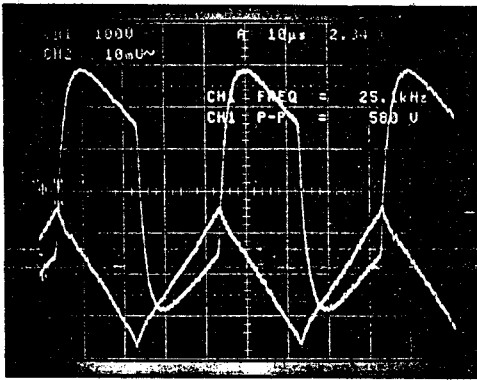


그림 6. 고압 변압기의 일차측 전압과 준공진형 인덕터 (La, Lb) 의 전류 파형

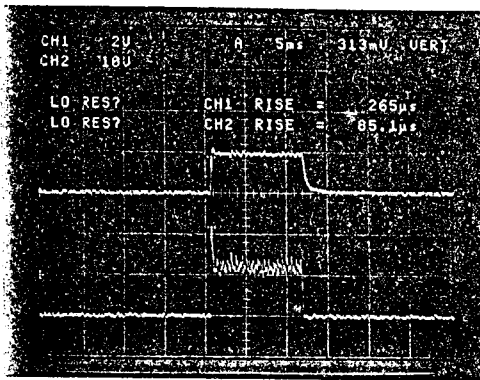


그림 7. 상: 컨버터 출력 전압 (20kV/Div)
하: D/A 출력파형 (10V/Div)

5. 결론

본 연구는 X-ray용 고주파 공진형 고전압 발생장치 개발을 주목적으로 하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고전압 발생장치 개발 적용 기술로서 반도체 스위칭 소자의 스트레스(dv/dt) 저감 및 장치 효율 상상을 위하여 영전압 스위칭(Zero-Voltage Switching)기법으로 IGBT를 스위칭 하였다.
2. 고주파 고전압 변압기를 설계 제작하였다.
3. 공진형 인버터를 채용한 고주파 고전압 발생 장치를 설계 제작하고 디지털 제어를 행한 실험결과를 살펴보았다.

향후에는 장치용량을 대형화하여 고전도, 고효율형 고압발생장치를 설계 제작하고 신뢰성 실험에 관한 연구를 지속적으로 수행하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Marian K.Kazmierczuk, 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.
- [2] Jun Takahashi, Hiroshi Takano, and Mutsuo Nakaoka, "A state of the art 50kW-10kHz Soft-switching Assisted PWM DC-DC Converter for X-Ray Power Generator", IEEE, Proc. of PCC-Yokohama pp.165-170, 1993.
- [3] 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'88 Record, pp.1212-1219, 1988.
- [4] S. Nagai and M. Nakaoka, "Phase-shifting PWM control-mode High-Frequency Inverter for Induction-Heating Applications", PCIM Conference Proceedings, Vol.1 pp.292-301, December, 1988.
- [5] H. takano, H. Uemura, "Advanced Constant-frequency PWM Resonant DC-DC Converter With Real Time Digital Control For X-Ray Power Generator", Proc. of EPE-Firenze, pp.544-549, 1991.
- [6] H.Hino, T.Hatakeyama and M.Nakaoka, "Resonant DC-DC Converter using Parasitic Impedances of High-Voltage Transformer", PCIM Conference Proceedings, Vol.1, pp.15-28, September, 1987.