

소프트 스위칭 방식을 이용한 X-Ray용 DC-DC Converter에 관한 연구

김학성^{**}, 김현준^{*}, 원충연^{*}, 유동욱^{**}, 하성운^{**}
 * 성균관 대학교, ** 한국 전기연구소

A Study on DC-DC Converter for X-Ray Using Soft-Switching Method

Kim Hackseong^{*}, Kim Hyenjoon^{*}, Won Chungyuen^{*}, Yoo Dongwook^{**}, Ha Sungwoon^{**}
 * Sungkyunkwan Univ., ** KERI

ABSTRACT

This paper is concerned with a zero-voltage soft-switching PWM DC-DC high-power converter using IGBTs, 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; 20kHz. This technique brings about dramatic decreases in the switching losses of power devices and their electrical stresses as compared with the commonly-used hard-switching PWM DC-DC power converter. The high-frequency switching operation of the converters has some effective advantages, which consist in the physical reduction in size and weight and lowered acoustic noise.

1. 서론

의료용 기기로서 X-Ray 발생 시스템에서는 X선을 방사하기 위하여 관전압이라고 불리는 20kV에서 150kV의 직류 고전압이 X선 관에 직접 인가되는데 이것은 X선 발생장치가 간헐적으로 변동하는 부하에 직류 고전압을 인가하기 위한 고전압 대출력(5kW-60kW)의 대용량 전원으로 사용되어진다는 것을 의미한다. 종래의 방식에서는 상용 주파수 변압기가 AC utility system으로부터 DC 고전압을 발생시키는데 주로 사용되어지므로써 X-Ray 전력 발생장치는 크고 무거우며 부하 변동시에 큰 소음과 출력전압의 제어 정밀도가 만족스럽지 못했다.

따라서 최근에는 발전된 전력변환 기술과 고주파 대전력용 소자를 채용하여 인버터의 주파수를 고주파화 함으로써 장치의 소형, 경량화를 실현시키며 부하변동시 안정된 DC 고전압을 발생시킬 수 있는 고주파 X-Ray 전력 발생장치의 이론적인 고찰 및 간이실험을 통하여 살펴보고자 한다.

본 논문에서는 소프트 스위칭 방식을 이용하여, 사용 반도체 소자(IGBT)의 스트레스 저감 및 효율 상승을 목적으로 하는 X-Ray용 고주파 고전압 발생장치에 대해서 소개하고자 한다.^{[1], [3]}

2. 새로운 X-Ray 전력발생 시스템

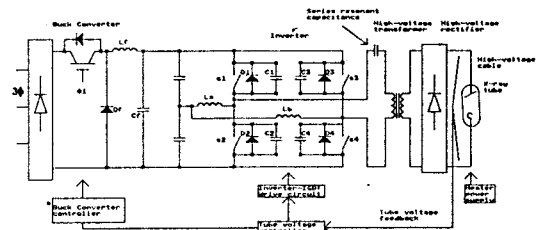


그림 1. X-Ray 전력발생 시스템

그림1은 제안된 X-Ray 전력 발생장치로서 DC-DC 컨버터 시스템을 나타내고있다. 이 컨버터 시스템은 크게 입력으로서 3상 상용 교류전원을 직류로 만들기 위한 정류부와 전파 브릿지 인버터의 입력 전원을 제어할 수 있는 Buck 컨버터부, 고주파 동작을 위한 직렬 공진형 고주파 인버터부, 승압을 위한 고주파 고압 변압기부와 고전압을 정류하여 X선관에 고전압 직류 전원을 인가하기 위한 고압 정류부 그리고 X선관의 애노드와 캐소드에 연결된 고전압 케이블부로 나눌 수 있다.

입력단의 Buck 컨버터는 출력단의 부하가 순간적으로 변동할때 일어나는 전압강하를 보상하는 부분이고 듀티비(Duty Ratio)에 의해 인버터의 입력 직류전압을 제어한다. 인버터부에서는 영전압 소프트 스위칭을 위하여 스위치와 병렬로 커패시터(C1-C4)를 연결하고 준공진 인덕터 L_a와 L_b를 삽입하였다. 여기서 커패시터는 접속 스위치의 턴-온과 턴-오프시 dv/dt를 감소시키기 위한 Voltage clamped 스너버이고 Litz Wire로 감은 인덕터 L_a와 L_b는 인버터의 전류(轉流) 모드가 이루어지는 동안 공진극에 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 PWM방식으로 고주파 인버터 내부에서도 조절할 수 있게 구성되어 있다. 또한 출력단의 고전압 케이블은 X-선관 전압 feeder로서 출력의 Smoothing 필터로서 사용되어진다.^{[1], [2]}

3. Phase-Shift PWM 제어

Phase-shift PWM 제어 기법은 그림 1에 나타난 직렬 공진 인버터의 출력을 조절하는 회로로서 인버터의 출력전압을 증감시킬 수 있는데, 그림2에서는 데드 타임(td)이 포함된 인버터 스위치를 온-오프 하는 게이팅 전압 신호와 그 순서를 보여준다.

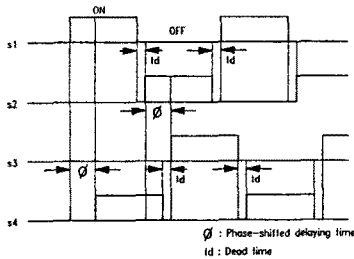


그림 2. Phase-shift PWM 제어

인버터 출력전압의 주파수를 결정하는 스위치 S1과 S2의 게이팅 전압 신호는 0.5의 듀티비를 갖는 기준 게이팅 신호가되며 S1과 S2의 게이팅 전압 신호에 대하여 S3와 S4의 게이팅 신호는 역시 0.5의 듀티비를 가지고 동기전이 되어진다. 따라서 S3와 S4의 Phase-shifted 지연시간 ϕ 는 0에서 $T/2$ 까지 가변되어지므로써 고정된 주파수 내에서 인버터의 출력전압을 제어할 수 있다. 또한 데드타임 t_d 는 lossless 커패시터 leg내의 영전압 스위칭 동작을 얻기 위하여 특별히 고려되어야 할 시간이다. [12], [13]

4. 고전압 변압기의 회로 모델

그림3은 고주파 고전압 변압기의 실제 동작회로를 나타내었다. 일반적으로 고전압 변압기의 동작회로는 자화 인덕턴스 성분 L_{Mx} 와 누설인덕턴스 성분 L_{11} 그리고 L_{22} 에 의하여 표현되어진다.

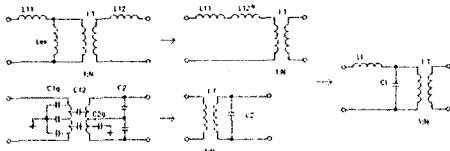


그림 3. 고주파 고전압 변압기의 동작회로 모델

여기에 고주파 고전압 변압기의 2차측 표유 커패시턴스 성분을 고려하여야 한다. 실제로 고주파 고전압 변압기의 자화인덕턴스 성분 L_{Mx} 는 일차측 권선에 병렬로 연결되어 있고 다른 인덕턴스 성분이 훨씬 크기 때문에 무시할 수 있을 정도로 작다. 그리고 누설 인덕턴스 성분 L_{11} 과 L_{12} 는 결과적으로 합성 누설 인덕턴스 성분 L_L 로 표현되어지고 이 때 합성 인덕턴스 성분 $L_L = L_{11} + N^2 L_{12}$ (권수비)로 된다. 표유 커패시턴스 성분은 다음과 같이 4가지 성분으로 분류할 수 있다.

- ① 1차측 권선과 코어 접지점과의 표유 커패시턴스 $\rightarrow C_{1g}$
- ② 1차측 권선과 2차측 권선과의 커패시턴스 $\rightarrow C_{12}$
- ③ 2차측 권선의 각 코일층 사이의 커패시턴스 $\rightarrow C_2$
- ④ 2차측 권선과 case 접지점과의 커패시턴스 $\rightarrow C_{2g}$

위에서 언급한 표유 커패시턴스 성분에서 C_{2g} 성분은 다른 성분보다 훨씬 작기 때문에 실제 무시할 수 있다. 그리고 C_{12} 와 C_{1g} 성분 또한 C_2 성분에 비해 무시할 수 있을 정도로 작고 고주파 고전압 트랜스포머에서 합성된 권선 커패시턴스 C_L 는 C_2 성분이 가장 크게 좌우하게 된다. 권선 커패시턴스 성분의 효과는 20kHz 또는 더욱 높은 주파수 범위에서도 측정 되어진다.

위에서 언급한 바와 같이 고주파 고전압 변압기는 합성 누설 인덕턴스 성분 L_L 와 합성 권선 표유 커패시턴스 성분 C_L 그리고 이상적인 변압기의 권선비 N 으로 나타낼 수 있다. [2], [5]

5. 컨버터의 동작 모드

그림 4는 Resonant pole을 갖는 전파 브릿지 인버터부 오른쪽 스위치단의 동작을 나타내고 있는데 회로의 반주기 동안의 동작 모드는 다음과 같이 4가지 단계로 나눌 수 있다.

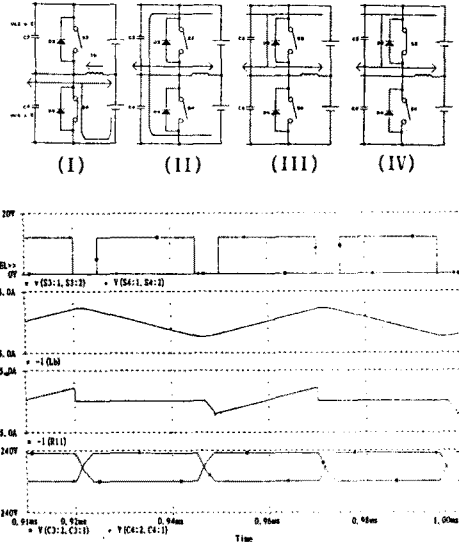


그림 4. Resonant pole을 이용한 soft-switching의 동작 원리와 각 구간의 파형

(I) 구간

S4가 도통되었을 때 전류는 준공진 인덕터 (L_b)를 통해 흐르면서 인덕터 전류 I_{Lb} 는 증가하게 된다.

(II) 구간

스위치 S4가 턴 - 오프 되었을 때 인덕터 전류는 커패시터 C3와 C4로 전류(轉流)하게 된다.

(III) 구간

스위치 S3에 접속된 역병렬 다이오드 D3에 인덕터 전류가 흐르면서 도통이 시작된다.

(IV) 구간

스위치 S3가 턴 - 온 되고 역병렬 다이오드가 도통하는 중에 S3는 손실없이 턴-오프될 수 있다. 왜냐하면 스위치에 걸리는 전압이 zero이기 때문이다. 이때 인덕턴스 전압의 극성은 바뀌게 되고 전류는 증가하게 된다.

스위치가 턴-오프될때 스니버 lossless 커패시터는 제한된 dv/dt 능력을 가지고 스위칭 소자의 순방향 전압을 낮게 할 수 있지만 lossless 커패시터브 snubber효과 때문에 영전압 스위칭 상태에서 각 스위치가 반드시 lossless 동작내에서만 턴-오프하지는 않는다. [11], [12]

6. 소프트 - 스위칭을 얻기 위한 조건

공진 전류(轉流)를 갖는 인버터의 스위칭 모드 동작을 위해서는 다음과 같은 두가지 요구조건이 만족되어야 한다.

첫째, 턴 - 오프시 커패시터의 방전에 필요한 에너지보다 인덕터에 축적된 에너지가 커야한다.

$$\frac{1}{2}L_b \cdot I^2 > \frac{1}{2}(C3+C4) \cdot E^2$$

둘째, 인덕터의 전류는 반드시 역병렬 다이오드가 아닌 스위치에 흘러야 한다. 만일 그렇지 않다면 공진 진동은 일어나지 않는다.^{[11],[12]}

7. 시뮬레이션 및 실험결과

Phase-shifted 지연시간 ϕ 에 대한 영전압 소프트 스위칭 컨버터 회로의 동작은 PSPICE를 이용하여 시뮬레이션 하였고 실험은 입력이 DC 100V와 200V일때 영전압 소프트 스위칭시 lossless 커패시터의 전압및 스위칭 소자인 IGBT의 전류, 준공진 인덕터 전류, 변압기의 출력 파형을 보였다.

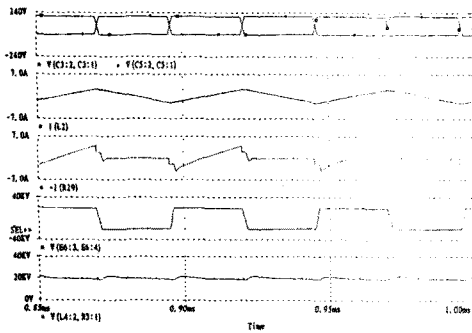


그림 5. 컨버터의 동작 파형 ($\phi = 0$)

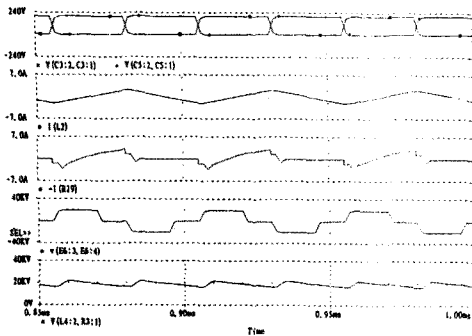


그림 6. 컨버터의 동작 파형 ($\phi = \pi/2$)

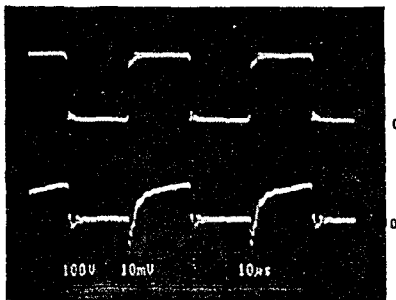


그림 7. lossless 커패시터의 전압 파형(상)(100V/div)
IGBT의 전류 파형(하)(20A/div) (입력:200Vdc)

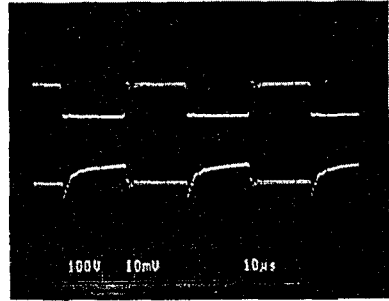


그림 8. lossless 커패시터의 전압 파형(상)(100V/div)
IGBT의 전류 파형(하)(20A/div) (입력:100Vdc)

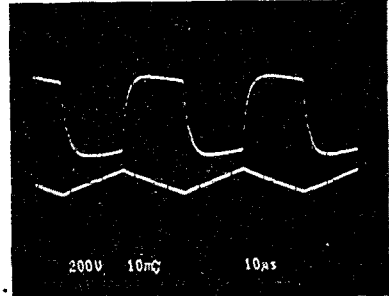


그림 9. 변압기 2차측 전압 파형(상)(200V/div)
준공진 인덕터의 전류 파형(하)(5A/div) (입력:100Vdc)

8. 결론

본 논문은 영전압 소프트 스위칭 Phase-shift PWM 방식을 이용하여 사용소자의 스트레스(dv/dt) 저감, 효율상승 및 출력 조절을 목적으로 하는 X-Ray용 고주파 발생 장치의 이론적인 고찰과 간이 실험결과를 살펴보았다.

향후 DSP를 이용한 디지털 제어기 설계, 최적 고압 변압기 설계 및 제작, 장치의 대용량화 및 신뢰성 시험등 관련 연구를 지속적으로 행하고자 한다.

9. 참고 문헌

- [1] Jun Takahashi, Hiroshi Takano, 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.
- [2] 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 Record, pp.1212-1219,1988.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.