

# X-ray 구동회로의 100kV 고전압 출력을 위한 ZVS Phase-shift Full-Bridge 인버터

강경수, 김세민, 김상연, 이정준, 노정욱  
국민대학교 전자공학과

## ZVS Phase-Shift Full-Bridge Inverter for 100kV High Voltage Output of X-ray driving Circuit

Kyung-soo Kang, Se-min Kim, Sang-yeon Kim, Jeong-jun Lee, Chung-wook Roh  
Dept. of Electronics Engineering, Kookmin Univ.

### ABSTRACT

기존 X-ray용 인버터의 경우, 일반적인 Full-bridge 인버터를 사용하여 낮은 효율이 발생하기 때문에 1.6kW 이상의 고전압 출력을 요구하는 X-ray를 사용할 수 없는 문제점이 있다. 본 논문은 X-ray 구동용 인버터의 높은 출력이 가능한 고전압 출력용 ZVS Phase-Shift Full Bridge 인버터를 제안한다. 기존의 X-ray 구동용 인버터를 사용할 경우에는 낮은 효율 및 높은 출력 전압을 발생 시킬 수 없기 때문에 X-ray 발생이 어려우며, 높은 출력을 발생시키기 위해서는 회로의 전체적인 부피가 커지고 제작단가가 증가하는 단점이 있다. 반면 제안된 회로는 X-ray 구동용 ZVS Phase-Shift Full Bridge 인버터로써, 영전압 스위칭을 통해 높은 효율로 인버터 구동이 가능하고, 높은 출력 전압을 발생 시킬 수 있기 때문에 회로의 소형화 및 고출력 X-ray 발생이 가능한 장점을 갖는다. 본 논문에서는 제안된 회로의 이론적인 특성을 분석하고 모의실험을 통해 확인하였으며, 1.6kW급 X-ray 구동 인버터 회로에 적용하여 실험을 통해 우수성을 검증하였다.

### 1. 서론

최근 의료기술이 발달함에 따라 의료기기의 성능도 발전되고 있고, 고효율 의료기기의 사용이 증가하는 추세이다. 특히 의료기기의 하나인 X-ray에서는 수kW 이상의 인버터를 구동하여 X-ray를 조사하고 있는 것이 일반적이다. 또한 X-ray 발생을 위해서는 수만kV~수십만kV 이상의 전압이 필요하기 때문에 고압 트랜스 및 배압 회로를 사용하고 있는 추세이다. 최근 X-ray에서는 Full-Bridge를 사용한 인버터가 주로 사용되고 있다. 하지만 일반적인 Full-Bridge 인버터는 스위칭 손실이 많기 때문에 높은 출력의 X-ray를 발생 시킬 수 없으며, 높은 X-ray 조사를 위해서는 회로의 대형화 및 원가가 상승하는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 스위칭 손실을 최소화하여 고전압 발생이 용이하고 고출력 X-ray 조사가 가능한 X-ray 구동용 ZVS Phase-Shift Full Bridge 인버터를 제안한다.

### 2. 제안된 ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터

그림 1은 제안된 ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터 회로이다. 제안된 회로는 4개의 IGBT, 1개의 고압 트랜스포머, 1개의 공진 인덕터, 1개의 공진 커패시터, Voltage Multiplier 회로로 구성되어 있으며 Voltage Multiplier 회로를 통해 승압된 전압을 이용하여 X-ray를 발생시킨다. 아울러 제안된 인버터는 Phase-Shift 기법을 이용하여 낮은 부하에서도 영전압 스위칭

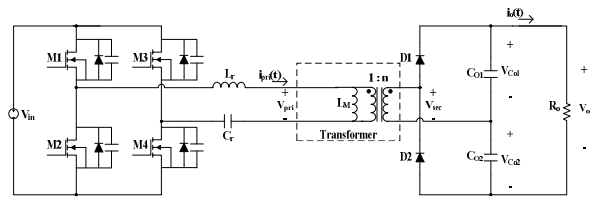


그림 1 제안된 ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터 회로  
Fig. 1 Proposed ZVS Phase-Shift Full-Bridge Inverter Circuit

(Zero Voltage Switching)이 가능하여 높은 효율로 인버터 구동이 가능하고 시스템의 소형화 및 저가형 구현에 유리한 장점이 있다.

### 2.1 제안된 ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터의 동작 원리

그림 2는 스위치 상태에 따른 전류 동통 경로를 보이고 있다. 각 모드별 등가회로 동작은 다음과 같다. 그림 2(a)는 스위치 M1, M4가 도통되고 M2, M3가 차단되는 경우이다. 이때는 Powering 구간으로 다이오드 D1이 도통되어 출력 커패시터 C01을 충전하게 된다. 그림 2(b)는 스위치 M4만 도통되는 구간으로 M1, M2의 ZVS 구간이다. 그림 2(c)는 스위치 M2, M4는 도통되고 M1, M3가 차단되는 구간이다. 이때 1차측에 있는 에너지가 2차측의 다이오드 D1을 통해 출력 커패시터 C01이 충전되는 구간이다. 그림 2(d)는 스위치 M2, M4는 도통되고 M1, M3가 차단되는 구간이며 출력 다이오드 D1, D2가 모두 차단되어 출력 커패시터가 방전하는 구간이다. 그림 2(e)는 스위치 M2만 도통되는 구간으로 M3, M4의 ZVS 구간이다. 그림 3은 제안된 회로의 주요 동작 파형이다.

### 2.2 제안된 ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터의 Gain 관계식

$$M = \sqrt{\frac{R_n f_n}{\pi} \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi D}{f_n}\right) \right)} \quad (1)$$

$$M = \frac{V_o}{V_{IN}}, f_n = \frac{f_{sw}}{f_r}, R_n = \frac{R_L}{Z}, Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2)$$

식 1은 제안된 ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터의 입출력 관계식이다. 제안회로의 게인 M은 부하 RL이 증가할수록, fn이 높을수록, D가 낮을수록 감소하는 특징을 가지고 있다.

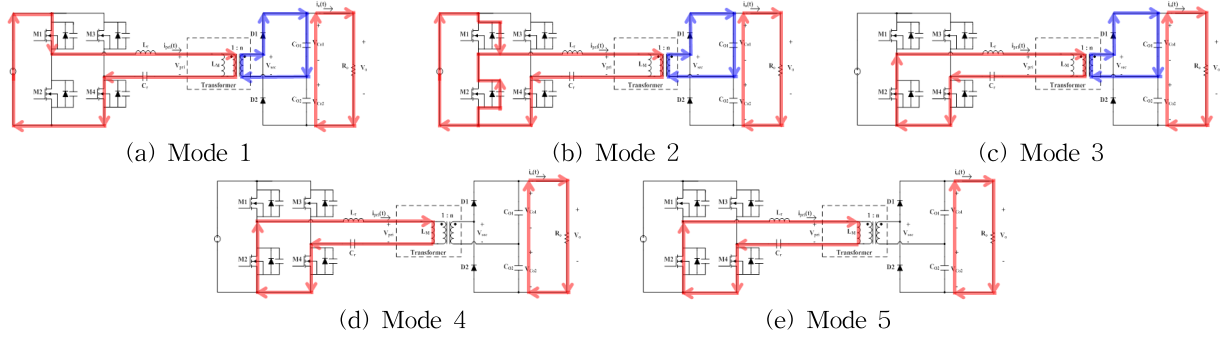


그림 2 스위치 상태에 따른 도통 경로

Fig. 2 Conductive path according to switch status

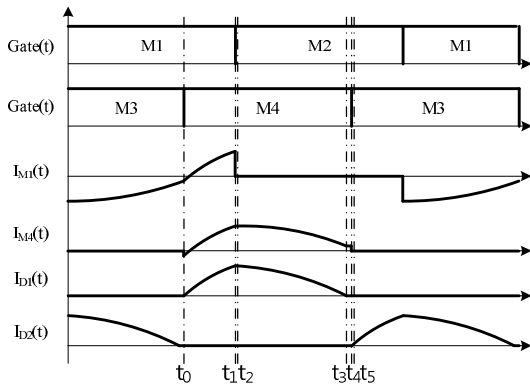
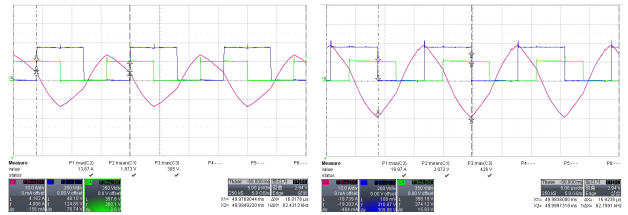


그림 3 스위치 상태에 따른 주요 동작 파형

Fig. 3 Main operation waveform to switch status



(a) 800W X-ray 조사 시 주요파형 (b) 1.6kW X-ray 조사 시 주요파형

그림 4 X-ray 부하에 따른 주요 전압 전류 파형

Fig. 4 Main voltage and current wavforms to the type of X-ray load

### 2.3 제안된 ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터의 실험결과

ZVS Phase-Shift Full-Bridge 인버터의 타당성 및 우수성을 위해 1.6kW X-ray 구동용 인버터 회로를 위한 시작품을 제작하여 다음과 같은 실험결과를 제시한다. 설계를 위한 입출력 사양과 실험에 사용된 주요 파라미터는 다음과 같다.

- 입력 전압 : 380V<sub>dc</sub>
- 최대 출력 전력 : 1.6kW
- 인버터 스위칭 주파수 : 68kHz
- IGBT : GT50J325(600V/50A)
- 공진 인덕터  $L_r$  : 100 $\mu$ H / 공진 커패시터  $C_r$  : 470nF

그림 4는 X-ray 부하 따른 주요 전압 전류 파형이다. 그림 4(a)는 제안된 회로의 800W(80kV/10mA) X-ray 조사시 M1, M4 스위치 양단전압, 인버터 출력 전류 파형이다. 그림 4(b)는 제안된 회로의 1.6kW(100kV/16mA) X-ray 조사시 M1, M4 스위치 양단전압, 인버터 출력 전류 파형이다. 스위치 M1, M4의 양단전압과 인버터 출력 전류는 앞서 제시한 이론적 분석과 동일함을 확인하였다. X-ray 발생기 연동 시 X-ray 조사 특성에 따른 부하 변동이 발생하지만 X-ray는 우수하게 발생함을 확인하였다. 또한 넓은 부하 범위에서 스위치 4개 모두 영전압 스위칭이 가능하여 기존 회로 대비 5.4% 이상의 효율을 향상시켜 제안회로의 우수함을 실험을 통해 검증하였다. 따라서 위의 실험 결과를 통해 제안된 회로는 높은 효율을 통해 X-ray 구동용 인버터 회로의 소형화 및 저가형 구현이 가능함을 확인하였으며, X-ray 뿐만 아니라 고전력, 고전압을 요구하는 의료 기기, 백색가전 등 다양한 분야에서도 적합할 것으로 예상된다.

### 3. 결론

기존의 X-ray용 인버터의 경우 일반적인 Full-bridge 인버터 회로를 사용하고 X-ray 조사 부하에 따라 PWM 제어를 통한 Hard switching 동작을 하였기 때문에 높은 스위칭 손실이 발생하여 고전압 출력을 요구하는 X-ray를 사용할 수 없었다. 또한 고전압 출력을 위해서는 회로의 부피가 증가하고 제작단가가 증가하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 스위칭 손실을 최소화 하여 고전압 발생이 용이하고 고효율 X-ray 조사가 가능한 X-ray 구동회로의 100kV 고전압 출력을 위한 ZVS Phase-shift Full-Bridge 인버터를 제안하였다. 제안회로의 타당성 검증을 위하여 모의실험을 수행하여 이론적 검증을 하였으며, 1.6kW급 X-ray 구동용 인버터 회로를 위한 시작품을 제작하여 X-ray와 연계 실험을 수행 하였다. 실험결과 제안된 회로는 넓은 부하조건에서 모든 스위치의 영전압 스위칭을 통해 높은 효율로 동작하여 회로의 소형화 및 집적화가 가능하였다. 또한 X-ray 조사의 다양한 조건에서도 일정한 출력전압과 X-ray가 발생하여 회로의 우수함을 확인하였다. 최종적으로 제안된 회로는 고전압 고효율을 요구하는 X-ray 구동용 인버터 회로에 매우 적합할 뿐만 아니라 고전력, 고전압을 요구하는 의료기기, 백색가전 등 다양한 분야에서도 적합할 것으로 기대된다.

본 연구는 바텍(주)의 연구비 지원으로 수행되었음

### 참고 문헌

[1] Shahid Iqbal, Rosli Besar and C. Venkataseshaiiah "A Novel Control Scheme for Voltage Multiplier based X-ray Power Supply", Power and Energy Conference 2008, IEEE 2nd International, pp. 1456-1460, Dec. 2008.  
 [2] 이성길, 박수강, 이강연, 조금배, 백형래, 임병욱 "인버터식 X선 발생장치용 고압변압기의 특성개선에 관한 연구", 전력전자학회, 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 77~80.