

임펄스 Generator용 고주파 고압 전원장치 개발

신병철, 송두익, 정창용, 유동욱
한국전기연구소

The Evolution of High Frequency and High Voltage Source Equipment for Impulse Generator

Shin Byoung-Chol, Song Doo-Ik, Jeong Chang-Yong, Yoo Dong-Wook
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

본 논문은 다양한 분야에 적용이 가능한 고압 직류 전 원장치를 개발에 관한 것이다. 개발된 이 장치는 soft switching 기술을 이용하여 인버터의 전력소자가 switching 때문에 발생하는 손실과 EMI를 감소시키기 위하여 영전압 스위칭(ZVS; Zero Voltage Switching) 방식을 채택하였다. 이러한 고주파 인버터의 구동방식은 단일 Chip 제어기로 쉽게 구현할 수 있는 영전압 스위칭 위상전이 제어 직렬 공진형(ZVS PSC-SRI; ZVS Phase Shifted Control Series Resonant Inverter)으로 선택하여 제어기의 신뢰도를 높였고 장치의 고효율화(90%이상) 확보와 장치의 소형화뿐만 아니라 실용화를 위한 저가격화를 절충할 수 있는 방법을 중점적으로 연구하였다. 본 논문에서 고주파 고압 직류 전원 장치의 구성 및 설계, ZVS PSC-SR 인버터의 설계 그리고 고주파 고압 변압기의 설계에 관한 내용을 자세히 설명하고 제작된 고주파 고압 전원장치의 실험결과 및 고찰을 기술한다.

1. 서론

고압 전원 장치는 근래에 와서 산업전반에 응용이 매우 광범위하게 확산되고있고 이 장치가 필수적으로 이용되어야하는 분야가 증가하고있다. 응용분야로는 신소재 개발과 플라즈마응용을 위한 공업용과 민생용, 의료기기용에 이르기까지 다양하게 있다. 공업용응용 분야는 금속 및 유리 증착용 Ion 주입장치와 전자선주입장치, Magnetron 구동장치, 공업용 Laser등과 민생용은 수질오염 방지용 Ozonizer, 유기물 조기발아 및 저장장치, 고압 방전등 안정기, CRT 테스트용 전원장치, 집진기와 의료기기용은 X-ray, 수술용 Laser, 살균처리기등 다양하게 있다. 또 펄스장치에 전류를 공급할 시에는 capacitor bank 충전용 전원 장치로도 사용된다. 최근 전력전자기술은 고속스위칭반도체소자가 개발, 보급이 확산됨에 따라 전력변환장치의 고주파화가 급격히 진행되어 왔다. 이런 고주파화 기술이 고압 전원 장치에도 응용되어 고압전원장치의 정교한 제어가 가능해졌고 저리플화 특성을 갖출 수 있게 되었고, 특히 장치의 소형, 경량화가 가능해졌다.

2. 고주파 고압 직류 전원 장치

본 논문에서 제안하고 제작한 고압 직류 전원장치의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 본 장치는 3상 380V를 입력전원으로 사용하고 3상 풀 브리지(Full-Bridge)방법으로 정류하여 DC전압을 얻고 돌입전류를 방지하기 위한 인덕터를 통하여 DC-link 커패시터로 연결되도록 하였다. 전체 커패시터 값은 $4700\mu\text{F}$ 이고 동작전압이 900V가 되도록 $4700\mu\text{F}/450\text{V}$ 의 커패시터를 직, 병렬로 연결하여 구성하였다. 고주파인버터의 구성은 단상 풀 브리지로 구성하였고, 후단에는 공진을 위한 LC가 삽입되어 있어 변압기의 기생성분과 함께 인버터가 직렬 공진 형태로 동작하도록 하였고 그로 인해 인버터의 각각의 스위치들이 ZVS로 동작하도록 하였다. 고압변압기출력은 전압배방식을 사용하여 다시 승압하고 각 부분의 출력을 결합하여 전체출력이 발생하도록 하여 단일 변압기를 사용하는 방식보다 변압기의 승압비율을 낮게 하여 고압변압기부하 안정하게 동작하도록 하였고 뿐만 아니라 안정성이 향상되도록 하였다. 그리고 제어기가 출력전압을 제어하기 위하여 전압을 센싱하여야 하는데 본 장치에서는 CR 분압기를 사용하여 10,000:1로 강압을 시키고 제어기에 전압-피드백 값이 되도록 하였다.

3. ZVS PSC-SR 인버터

(Zero Voltage Switching Phase Shift Control Series Resonant)

3.1 영전압 스위칭

인버터 소자가 ON-OFF 될 때 인버터 소자인 IGBT 양단에 표유용량이 발생하게 되고, 컬렉터 단자와 고압 변압기 1 차측 입력단 사이에 누설 인덕턴스가 발생한다. 인버터가 ON 상태에서 OFF 상태로 스위칭 될 때 누설 인덕턴스에 의해 전류 성분이 잔류하며, 아울러 컬렉터-이미터 단자 사이에 발생되는 표유용량으로 인해 전압이 발생된다. 이때 전류 성분과 전압 성분이 교차함으로 인해 전력 손실이 발생되며, 발생된 전력 손실은 그대로 소자에서 열로 소실된다. 이와 같은 방법으로는 고주파 고압 변압기의 효율을 높이는 것이 매우 어렵다.

앞서 언급한 방법이 hard switching 방식이며, 이러한 방

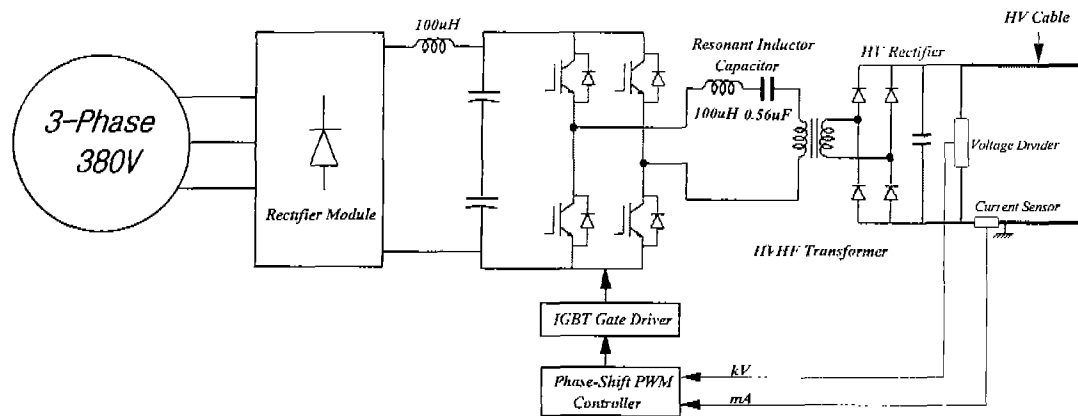


그림 1 고압 직류전원장치 구성도

법과는 달리 오히려 표유용량 성분과 누설 인덕턴스 성분을 사용함으로써 고주파 고압 변압기의 효율을 90% 이상 높일 수 있을 뿐만 아니라, 소자의 사용 효율도 높일 수 있다. 이때 전류 성분과 전압 성분이 교차되지 않기 때문에 전력 손실이 거의 발생되지 않는다. 이러한 스위칭 방식을 soft switching 이라 한다.

3.2 ZVS Phase-Shift Control

본 본문에서 제작한 고정도 범용 고압발생 장치용 인버터는 위상전이 PWM 방식으로서 영전압 소프트 스위칭을 하며 위상 전이가각 ϕ 를 조절함으로써 부하에 인가되는 고압 출력을 제어한다.

그림 1의 위상전이 PWM 단상 전파 브리지 인버터의 좌측 스위치 Q1 과 Q4 를 기준 스위치단으로 하고 우측 스위치 Q2 와 Q3 를 제어 스위치단이라고 하면 인버터의 주파수를 결정하는 스위치 Q1 과 Q4 의 게이트 전압 신호는 0.5 의 시비율을 갖는 표준 게이트 신호가 되며 Q1 과 Q4 의 게이트 전압 신호에 대하여 동기된 Q2 와 Q3 의 게이트 신호 역시 0.5 의 시비율로 위상전이 되어진다.

Q2 와 Q3 의 위상전이각 ψ 는 인버터 동작 주파수의 반주기인 0° 에서 180° 까지 가변되므로 고정된 인버터 주파수를 가지고 출력 전압을 제어할 수 있다.

따라서 부하변동에 따른 전압 보상은 ZVS 위상전이 PWM 인버터의 출력이 위상전이각 제어 범위 $0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ 사이에서 연속적으로 가변됨으로서 고전압이 조절되어 보상된다.

4. 고압부의 설계 및 구성

4.1 고주파 고압 변압기

일반적으로 수 μs 이하의 펄스를 발생시키기 위해서 펄스 변압기를 사용하는 방법과 콘덴서 뱅크를 사용하는 방법이 있다. 짧은 시간동안 콘덴서에 고전압을 인가하여 콘덴서에 전하를 축적한 후 축적된 전하를 순간 방전시키면 매우 높은 전류를 얻을 수 있다. 이때

매우 높은 전류가 순간 방출을 하므로 펄스전자석의 주 전원으로 응용이 가능하다. 이와 같이 콘덴서 뱅크를 형성하는 개별 콘덴서를 충전시키기 위해 고압 발생장치가 사용될 수 있다. 그러나 변압기를 사용해서 고압을 직접 얻을 수 있으나, 이 경우 권선수의 증가에 따른 추가적인 요인이 발생하여 목적에 알맞은 정도의 고압변압기를 직접 제작하는 방법에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 고압변압기를 사용하여 적정 수준의 전압으로 승압한 다음 배압회로를 구성하여 필요한 만큼의 고전압을 얻는 방법이 바람직하다.

콘덴서 뱅크에 있는 콘덴서를 급속 충전하기 위해서는 고압 발생이 필수적인데 여기에는 권선 비가 큰 변압기를 사용하게 되며 특히 고주파 조건에서 동작하는 고압 발생기에 사용하는 변압기를 고주파 고압(High-Frequency High-Voltage ; HFHV) 변압기 또는 주변압기라고 한다. 일반적으로 변압기가 무부하의 경우 근사적으로 다음 식이 성립한다.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

여기서, V_1 : 고압변압기의 1차측 전압, V_2 : 고압변압기의 2차측 전압, n_1 : 1차측 권선수, n_2 : 2차측 권선수

따라서 2차측 전압은 식 (2)와 같이 1차측 전압에 비례하게 된다.

$$V_2 = V_1 \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

콘덴서 뱅크 충전용 고압 변압기의 권선비 n 은 보통 수백 이상의 값을 가지며 또한, 고주파 고압변압기의 정격은 수 초 이내의 단시간 동안의 사용이 일반적이므로 일반 배전용 변압기에 비해 임피던스가 크고, 2차 전류에 의하여 2 차측 고전압이 상당히 변화한다.

고주파 고압 변압기의 등가회로를 작성할 때 고압 변압기의 표유용량 성분을 고려하여야 하는데 이는 일반적으로 고압변압기가 각 권선 층과 여러 요소들이 절연되도 절연유로 다른 요소와 절연되어 있기 때문이다.

그림 2는 본 논문에서 제작한 고주파 고압변압기의 등가회로이다. 고압변압기의 1차측과 2차측 단자가 서로 연결되었을 때의 기생성분인 표유용량, 누설자속 등을 포함하는 회로를 나타낸다.

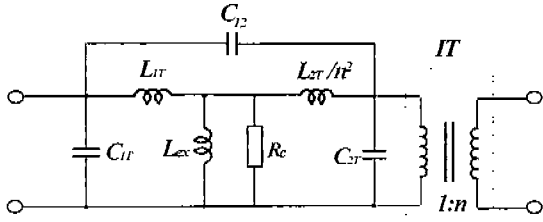


그림 2 변압기의 등가회로

L_{1T} : 1차측 누설 인덕턴스, L_{2T}/n^2 : 1차측으로 환산한 2차측 누설 인덕턴스, L_{ex} : 여자 인덕턴스 성분,

C_{1T} , C_{2T} : 표유 커패시턴스, R_c : 코어 손실,

IT : 이상적인 변압기

누설 인덕턴스와 표유 커패시턴스 용량을 적절히 선정하지 않으면 고압 출력 특성에 영향을 주게되어 출력전압이 제대로 나오지 않는다. 또 1차측 권수를 정하기 위하여 1차측 전압강하율을 5%로 감안하여 설계하는 수식은 식(3)과 같다.

$$n_1 = \frac{(V_1 - 0.05 V_1)}{4.44 f B_s S_c} \times 10^8 \quad (3)$$

여기서,

B_s : 포화 자속밀도(Gauss), S_c : 코어 단면적(cm^2)

$$S_c \cong c_o \sqrt{\frac{P a 10^6}{f B_s d}} \quad [cm^2]$$

여기서, c_o : 계수, P : 전력(W), a : 코어의 질량/권선의 질량, d : 전류밀도 (A/mm^2)

또 2차측의 권수를 정하기 위하여 전압강하율을 1차측 설계와 동일한 방법으로 선정하였다.

4.2 출력전압 검출회로

CR분압기의 등가화된 개념도는 그림 3이고 이 분압기의 전달함수 식은 식 (4)이다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 가 되도록 각각의 저항값과 커패시터 값을 정하면 주파수에 독립적인 식 (5)가 된다. 이런 방법으로 출력을 센싱하면 다양한 주파수의 리플도 제어가 가능할 뿐만 아니라 전원장치의 과도응답특성을 향상시킬 수 있다. 또 빠른 충전제어가 가능하도록 제어기를 구성할 수 있어 전원장치의

성능을 향상시킬 수 있었다.

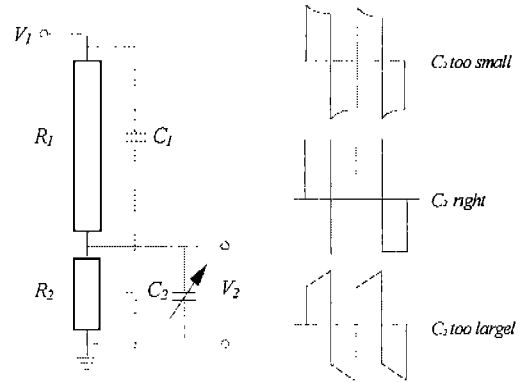


그림 3 분압기 개념도

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

전류를 제한하는 기능이 본 장치에 부과되어야하므로 이것을 구현하기 위하여 출력전류를 센싱해야 하는데 저항을 출력케이블에 직렬로 삽입하여 출력전류를 검출할 수 있도록 하였다. 실제 구성도는 그림 4와 같다.

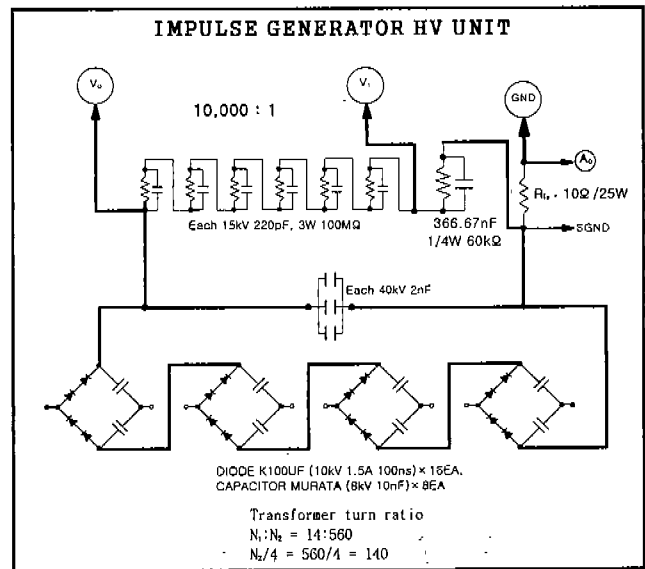


그림 4 고압정류부와 CR분압기, 전류센싱부

5. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제작된 장치로 저항부하뿐 만 아니라 커패시터충전, 수저항부하등의 다양한 부하에서 성능을 평가하였다. 또 본 장치의 신뢰성과 안정성을 시험하기 위하여 2kΩ을 저항을 사용하여 순간 단락시험을 하였다. 본 논문에서는 지면관계 상 360kΩ의 저항부하에서의 실험결과만을 포함하고 있다. 그림 5는 출력전압이 28.5kV일 경우 360kΩ의 저항부하연결 시에 인버터전압의 듀티가 50%가 되도록 입력전압을 조정하여 ZVS가 원활히 일어나도록 공진 인덕터와 커패시터값을 정했음을 보여준다. 이때 인덕터는 110μH이고 커패시터는 0.56μF이다.

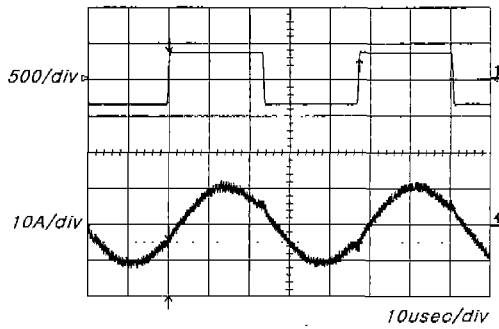
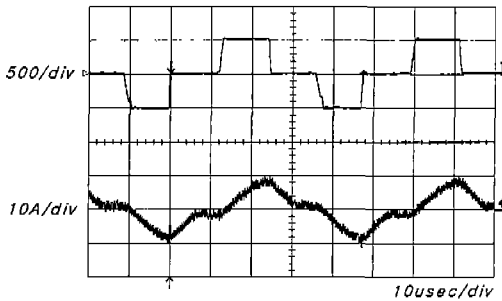
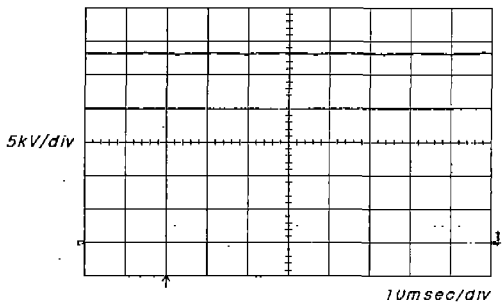


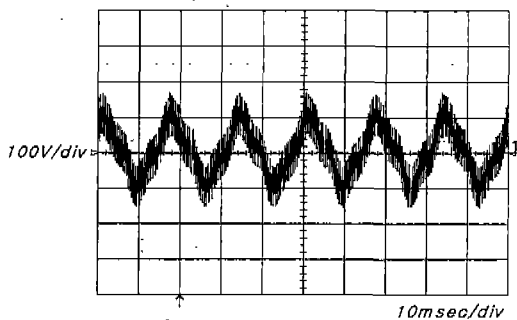
그림 5 인버터 전압 전류



(a) 인버터 출력전압과 전류



(b) 출력전압



(c) 출력전압리플

그림 6 28.5kV 출력, 부하 360k Ω 연결시 시스템 상태

그림 6은 출력전압이 28.5kV이고 부하가 360k Ω 이 연결되었을 때 시스템의 상태를 나타내는 파형이다. 그림 6(a)는 입력전압이 380V일 때 출력전압을 제어할 경우에 인버터 출력전압과 출력전류로써 전류가 작기 때문에 정현파가 되지 않는다. 그림 6(b)는 28.5kV의 출력전압이고 그림 6(c)는 이

때 출력에 나타나는 리플이다. 이 리플전압은 0.8%로써 본 장치의 리플사항인 1%를 만족하는 양호한 출력전압을 얻었다.

6. 결론

본 논문은 장치의 소음이 발생하지 않아야 하고 또한 장치의 소형화를 요구하므로 이를 실현하기 위하여 공진형 고압 발생장치의 구동 주파수를 고주파 영역으로 확대하고 안정된 직류 고전압을 발생시키는 고주파 고압 직류 전원 장치를 개발할 목적으로 연구되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 직렬 공진형 인버터를 phase shifted PWM 방식으로 영전압 소프트 스위칭함으로써 전력용 반도체 소자의 스위칭 효율을 향상시켰다.
- 고압 발생기는 고압 변압기의 누설인덕턴스 성분을 이용하여 공진 회로를 구성한 후 고주파수 조건에서 인버터를 구동시킴으로써 장치의 소형 경량화를 도모하였고 전력밀도를 높이고, 노이즈를 감소시키고 또한 빠른 과도응답 특성을 갖도록 하였다.
- 고전압의 정확한 검출을 위한 분압 장치로서 응답 특성이 빠른 CR 형 분압기를 채택하였다.
- 출력전압에 체배회로를 사용하여 효과적으로 전압을 승압시킬 수 있도록 하였다.
- 단일칩형태의 제어기를 사용하여 10kV~36kV로 가변할 수 있도록 하였다.
- 전류제한회로를 부가하여 다양한 부하에 응용이 가능하도록 하였다.

본 논문에서 연구 개발된 고압 발생장치는 순간적인 펄스 전류를 필요로 하는 capacitor bank에 포함된 콘덴서를 짧은 시간 안에 충전할 수 있는 capacitor bank 충전용 전원 장치로 응용 가능하다고 사료된다.

Reference

1. Htakano, HUemura, "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
2. Daniel MMitchell, DC-DC Switching Regulator Analysis, McGraw-Hill Inc., 1988
3. DNDivan and G. Skibinski, "Zero Switching Loss Inverter for High Power Applications," IEEE-RAS, CH 2499-2, pp.627-633, 1987
4. Yoshihilo Murai, and Thomas ALipo, "High-Frequency Series-Resonant dc Link Power Conversion", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 28, No.6, pp.1277-1284, 1992