

진행파관(TWT) 구동용 고밀도 고전압 전원공급기 개발

박영주, 이규송, 류시찬
국방과학연구소 전자전 체계부

Development of High Density High Voltage Power Supply for Traveling Wave Tubes

Y.J. Park, K.S. Lee, and S.C. Lyu

Agency for Defence Development, Electronic Warfare Systems Department

ABSTRACT

In this paper describes the development testing results of high density High Voltage Power Supply(HVPS) that employ microwave TWTs. The HVPS consist of number of modules connected in series. A new design that adapt resonant circuit and high density pulse transformer to the high voltage modules makes the HVPS much more reliable. Also High voltage Solid-State modulation using fast switching devices(FET's) and the test results of modulator modules development are represented.

1. 서 론

전자전(EW) 환경에서 다수의 위협신호 각각에 대해 재밍(Jamming)을 구현하기 위해서는 전자전 장비의 송신기(Transmitter)가 위상배열(Phased Array)송신 방식을 이용한 즉, 전자적으로 빔을 실시간으로 제어하는 구조를 가진다. 위상배열송신기에서는 다수의 빔을 공간 합성하여 전자빔을 형성하고 유효방사출력(ERP)을 높이는 장점이 있는데, 개별적인 전자빔을 생성하는 것은 전자파 발전기로서 진행파관(Traveling Wave Tube : TWT)이 많이 사용되고 있다. 진행파관을 구동하기 위해서는 안정적인 직류 고전압(-4kV)이 필수적이며 특히 위상배열방식의 송신에서는 전원공급기의 출력특성이 좋지 않을 경우 위상특성이 불안정하게 되어 원하는 방향으로의 재밍이 불가능하게 된다.^[1]

한편 항공용으로 고전압 전원공급기가 적용되기 위해서는 손실부분을 최소화하고 적은 부피로 높은 출력을 내야하는데, 이를 위해 본 논문에서는 전력 변환부에 ZCS(Zero Current Switching) 공진회로를 적용한 내용과 높은 효율의 고밀도 펄스변압기

개발에 대해 중점적으로 논의한다.

또한 변조(Modulator)방식의 진행파관은 빔을 사용하지 않을 경우 캐소드(Cathode) 전압에 Off-Bias 전압(-1kV)을 인가하여 전자빔을 제어하는데 빠른 On/Off 시간이 필요하고, 진행파관 내부의 아킹(Arcing)으로 인한 전원공급기 보호나 부분 송신이 가능할 수 있도록 응답특성이 우수한 고전압 차단 스위치를 포함해야한다.^[2]

위 사항들을 기반으로 본 논문에서는 고밀도의 고전압발생부와 반도체 소자를 이용하여 고전압 빔을 제어하는 모듈레이터, 그리고 고전압 차단 스위치를 내장하는 항공용(Airborne) 고전압전원공급기(High Voltage Power Supply) 설계/제작에 대해 논의한다.

2. 본 론

2.1 진행파관 특성

진행파관은 RF신호를 입력받아 수십만 배 증폭하여 출력하는 초고주파 증폭소자(Amplifier)로서 넓은 대역폭을 가지고 있어 레이더나 전자전분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 진행파관을 구동하기 위해서는 캐소드(Cathode), 콜렉터(Collector), 히터(Heater) 그리고 FE(Focus Electrode)에 적절한 전압을 제공해 주는 고전압 전원공급기가 필요하다.

특히 서론에서도 언급했듯이 아래 식(2)와 같이 고전압의 흔들림으로 인해 진행파관의 위상이 틀어지고 위상배열송신기에서는 조향능력을 상실하게 되는 단점을 가짐으로써 고전압전원공급기의 출력전압을 엄격하게 규제해야 한다.

예를 들어 전원공급기의 캐소드 전압이 변하게 되면, 진행파관 전자빔의 속도는 아래의 식 (1)과 같이 변하게 된다.

$$u = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (1)$$

여기서 e 는 electron charge, V 는 캐소드 전압, m 은 electron mass이다.

결과적으로 진행파관의 전기적인 위상 길이는 전자빔과 RF의 커플링에 의해 가변 되는데 캐소드의 위상 Sensitivity는 다음 식과 같다.

$$d\theta/\theta = \frac{1}{3} dv/v \quad (2)$$

여기서, θ 는 진행파관의 위상길이이고 일반적으로 파장의 약 15배 정도나 그 이상이 되며 진행파관의 이득에 좌우된다. 위의 식으로부터 Phase Pushing Factor를 실제 적용되는 진행파관에 대입해보면 주파수별로 0.9~2.7[°/V]가 된다.

2.2 고압발생부 설계

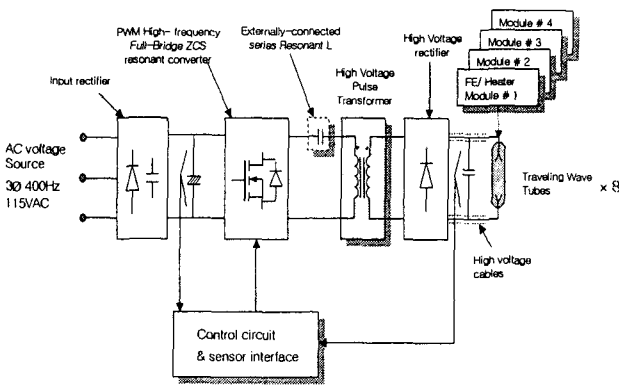


그림 1. 고전압전원공급기 구성도
Fig. 1 The configuration of HVPS with TWT's

앞 절에서 논의한 바와 같이 위상배열 송신기용 진행파관을 구동하기 위해서는 출력 고전압 리플을 엄격히 규제해야하는데, 여기서 리플이란 스파이크성 노이즈도 포함이 되는 것으로 스위칭 노이즈를 설계 단계부터 감소해야하는 과제가 있다. 또한 항공용으로 전원공급기를 적용하기 위해서는 적은 부피로 높은 출력을 생성하는 고밀도, 고효율의 고전압전원공급기를 개발해야한다. 위 사항을 설계에 반영하여 이어지는 절에서 중점적으로 논의한다.

위 그림 1.에서 도시한 것처럼 개발된 고전압전원공급기는 기능별로 모듈화되어 있는데 세부적인 동작특성을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 외부에서 입력되는 3상 400Hz 115VAC 전원을 입력정류모듈에서 1차 정류하여 265VDC Bus전압을 생성하고 발생된 Bus전압은 Full-Bridge ZCS 컨버터가 내장된 전력변환모듈에서 100 kHz 스위칭 되어 펄스 형태로 고밀도 펄스변압기 1차 측 전압으로 인가된다. 펄스변압기 2차 측 전압은 고압정류다이오드와 커패시터를 거쳐 진행파관을 구동하기 위한 직류고전압을 발생시킨다.

그리고 제어회로와 센싱 감지모듈에서는 고압정류단의 고전압출력을 센싱하여 전력변환모듈로 피드백 하는데, 주 스위칭 펄스 듀티(Duty)를 조정하여 에너지를 가감하는 PWM 방식을 사용하였으며 고전압전원공급기내의 각종 고장신호와 외부와의 인터페이스 신호를 통제하는 곳으로 고압부와는 완전 분리시키는 구조를 택하였다.

마지막으로 FE전압과 히터전압을 발생시키는 모듈은 진행파관 2대에 각각 연결되어 총 8대의 위상배열 진행파관을 구동하는데 모듈레이터부로 명명되고 4개의 Sub-모듈로 구성된다. 전체적으로는 입력전원모듈, 로직제어모듈, 전력변환모듈, 고압발생모듈, 모듈레이터모듈인 5개의 모듈로 이루어진 고전압전원공급기는 출력전력이 3kW급으로 설계되었다.

2.2.1 공진회로 설계

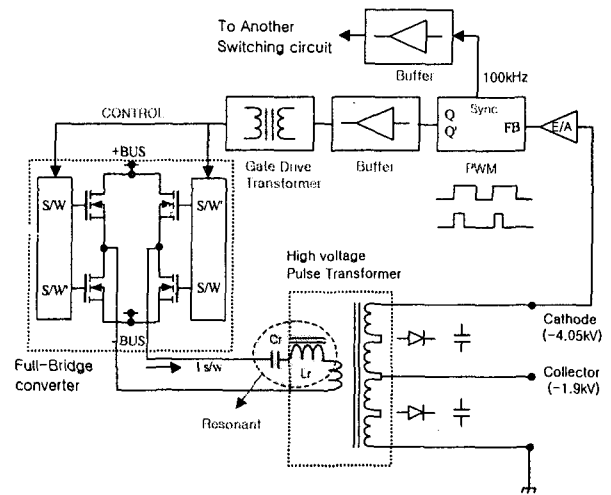


그림 2. 진행파관 구동 Full-Bridge 공진형 컨버터
Fig. 2 Schematic of Full-Bridge resonant converter for TWT's

리플이나 노이즈를 줄여 출력전압을 안정화하기 위해서는 출력 커패시터를 가변 하는 등 여러 방법이 사용되지만 진행파관을 보호하기 위해 어느 값 이상의 에너지가 진행파관에 공급되면 진행파관이 파손되는 문제와 장치자체의 허용공간 부족으로 본 장비에서 출력 C는 약 0.6uF이하로 제한된다.

그리고 그림 2.와 같이 스위칭 자체의 노이즈를 줄이기 위해 Full-Bridge컨버터에 직렬 공진 회로를 추가하였는데, 일반적으로 진행파관 구동용 고전압전원공급기에서 많이 적용되는 방법이다.^[3]

하지만 본 논문에서는 장비의 공간제약과 공진 인덕터(L_r)의 발열문제로 인해 펄스변압기 자체의 누설 인덕턴스(Leakage Inductance)를 이용하고,

변압기 1차 측 권선과 직렬로 공진형 커패시터(C_r)를 삽입하여 ZCS공진회로를 구현하였다. 설계된 값은 변압기 누설 인덕턴스 L_r 에 적절한 값인 C_r 을 추가하여 아래 식(3)에서와 같이 약 93kHz의 공진주파수(f_r)를 가지도록 하였는데 이는 주 스위칭 주파수가 100kHz인 것을 감안하였다. 즉, 전류 성분을 lagging 시켜 영전류 시점을 최대한 확보하기 위해서이다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (3)$$

그림 3은 설계된 공진회로를 가지고 실험한 실측 파형을 나타내고 있는데, 상단 파형은 하나의 스위치 양단에 걸리는 전압을 보여주고 있으며 하단 파형은 공진전류가 스위치 전압이 완전히 Off되고 난 이후 서서히 증가하는 것을 나타내 스위칭 노이즈와 손실이 많이 감소되는 것을 확인하였다.

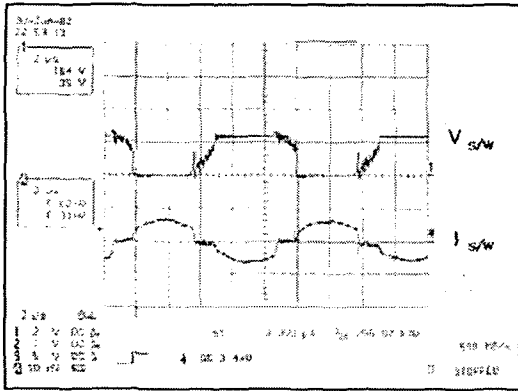


그림 3. 스위치 양단 전압과 공진전류
Fig. 3 FET's Voltage and Resonant Current waveform at time scale 2µs/div

2.2.2 고밀도 펄스변압기 설계

고전압전원공급기의 설계에서 가장 핵심적인 부분이라 할 수 있는 펄스 변압기는 특히 항공용 전자장비로 적용이 되는 경우 공간제약으로 인해 변압기의 에너지 밀도를 높여 부피와 무게를 줄여야 하는 과제가 있다. 이를 해결하기 위해서는 보통 스위칭 주파수를 높이는 방법이 많이 사용된다.

하지만 코어의 크기나 스위칭 주파수가 설정된 상황이면 고전압을 내기 위해 2차 측 턴수를 많이 감아야 하고 결과적으로 변압기의 누설 인덕턴스는 올라가며 변압기 내부의 공진현상으로 인해 온도상승이나 레귤레이션 특성이 나빠지는 단점을 가지고 있다.^[1]

본 장비의 실질적 부하인 진행파관을 고려하면 3kW급의 출력을 낼 수 있는 펄스 변압기가 필요한데 적은 부피로 스위칭 주파수를 100kHz로 구동하기에는 변압기 자체의 노이즈와 발열문제로 고밀

도 펄스변압기의 개발은 매우 어려운 현실이다.^[4]

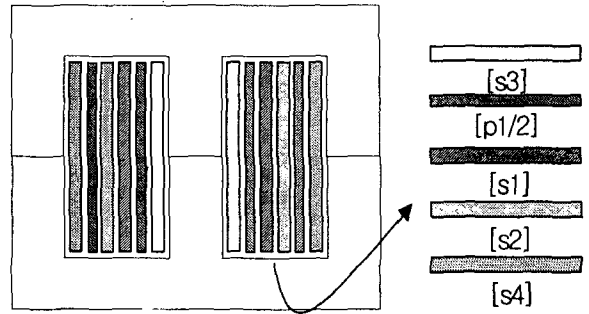


그림 4. 펄스 변압기 구성도
Fig. 4 Schematic diagram of Pulse Transformer

이를 해결하기 위해 위의 그림 4와 같이 충분한 유효전력을 가지는 EE type의 코어를 선정하고, 2차 측 권선을 4단으로 분리하였는데 이렇게 설계함으로써 변압기의 총 누설 인덕턴스를 줄여 변압기의 레귤레이션 특성을 좋게 하고, 출력 다이오드를 낮은 역 전압이 인가되는 부품을 선정할 수가 있으며 다단의 고전압 인출선을 추출할 수 있는 장점이 있다.

$$N_p = \frac{(V_{dc} - 2V_a) \times \frac{D}{2f} \times 10^8}{A_e \times dB} \quad (4)$$

$$N_s = N \times N_p \quad (5)$$

그리고 위 식 (4)와 (5)를 통해 변압기의 1차/2차 측 턴수 비는 결정되는데 여기서, A_e 는 선정한 코어의 유효단면적을 나타내며, dB 는 자속변화량, V_{dc} 는 Bus전압을 나타낸다.

제작된 변압기는 부피 250cm³, 용량 3kW, 효율 90% 이상의 특성을 나타내었고, 아래 그림 5.에는 2차 측 출력전압 파형을 보여주고 있는데 완벽한 펄스전압을 구현하고 있다.

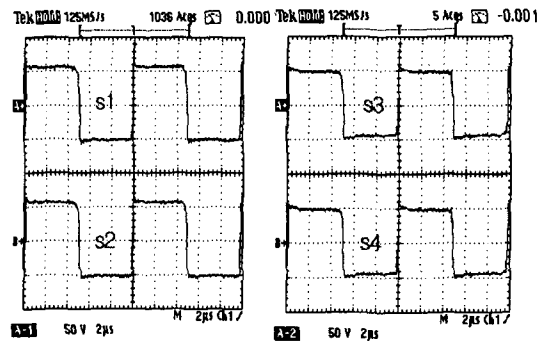


그림 5. 변압기 2차 측 출력파형
Fig.5 Secondary Output-voltage Waveform of Pulse Transformer

2.3 모듈레이터부 설계

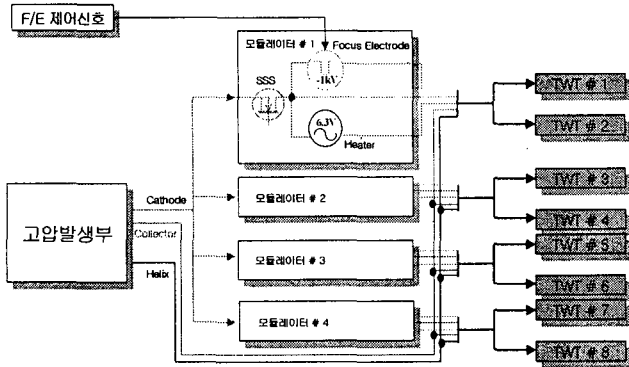


그림 6. 모듈레이터 모듈과 연결도

Fig. 6 Interface Schematic with Modulator Modules

모듈레이터부의 구성은 그림 6.에서 도시한 바와 같이 진행파관의 빔을 FE제어신호에 따라 캐소드 전압을 기준으로 -1kVDC 전압을 발생시켜 제어하는 FE발생부와, 진행파관의 전자총을 과열시키는 히터발생부, 그리고 진행파관 내의 Arcing이나 부분고장 시 실시간으로 차단시켜주는 고전압차단 스위치 SSS로 이루어진다.

FE전압은 -1kV를 제어신호에 대해 고속으로 스위칭해야 하는데 FET 스위치 소자를 On/Off 양단에 Dual로 두어 단일 스위치 대비 스위칭 응답시간을 단축하였으며 100ns 이내의 반응시간을 아래 그림 7.에서와 같이 보여주고 있다.

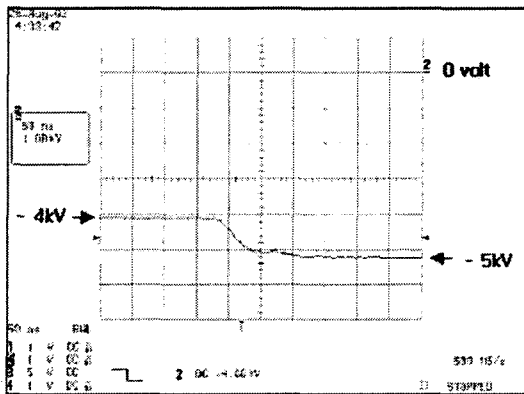


그림 7. FE Off 시 전압파형

Fig. 7 Waveform of Focus Electrode off voltage

그리고 국부적인 진행파관 Arcing이나 고장으로 인해 순간적인 단락이 일어나면 타 진행파관 또한 전자파 송신이 불가하므로 실시간으로 단락을 감지하여 고전압(~-5kV)을 차단해야 하는데 일반적인 전압감지회로가 아닌 전류 센서를 이용하였고 1kV의 내압을 가지는 FET를 직렬로 연결하여 구현하

였다.

인위적인 Arcing 시험결과 200ns이내의 빠른 응답특성을 나타내었고 타 모듈에 간섭을 일으키지 않아 부분송신이 가능하다는 결과를 얻었다.

3. 결 론

지금까지 논의된 바와 같이 항공용으로 개발된 진행파관 구동용 고밀도 고전압전원공급기는 위상 배열 송신기에 사용되는 진행파관 8대를 구동하는 3kW급 전원공급기로서, 펄스 변압기의 내부 누설 인덕턴스를 이용한 ZCS 공진형 컨버터를 사용하였으며, 100kHz 스위치 동작에서 우수한 동작특성과 레귤레이션을 가지는 효율 90%이상의 고밀도 펄스 변압기를 설계/개발하여 적용하였고 빠른 스위치 동작특성을 나타내는 모듈레이터를 개발하였다.

아래 그림 8.에는 개발된 고전압전원공급기의 형상을 나타내었는데 기능별로 5부분으로 모듈화된 모습을 볼 수 있으며, 단위체적 당 출력전력이 6W/inch³로서 고밀도의 전원공급기가 개발되었고, 부피는 390inch³며 고도 55,000ft 환경시험에서도 이상 없이 동작하는 것을 확인하였다.

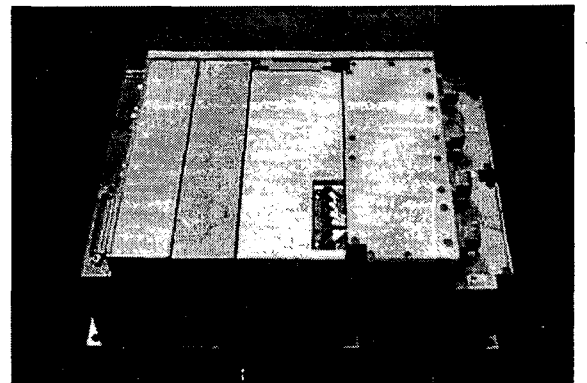


그림 8. 3kW급 진행파관 구동 항공용 HVPS

Fig. 8 3kW Airborne HVPS for TWT's

참 고 문 헌

- [1] L. Sivan, "Microwave Tube Transmitters", Chapman & Hall, (1994).
- [2] 박영주 외, "전자전용 고전압 반도체 변조 전원공급기 개발", 2002년 군사과학기술학회 제6차 종합학술대회 논문집 2권, pp. 731-734.
- [3] M. Nakaoka, "High-Voltage Transformer Parasitic Resonant PWM DC-DC High Power Converters and Their Performance Evaluations", ISIE '97. pp. 572-577.
- [4] 김성철 외, "100kHz 고밀도 펄스변압기 설계", 2000 대한전기학회 하계학술대회 논문지 B권, pp. 1283-1285.