

MPM 구동용 고전압 전원공급기의 개발

Development of High Voltage Power Supply for MPM

정용준, 박동선
LIG 넥스원

Yong-Joon Jung, Dong-Sun Park

Abstract

MPM(Microwave Power Module)은 진공 전력증폭기인 진행파관(TWT, Traveling Wave Tube)과 반도체 전력증폭기(SSA, Solid State Amplifier)를 결합한 구조로서, 미세한 RF 신호를 입력 받아 고출력의 RF 신호로 증폭하는 장치이다.

본 논문은 MPM 을 구동하기 위해, 필요한 수 kV 이상의 높은 전압을 TWT 에 공급해주는 고전압 전원공급기(HVPS, High Voltage Power Supply)에 관한 것이다. Main Topology 는 Resonant Phase Shift Full Bridge Converter 이며, 승압의 효과를 높이기 위해 2 차 측에는 Voltage Multiplier 를 사용하였다. MPM 을 구동하는데 필요한 전압인 Cathode(-4kV), FE_Bias(-5.25kV), Collector(-2kV)를 생성하며, FE_ON, OFF 신호에 따라 고전압 스위칭 동작을 하여, RF 증폭을 제어 할 수 있다. 최종적으로 Prototype 을 제작하고, 고찰된 실험결과를 제시하여 개발된 HVPS 의 우수성을 검증한다.

1. 서론

TWT 는 레이더와 전자전 및 통신 시스템 등 많은 분야에서 사용되고 있으며, 특히 마이크로파 대역에서 높은 출력전력을 요구하거나 광대역 주파수 특성을 필요로 할 때 주로 쓰이고 있다. 그러나 TWT 는 SSA 에 비해 잡음특성과 선형성 면에서 좋지 않은 특성으로 인해 저잡음, 선형성 특성이 요구되는 시스템에서는 적용이 어렵다는 단점을 갖고 있다. TWT 의 단점을 개선한 MPM 은 TWT 의 앞 단에 잡음특성이 좋은 SSA 를 추가하여 전체 잡음을 크게 개선하였으며, 전체 이득을 SSA 와 TWT 를 통해 나눠 얻음으로써 TWT 의 길이를 크게 줄일 수 있다.

이러한 장점을 가지고 있는 MPM 을 동작시키기 위해서는 TWT 에 수 kV 이상의 고전압을 공급하는 HVPS 가 필요하고, HVPS 는 크게 Heater 전원공급모듈, 고전압 전원공급모듈,

Modulator 모듈로 구성된다. Heater 전원공급모듈은 TWT 의 Cathode 표면을 가열하여 열전자를 발생시키는 역할을 하고, 고전압 전원공급모듈(Cathode, FE_Bias, Collector)은 발생된 열전자가 충분한 운동에너지를 가지고 저속과 구조를 통과하여 RF 증폭을 하도록 하는 역할을 한다. 또한 FE_ON 신호에 따라 RF 증폭을 제어하는 Modulator 모듈도 필요하다.

본 논문에서는 각각 모듈의 설계 및 시험, 제작에 대하여 논의한다.

2. 본론

그림 1 은 TWT 의 구조를 간략화하여 도시하였고, 그림 2 는 MPM 용 HVPS 의 블록도를 나타낸다. 28V 전원이 인가되어 Heater 전원공급모듈을 통해 만들어진 -6.3V 가 TWT 로 공급되면, Cathode 표면을 가열하여 열전자가 형성된다. 그 후 고전압 전원공급모듈이 음의 고전압(Cathode, FE_Bias, Collector)을 TWT 에 공급하면, FE_OFF 상태가 되는데, 이는 FE 에 FE_Bias 전위가 인가되어 FE 전위가 열전자의 이동을 막고 있기 때문에, RF 증폭이 일어나지 못하는 상황이다. FE_ON 신호를 인가하면 FE 는 Cathode 와 동일한 전위가 되는데, 이 때 열전자는 Cathode 와 Anode 의 전위차에 의해 저속과 구조 안으로 진행하게 되고, RF 입력에서 인가되는 전기장과의 상호 작용을 통하여 RF 신호가 증폭된다. 그리고 HVPS 에서 공급하는 전압은 매우 높은 전압이므로, TWT 에 손상을 주거나 TWT 의 수명에 악영향을 미치는 국부적인 Arcing 이 발생할 수 있다. 따라서 Arcing 을 빠른 시간 내에 감지하여 고전압을 차단함으로써 TWT 를 보호하는 기능이 반드시 필요하다. 이와 같은 보호 기능을 Control Logic 에서 담당하고 있다.

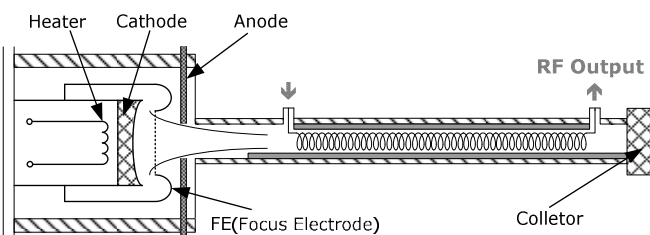


그림 1. TWT의 구조

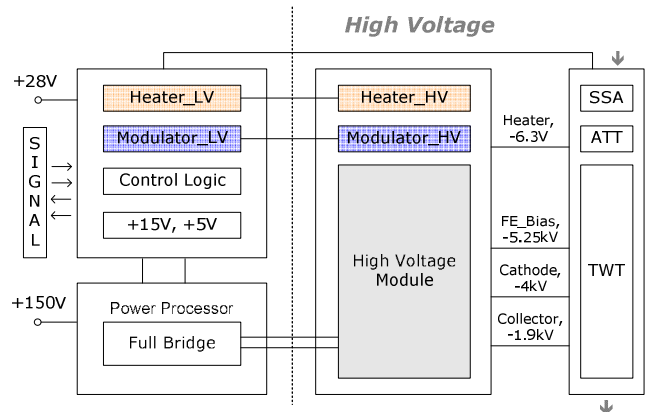


그림 2. MPM 용 HVPS 의 블록도

2.1 Heater 전원공급모듈

Heater 전원공급모듈은 TWT 에 Cathode 대비 $-6.3V$ 를 공급하여 Cathode 표면에 열전자를 형성하는 역할을 한다. Heater 는 초기 구동 시에 Heater 와 Cathode 사이의 임피던스가 낮아 순간적으로 과전류가 흐를 수 있는데, 이를 방지하는 역할 또한 수행해야 한다.

기존의 Heater 전원공급모듈은 그림 3.1 과 같이 Push Pull Converter 를 사용하며, 출력전압이 Cathode 전압($-4kV$) 대비 $-6.3V$ 를 유지해야 하기 때문에 Isolated Feedback Generator 를 사용하여 제어한다. 이 방법은 별도의 Current Limit Circuit 이 필요하고, 2 차 측의 고압 Noise 성분이 Feedback 에 영향을 주어 제어가 어렵다는 단점이 있다.

따라서 MPM 용 Heater 전원공급모듈에서는 2 차측에 Current Limit 기능을 가진 Switcher 를 사용하여 보다 간단한 회로를 구현하였다.

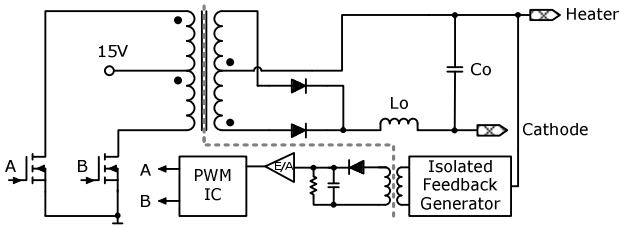


그림 3.1 기존의 Heater 전원공급모듈의 회로도

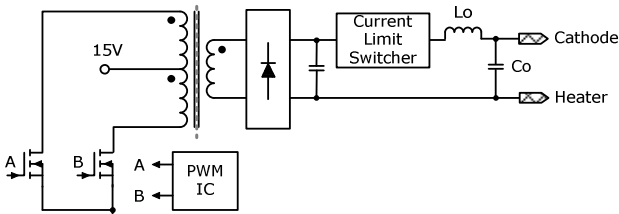


그림 3.2 MPM 용 Heater 전원공급모듈의 회로도

그림 4 는 실제 TWT 를 연결하고 Heater 전원공급모듈을 시험한 파형이다. 초기에 출력전류가 상승하다가 약 $1.3A$ 에서 Limiting 되는 것을 볼 수 있으며, Cathode 표면이 완전히 가열되면 전류는 약 $700mA$ 로 수렴된다. 출력전압은 Current Limit 동작이 끝난 후 $-6.3V$ 로 유지하게 된다.

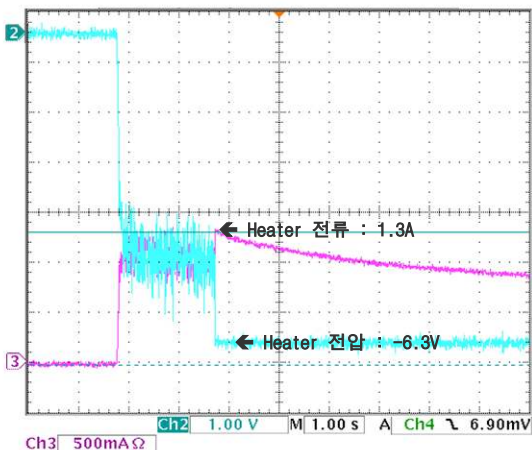


그림 4. Heater 전원공급모듈의 전압, 전류 파형

2.2 고전압 전원공급모듈

고전압 공급모듈은 TWT 에 Cathode($-4kV$), FE_Bias(-5.2 $5kV$), Collector($-1.9kV$) 전압을 공급하여 가열된 열전자가 저속과 구조로 진행하여 RF 신호를 증폭하는 역할을 한다. Cathode 전압의 Switching Ripple 과 Noise Level 이 RF 출력 특성에 큰 영향을 미치기 때문에, 영전압 스위칭이 필수적이라고 할 수 있다. Resonant Phase Shift Full Bridge Converter 를 사용하여 4 개의 스위치 모두 영전압 스위칭이 가능하게 하였으며, 2 차 측에는 Voltage Multiplier 를 적용하여 승압의 효과를 높였다. 또한 고전압 모듈의 FE_Bias 전압은 반드시 Cathode 전압보다 먼저 인가해야 한다는 제한사항이 있는데, 이는 열전자가 누설되는 것을 막기 위함이다. 이를 위해 기존 회로에서는 FE_Bias 전압을 만들어 주기 위한 별도의 모듈을 두었으나, 제안 회로는 두 개의 모듈을 고전압 모듈 하나로 합쳐 보다 간단한 회로를 구현하였다. 하나의 Transformer 로 Cathode($-4kV$), FE_Bias($-5.25kV$), Collector($-1.9kV$) 전압을 만들지만, FE_Bias 전압이 항상 Cathode 전압보다 커서 열전자들이 이동하지 못하게 차단하는 원리이다. (그림 4,5)

표 1. MPM용 고전압 전원공급모듈의 Specification.

입력전압	150 V	External Lk	28 uH
입력전류	2 A	Cr	200 nF
Duty	0.4	Frequency	400 kHz
Lm	500 uH	Efficiency	93 %

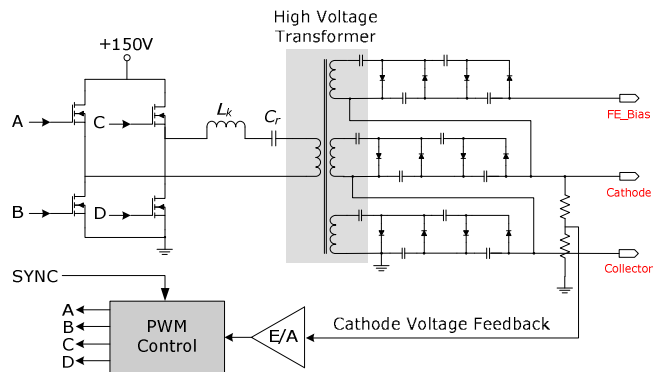


그림 4. MPM용 고전압 전원공급모듈의 회로도

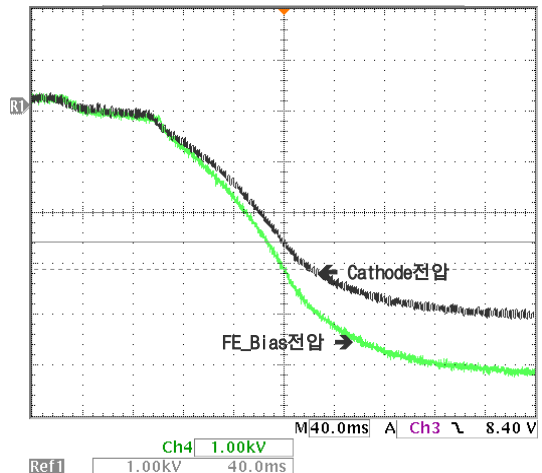


그림 5. Cathode전압과 FE전압 파형

2.3 Modulator 모듈

Modulator 모듈은 FE_ON, OFF 신호에 따라 FE 에 인가하는 전압을 Cathode 전위, FE_Bias 전위로 바꾸어주어 RF 증폭을 제어하는 역할을 한다. 그림 6 은 Modulator 모듈의 회로도이다. 고전압 스위칭을 위해 각 스위치의 내압을 고려하여 4 개의 주 스위치를 직렬로 연결하고(Q1, Q2, Q3, Q4), FE_ON, OFF 신호에 따라 2 개의 스위치가 동시에 ON, OFF 되도록 설계하였다. Q5, Q6, Q7, Q8 은 주 스위치 Gate-Source 사이의 전하를 빨리 방전시켜 모듈의 동작이 100ns 이내에 이루어지게 한다. 이처럼 고속 스위칭이 필요한 이유는 Transient 구간의 열전자 누설을 막기 위함이다.

그림 6 에서 FE_ON 신호가 인가되면 T1, T2, T7, T8 을 통해 Q1, Q2, Q7, Q8 의 스위치가 ON 되어 Cathode 전압과 FE 전압이 동일한 전위가 되고, RF 증폭이 일어나게 된다.

그림 7 은 FE_ON 신호 인가 시 FE 전압이 FE_Bias 전위에서 Cathode 전위로 바뀌는 과정을 나타낸다. 고전압 스위칭이 이루어지고 있으며, Transient 구간이 약 36.8ns 로 고속 스위칭이 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

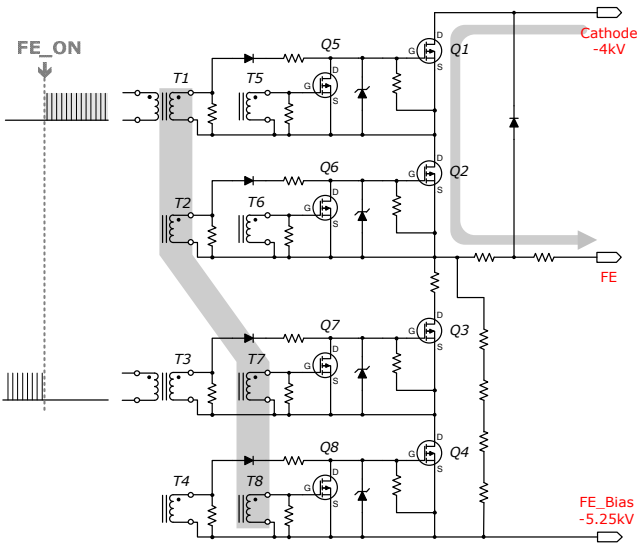


그림 6. Modulator 모듈의 회로도

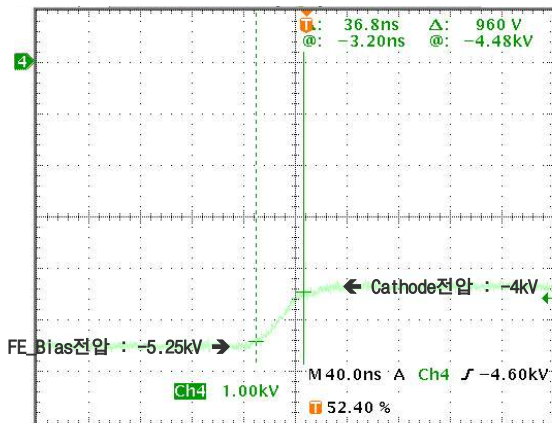


그림 7. FE_ON 신호 인가 시 FE전압의 변화

3. 결론

본 논문은 MPM(Microwave Power Module)을 구동하기 위한 HVPS (High Voltage Power Supply)에 관한 논문으로서, 단순히 고전압을 만들어 내는 역할만이 아닌 MPM 을 구동하기 위해 Current Limit, 고전압 스위칭, 고속 스위칭 등 다양한 기능을 수행하는 Power Supply 에 관한 것이다.

Heater 전원공급모듈은 2 차 측에 Switcher 를 사용하여, 기존의 회로보다 간단한 회로를 구현하였으며, Current Limit 기능 및 Heater 전원(Cathode 대비 -6.3V) 공급 기능을 실험을 통해 확인하였다. 고전압 전원공급모듈은 FE_Bias 전원을 만들기 위한 별도의 모듈을 하나의 고전압 모듈로 합쳐, 기존에 비해 모듈의 크기를 반으로 줄였고, Resonant Phase Shift Full Bridge Converter 를 사용하여 4 개의 스위치 모두 영전압 스위칭이 가능하게 하였다. 실험 결과 전력변환효율은 93% 이다. Modulator 모듈은 고전압 스위칭을 위한 4 개의 스위치와 고속 스위칭을 위한 4 개의 스위치, 그리고 8 개의 트랜스포머를 사용하여 FE 신호에 따른 RF 증폭을 제어 할 수 있게 하였다.

참고 문헌

- [1] R. H. Abrams Jr. , R. K. Parker , "Introduction to the MPM : what it is and where it might fit" , IEEE 1993. pp. 107-110.
- [2] A.S Gilmour Jr. , Principle of Traveling Wave Tubes, Boston, London, Artech House. 1994
- [3] A.S Gilmour Jr. , Microwave Tubes, Norwood, MA, Artech House. 1986
- [4] Robert J. Baker, John H. Booske, Neville C. Luhmann Jr., Gregory S. Nusinovich, Morden Microwave and Millimeter Wave Power Electronics, WILEY-INTERSCIENCE, 2005
- [5] 박영주 외, "진행파관(TWT) 구동용 고밀도 고전압 전원공급기 개발 ", 2003 년 전력전자학술대회 논문집, pp. 256~259
- [6] Ye, Z., Jain, P., Sen, P.C., "A Full Bridge Resonant Inverter with Modified Phase Shift Modulation", Power Electronics Specialists Conference, 2005, pp 642-649.
- [3] W. Chen et al, "A Comparative Study of a Class of Full-Bridge Zero-Voltage-Switched PWM Converters", IEEE, 1995, pp 893-899
- [4] Abraham I. Pressman, "Switching Power Supply Design", McGraw Hill. 1998, pp.563-609