

진행파관증폭기용 고밀도 고전압전원공급기용 고주파수, 고전압, 펄스 변압기 변압기 개발

김성철, 김동희*, 남상훈
포항공속기연구소, *영남대학교

A development of high-frequency, high-voltage, pulse transformer for TWT high-power density HVPS

S. C. Kim, D. H. Kim*, and S. H. Nam
PLA/PAL POSTECH, *YeungNam University

본 논문은 민군겸용기술사업에서 지원한 과제임

Abstract - 고전압 전원공급기를 고 밀도로 제작하기 위하여 고 주파수 동작을 시켜야 한다. 이에 따라 전원공급기에서 최대의 부피를 차지하는 부품인 변압기는 원하는 주파수에서 최소의 부피로 충분한 전력을 수용하면서 완벽한 펄스재현을 하여야 한다. 그리고 승압비를 일정수준으로 유지하여야 한다. 이러한 변압기의 설계 및 제작 시 주의하여야 한다. 진행파관 증폭기용 고밀도 고전압전원공급기용 고주파수, 고전압, 펄스 변압기 변압기를 설계, 제작 시험하였다. 변압기의 스위칭 주파수는 80 kHz 이며 입력전압은 265 Vdc이고 출력전압은 4 kVdc 이다. 변압기의 정상 출력은 1.7 kW이다. 그리고 최대부피는 200 cm³ 이하여야 되어야 한다. 본 논문에서는 다양한 권선 방법에 의하여 제작된 변압기에 대하여 변압기의 설계 및 시험절차가 제시되었다. 그리고 변압기의 누설 인덕턴스, 분포 캐패시턴스 및 공진 주파수도 측정하여 평가하였다.

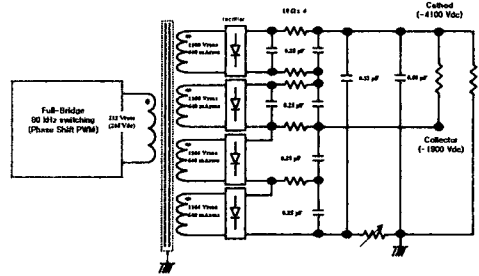


그림 1 TWT HVPS circuit

그림 1은 진행파관 증폭기용 고전압전원공급기의 회로이다. 고전압 전원공급기는 입력전압이 265 Vdc이고 출력전압은 캐소드 및 콜렉트 각각 -4100 Vdc 및 -1900 Vdc이다. 고전압 전원공급기를 고밀도로 개발하기 위하여 전원장치의 크기를 결정하는데 중요한 부품인 변압기는 원하는 주파수에서 손실 및 부피가 최소가 되어야 한다. 표 1은 변압기의 요구사항 이고 표 2는 표 1을 이용하여 계산한 파라메타 들이다.

표 1 Requirement of transformer

Transformer Requirement		
duty	0.64	
input	212/264	Vrms/Vdc
output(s1)	1100/640	Vrms/mArms
output(s2)	1100/640	Vrms/mArms
output(s3)	1166/40	Vrms/mArms
output(s4)	1166/40	Vrms/mArms
oper.Temp.	-55 ~ 85	°C
dielectric strength	6,000	Vdc
Max. volume	200	cm ³
Oper. frequency	80	kHz

표 2 Calculated parameters of transformer

Efficiency(%) / Duty	90 / 0.64	
Primary Voltage DC(RMS)	265(212)	Vdc(Vrms)
Secondary Voltage RMS(DC)	s1,s2: 1100(1375) s3,s4: 1166/(1458)	Vrms(dc)
Secondary Current	s1,s2: 640 s3,s4: 40	mArms
Total Power Input(Output)	1668(1501)	Wrms
Total Primary current	7.87	Arms
turn ratio (primary : secondary)	s1,s2: 5.19 s3,s4: 5.5	

1. 서 론

마이크로웨이브 통신을 위한 진행파관(Travelling Wave Tube), CO₂ 레이저 그리고 X-레이 튜브 등에서 delay 라인 및 콜렉트와 같은 여러 가지 응용에서 10 kV이상의 고전압 전원장치가 필요하다.[5] 고밀도 전원장치를 제작하기 위하여 변압기 및 인덕터는 소형, 고효율이 되어야 한다. 고 주파수 변압기는 전원장치에서 부피의 약 25% 그리고 무게의 약 30%를 차지하므로 SMPS의 크기를 결정하는데 아주 중요한 요소이다. 따라서 고효율, 고 주파수 변압기 설계 시에 손실 및 부피를 최소로 하여야 한다. 고효율, 고주파수 펄스변압기를 최적으로 설계하기 위하여 (1) 요구되는 VA용량, 동작 주파수 그리고 변압기의 동작온도를 고려한 최소의 표준 코어 선정 (2) 변압기 손실이 최소가 되는 최적 동작 지속밀도 계산 (3) 최적 변압기 권선 계산 등을 고려하여야 한다.[4] 진행파관 증폭기의 고전압전원장치는 265 Vdc를 FET 풀-브릿지로 구성되어 80 kHz로 스위칭 한다. 2차회로는 펄스변압기의 2차권선의 각 출력을 정류한 다음 직렬로 연결하여 -4,100 Vdc(cathod) 및 -2,050 Vdc(collector)의 출력을 얻는다. 이 변압기는 80 kHz이상의 주파수에서 동작하여야 하며 변압기 전체 턴수는 각각 1:15.4 및 1: 7.2가 되어야 한다. 이 변압기를 직접 권선하면 이차 권선의 턴수비가 커지게 되고 권선에서 생기는 기생요소(누설 인덕턴스, 커징 캐패시턴스)가 커지게 된다. 그리고 변압기의 이차 권선에 고전압이 직접 유기 되므로 권선 및 권선의 층간 절연을 충분히 고려하여 설계하여야 한다. 고전압, 펄스 변압기 변압기의 설계 시 권선의 승압비가 적당하게 되도록 세분화 시켜 설계 하여야한다.

2. 본 론

2.1 고주파수 고전압 펄스 변압기

2.2 고주파수 고전압 펄스 변압기 설계

(코어의 선정)

200 cm³이하의 부피로 변압기를 제작하기 위하여 80 kHz의 스위칭 주파수에서 주어진 전기적인 용량을 만족하면서 제작이 가능한 표준 페라이트 코어 EE-type (Magnetics ferrite EE combination, 47228EC)으로 선정하였다.(그림 2 및 표 3)

선정된 코어는 플-브릿지 토폴로지에 대하여 변압기의 동작 자속밀도가 1500 G 사이에서 최대 9 kW까지 사용할 수 있으므로 요구하는 1.7 kW의 출력은 충분히 사용할 수 있다.(식(1))

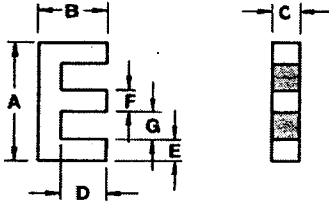


그림 2 selected core

표 3 core parameters

R-47228EC			
A(mm)	72.4	le(cm)	13.7
b(mm)	27.9	Ae(cm ²)	3.68
c(mm)	19	min.area(cm ²)	3.63
Dmin(mm)	17.8	Ve(cm ³)	50.3
E(mm)	9.53	set nom Wt.(gms)	264
F(mm)	19	bobbin area(Ab,cm ²)	4.02
G(mm)	16.9	WaAc(cm ⁴)	14.8

$$Po(kW) = \frac{0.0014 B_{max} f A_e A_b}{D_{cma}} \quad (1)$$

(권선 및 절연물의 선정)

변압기의 고주파수 동작 시 권선에서 표피효과(skin effect) 및 프록시미티 효과(proximity effect)를 최소로 하기 위하여 Litz-wire를 사용하였다.[7] 권선은 전류밀도가 500 circular mil/A(3.95 A/mm²)를 기준으로 하여 설계하였다. 80 kHz에서 표피효과에 의한 전류의 침투 깊이(skin depth)는 0.25 mm ($\delta(mm) = 0.071/\sqrt{f \times 10^3}$)이다. 따라서 litz-wire는 1 strand의 지름이 0.25 mm 이하가 되어야 한다. 변압기의 절연지는 캡톤 H 타입 필름(break down strength(2 mil): 276 kV/mm, strength temp.: 815°C)를 사용하였다.

표 4 wire selection for transformer(Litz wire)

1차 권선	동 단면적	3.079 mm ²
Litz wire		
(0.14 mm x 200)	동 + 절연물 지름	2.041 mm
2차 권선(s1, s2)	동 단면적	0.308 mm ²
Litz wire		
(0.14 mm x 20)	동 + 절연물 지름	0.7539 mm
2차 권선(s1, s2)	동 단면적	0.154 mm ²
Litz wire		
(0.14 mm x 10)	동 + 절연물 지름	0.5369 mm

(권선 설계 및 배치)

변압기 손실이 최소가 되는 최적 동작 자속밀도에서 최적 변압기 권선 계산하기 위하여 1차 권선의 턴수를 동

작주파수 및 동작자속밀도를 바꾸어 가며 식(2)와 같이 계산한 후 (2)를 기준으로 각각의 이차권선에 대하여 권선수, 권선층의 권선수, 권선의 층수, 권선의 두께, 권선의 일회 평균길이, 권선의 총길이, 권선의 DC 저항, 권선의 동손을 계산한다. 그리고 각 권선에 대하여 설계를 향후 변압기의 권선두께, 원도우 두께, 변압기 손실(코어손실 + 권선손실), 변압기 온도상승 등을 고려하여 변압기의 동작 자속밀도를 결정한다.

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

이와 같은 것들을 고려하면 변압기는 1400G의 자속밀도로 동작하는 것이 적당하다(표 5). 권선의 배치는 일차권선은 보빈 전체에 배치하고 2차권선은 누설인덕턴스를 줄이기 위하여 s1과 s2 그리고 s3과 s4를 각각 보빈의 1/2씩에 분리하여 배치하였다. 일차 권선이 코어의 중앙 기둥에 배치한 경우와 이차권선의 한가운데 배치한 경우 그리고 이차권선의 바깥에 배치한 경우 각각에 대하여 제작 및 실험을 하였다.(그림 3, 4, 5)

표 5 Winding design(turn/layer)

1400Gauss		
1차(p)	15/2	turn/layer
2차(s1, s2)	각 78/9	turn/layer
2차(s3, s4)	각 83/7	turn/layer

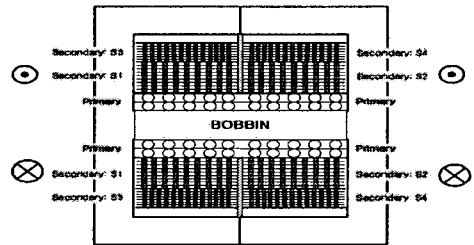


그림 3 Winding arrangement I
(primary: core center pole)

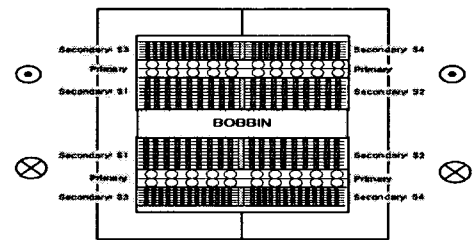


그림 4 Winding arrangement II
(primary: secondary center)

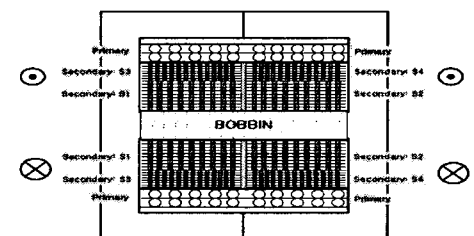


그림 5 Winding arrangement III
(primary: secondary outer)

2.3 변압기 파라메타 측정 및 펄스 시험

표 5의 권선을 그림 3, 4, 5와 같이 배치하여 제작 후 각각에 대하여 파라메타를 측정하고 펄스시험을 하였다.

<파라메타 측정>

파라메타 측정은 권선배치 I, II 및 III의 변압기를 quality factor, leakage inductance, winding capacitance, self resonance frequency에 대하여 하였고 distributed capacitance는 계산하였다.

표 6 Parameters of measured

	권선배치 I (65 kHz)	권선배치 II (80 kHz)	권선배치 III (80 kHz)
Quality factor	> 10	> 45	> 44
leakage inductance	6.03 μ H	2 μ H	6.23 μ H
winding capacitance	116 pF	237 pF	120 pF
self resonance frequency	0.75 MHz	1.4 MHz	1 MHz
distribute capacitance	6 pF	18.3 pF	28.5 pF

<펄스 시험>

펄스시험은 권선배치 I, II 및 III의 변압기를 그림 1의 회로에서 변압기 1차를 약 100 Vdc를 80 kHz로 스위칭하고 부하는 ground와 cathod 사이에 13 k Ω 으로 하여 이차 권선 각각을 측정하였다.

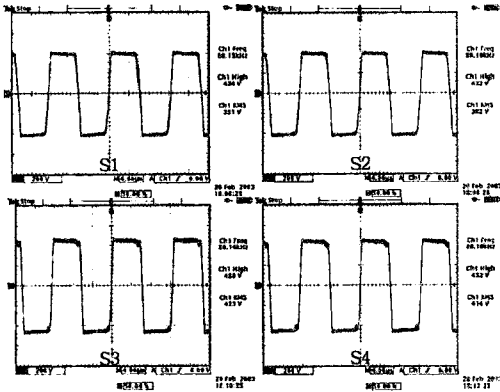


그림 6 Pulse test result(winding arrangement I)

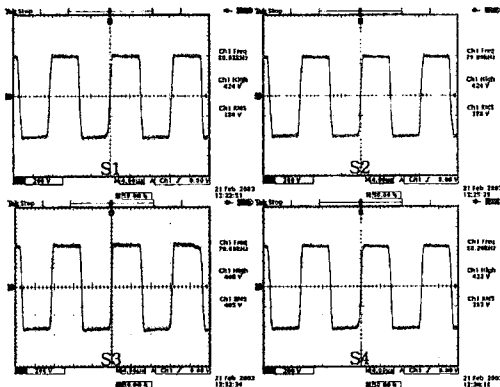


그림 7 Pulse test result(winding arrangement II)

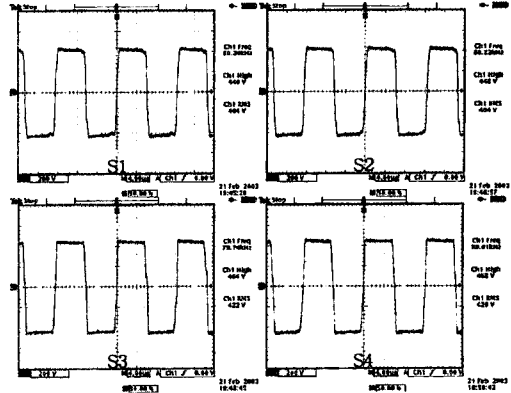


그림 8 Pulse test result(winding arrangement III)

3. 결 론

진행파관 증폭기용 고밀도 고전압전원공급기의 고주파수 펄스 변압기를 권선 배치를 달리하여 설계, 제작, 시험하였다. 변압기의 파라메타는 권선배치 II의 경우가 가장 우수하였으며 권선배치 III이 권선배치 I보다는 우수하였다. 그리고 펄스시험결과 권선배치 I과 III에서는 일차 권선에 근접한 이차 권선의 파형은 거의 완벽한 펄스가 재현되었으며 일차 권선에서 멀리 떨어진 이차권선은 펄스의 flat-top 끝 부분에서 변압기 자체 공진 주파수 성분의 찌그러짐이 약간 발생하였다. 권선배치 II의 경우는 이차 권선 각각이 flat-top에서 찌그러짐이 거의 발견되지 않았다. 따라서 진행파관 증폭기용 고밀도 고전압전원공급기의 고 주파수 펄스 변압기는 권선배치 II로 제작하는 것이 바람직하다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.C.Kim, S.H.Jeong and S.H.Nam, "High Power Density, High Frequency, and High Voltage Pulse Transformer", KIEE International Transactions on EMECS 11B-4, 180-184, 2001
- [2] Kim, S.C., Nam, S.H., Kim, S.H., Kim, D.T., and Jeong, S.H., "High power density, high frequency, and high voltage pulse transformer", IEEE Pulsed Power Plasma Science conference, 2001. PPPS-2001, vol.1, pp 808-811
- [3] S.C. Kim, S.H. Nam, etc, "Fiend Analysis of the TWT HVPS Transformer and HV Module". IEEE 25th IPMC and 2002 High Voltage workshop, 506-509, 2002
- [4] R. Petkov, "Optimum Design of a High-Power High-Frequency Transformer", IEEE Transactions on power electronics, Vol. 11, No 1, Jan 1996, pp33-42
- [5] M.A Perez, C. Blanco, M. Rico, F.F. Linera, "A New Topology for High Voltage High Frequency Transformers", Applied Power Electronics Conference 1995(APEC'95), pp554-559
- [6] Charles S.Kerfoot, "High Voltage High Frequency Conversion Transformer", International Energy Conversion Engineering Conference 1997, pp329-331
- [7] Charles R. Sullivan, "Optimal choice for number of strands in a Litz-wire transformer winding", IEEE Transactions on power electronics, Vol. 14, No 3, March 1999, pp283-291