2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

# 진행파관 고전압전원공급기의 고주파수, 고밀도, 고전압 펄스변압기의 설계 및 해석

김성철, 정성훈, 남상훈
포항공대 포항가속기연구소

# Design and Analysis of High Frequency High Power Density, High Voltage Pulse Transformer for Travel Wave Tube(TWT) High Voltage Power Supply

S. C. Kim, S. H. Jung, S. H. Nam
POSTECH PLS/PAL

**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. 고전압 전원공급기는 풀-브릿지 DC/DC 컨버트로 구성되어 있으며 스윗칭 주파수는 100 kHz 이다. 변압기는 일차권선이 1개이며 이차 권선은 4개로 구성된다. 일차전압은 250 Vdc, 이차 권선 각각의 출력은 520 Vrms이다. 변압기의 이차 권선은 배 전압 회로를 이용하여 승압 후 각각을 직렬로 연결하여 -4,100 VDC와 -2,050 VDC를 만들어 TWT(Travel Wave Tube)의 케소드 및 콜렉트에 공급한다. 이 변압기는 100 kHz 펄스로 동작하고 최대부피가 400 $cm^3$이하가 되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 변압기의 설계 방법 및 최소 온도상승을 위한 적절한 동작 자속밀도의 선택에 대하여 기술하고 변압기의 누설 인덕턴스, 분포 케페시턴스, 공진 주파수에 대하여 설계치 및 실험치를 비교 평가하였다.

## 1. 서 론

직류 혹은 교류 각종 전원장치를 소형 경량화 시키기 위하여 고 주파수 동작이 필수적이다. 오프라인 스윗칭 전원장치에서 부피와 무게를 결정하는 중요한 부품이 변압기이다. 따라서 전원장치의 에너지 밀도를 올리기 위하여 스윗칭 변압기는 스위칭 주파수에서 완벽하게 동작을 하여야 하면서 고 에너지 밀도가 되어야 한다.[1] 변압기의 에너지 밀도는 기기의 동작 주파수에 비례하여 증가한다. 이에 따라 전원장치를 소형 경량화 시키기 위하여 스위칭 방식으로 동작 주파수를 올리는 기술이 일반화 되고 있다. 위상배열 송신을 위하여 사용되는 진행파관(Trave Wave Tube)의 고전압 전원공급기를 소형화로 개발하기 위하여 전력변환 회로의 의 핵심 부품인 고전압 펄스 변업기의 설계 및 해석에 관하여 기술 하였다. 전력변환회로는 1차 회로가 FET 풀-브릿지로 구성되어 250 Vdcv를 100 kHz로 스위칭 한다. 2차회로는 펄스변압기의 2차권선의 출력을 배전압 회로를 이용하여 승압한 후 -4,100 Vdc 및 -2,050 Vdc의 출력을 얻는다.

## 2. 본 론

### 2.1 변압기의 설계 사양

그림 1은 개발하여야 할 고주파수 고밀도 고전압 펄스 변압기의 고전압 발생회로 연결도 이다. 이 변압기는 사용온도가 -55 ~ 85 ℃이고 동작주파수는 100 kHz이고 절연내력은 최소 6 kVdc 이상이 되어야 하며 400 $cm^3$이하가 되어야 한다. 이 변압기는 입력전압이 240 Vrms 이고 출력은 s1 및 s2 권선은 520 Vrms/2.2 Arms 이고 s3 및 s4 권선은 520 Vrms/0.2 Arms 이다. 변압기 듀티(D)를 0.9로 가정하고 효율($\eta$)을 90%로 가정하여 전기적인 파라메타를 다음 식을 이용하여 계산한다.

본 논문은 민군겸용기술사업에서 지원한 과제임

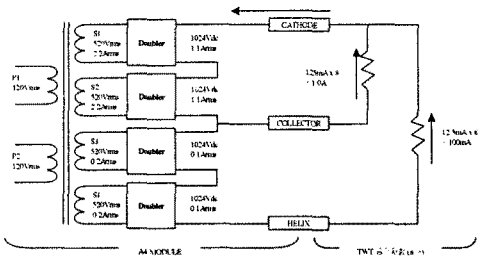


그림 1 펄스변압기의 연결도
(100kHz, 변압기 1차 full bridge 스윗칭)

▶권선비 : $N = N_s/N_p = V_o/(V_{DC} \times D)$ (1)

▶일차측 RMS 전압 : $V_{RMS} = V_{DC} \times \sqrt{D}$ (2)

▶이차측 RMS 전압 : $V_{\sec\,RMS} = N \times V_{DC} \times \sqrt{D}$ (3)

▶각 이차권선의 입력전력:

$$P_i = P_o/\eta = V_{DC} \times I_{P_{DC}} \times D \quad (4)$$

$I_{P_{DC}}$:각 이차권선의 DC전류

▶일차측 rms 전류:

$$I_{P\,RMS} = I_{P_{DC}} \times \sqrt{D} = P_i/(V_{DC} \times \sqrt{D}) \quad (5)$$

위의 수식을 이용하여 변압기의 전기적 파라메타를 계산하면 변압기의 입력은 245 Vrms, 13.4 Arms, 3.06 kWrms 이고 출력은 520 Vrms(548 VDC)이고 4.8 Arms(total), 2.75 kW(total) 이다.

### 2.2 변압기 코어, 절연지 및 권선

펄스변압기용 코어는 동작주파수를 충분히 수용하면서 변압기 제작 시 부피가 최대 400 $cm^3$이하가 되는 core인 Magnetic Ferrite EC type(47220EC x 2)으로 코어손실이 적은 R 재질을 선정하였다. 이 코어는 Ve=50.5 $cm^3$이다. 스위칭 주파수가 100 kHz이고, 변압기의 자속밀도가 1000 G ~ 2400 G 사이로 동작할 때 코어손실은 3.7 ~ 36.5 W이고 풀-브릿지 방식에서 1000 G ~ 2000 G에서 코어로부터 이끌어낼 수 있는 전력은 8.29 ~ 16.58 kW로 요구하는 3 kW를 충분히 수용한다. 충분한 절연강도를 가진 고전압 펄스 변압기를 설계하기 위하여 절연지는 변압기에서 요구하는 절연내력을 만족하는 kapton 필름(H)을 선정하였

다. 설계 시 일차 권선의 층간 절연은 2 mil, 이차 권선의 층간 절연 및 권선간 절연은 2 mil로 하여 충분한 절연을 유지하도록 하였다. 그리고 권선 설계시 전류밀도가 500 Dcma(circular mil/A)인 권선을 기준으로 설계 하였다. 동작 주파수가 100 kHz이므로 이 주파수에서 skin depth( $\delta = 0.071/\sqrt{f}$(m))는 0.225 mm이다. 따라서 일,이차 권선의 두께(지름)은 0.225 mm 보다 적어야 한다. 일차 권선은 foil을 사용하였고 이차 권선은 litz wire를 사용하였다. 그리고 변압기 권선 설계 시 모든 권선에는 안전율을 1.25로 하였다.[1][2]

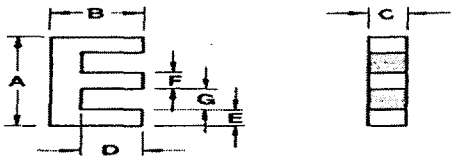


그림 3 R-47228E 코어의 형태(mm)
(A=72.4,B=27.9,C=19,D=17.8,E=9.53,F=19,
G=16.9), size = (A x 2B x (C+2G))

## 2.2 변압기 권선 설계

### 2.2.1 권선의 배치

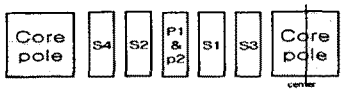


그림 4 변압기 권선 배치

변압기 권선 배치는 일차권선을 한가운데 배치하고 이차 권선 중 전류가 많은 s1, s2 권선을 일차권선 옆에 배치시키고 이차 권선 중 전류가 적은 s3, s4 권선을 가장 바깥으로 배치하여 동작주파수에서 완벽한 펄스를 재현하도록 하였다.[2]

### 2.2.2 권선설계

그림 3과 같이 권선을 배치한 후 권선의 설계는 다음의 순서에 따라 하였다.

▶1차권선의 권선수 계산

$$N_p = ((V_{dc} - 2 \cdot V_q) \cdot \frac{D}{(2 \cdot f)} \ / \ (A_e \cdot dB)) \times 10^{-8} \quad (6)$$

$V_{dc}$: DC link voltage(V), D: duty ratio

$V_q$: 스위칭 소자전압강하, f: 스위칭 주파수(Hz)

$A_e$: 코어 단면적, dB: 자속변화량(dB = 2B)

일차권선의 권선수 계산후 그림 3과같은 권선배치 에서는 s3→s1→p→s2→s4 권선의 순서로 각 권선에 대하여 권선수, 권선층의 권선수, 권선의 층수, 권선의 두께, 권선의 일회 평균길이, 권선의 총길이, 권선의 DC 저항, 권선의 동손을 계산 한다.

▶권선수( $N_{(p,s)}$): $N_s = N \cdot N_p (N = 2.167)$ (7)

▶권선층의권선수( $N_{K(p,s)}$): $W_{I(p,s)} / (\Phi_s \text{ or } T_{foil}) \times (UF_s)$ (8)

▶권선의 층수( $m_{(p,s)}$): $N_{(p,s)} / N_{K(p,s)}$ (9)

▶권선의두께( $W_{T(p,s)}$):

$$(\Phi_s \times m_{(p,s)} + ((t_p \text{ or } t_{fl}) \times (m_{(p,s)} - 1)) \times \frac{1}{UF_s} \quad (10)$$

▶권선의 일회 평균길이( $MWL_{(p,s)}$):

$$(F + C + 4 \times T_{bo} + 4 \times W_{T(p,s)}/2) \times 2 \quad (11)$$

▶권선의 총 길이( $TWL_{(p,s)}$) :

$$MWL_{(p,s)} \times N_{(p,s)} \times 10^{-3}(m) \quad (12)$$

▶권선의 DC 저항( $R_{DC(p,s)}$):

$$TWL_{(p,s)} / (A_{cw(p,s)} \times \sigma_{cu}) \quad (13)$$

▶권선의 동손( $P_{w(p,s)}$): $I^2_{r(p,s)} \times R_{DC(p,s)}$ (14)

$W_{I(p,s)}$ : 일,이차권선 폭

($\Phi_s$ or $T_{foil}$) : 이차 권선지름 및 foil 두께

$UF_s$ : Utlization Factor(0.9)

$A_{cw(p,s)}$ : 일, 이차권선 동 단면적

$\sigma_{cu}$ : 동의 전도도( $5.8 \times 10^7\ \Omega/m$)

각 권선에 대하여 설계를 향후 변압기의 권선두께, 원도우 두께, 변압기 손실(코어손실 + 권선손실), 변압기 온도상승 등을 고려하여 변압기의 동작 자속밀도를 결정한다.

변압기의 온도상승 $\Delta T = 80 \times A^{-0.7} \times P_{loss}^{0.85}$(℃) (15)

A : 변압기 발열 표면적, $P_{loss}$ : 변압기 손실

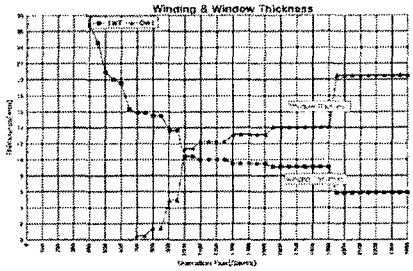


그림 5 변압기 설계결과(변압기 권선 및 창 두께)

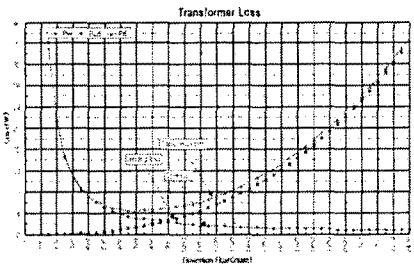


그림 6 변압기 설계결과(손실)

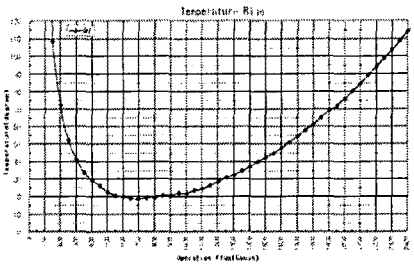

그림 7 변압기 설계결과(온도상승)

그림 4, 5, 6은 식(6) ~ (15)를 이용하여 그림 2의 코어에 일차 권선은 0.2 x 24.36(mm) foil을 사용하고 이차 권선 s1, s2는 35AWG x 50 litz wire을 사용하고 s3, s4는 35AWG x 10 litz wire를 사용하여 그림 3의 권선 배치를 하여 동작자속밀도에 따라 변압기의 권선 및 창의 두께, 손실 및 온도상승을 설계한 결과이다. 변압기 손실과 온도상승은 700 G에서 최저이

다. (그림 5, 그림 6) 그러나 700 G에서는 변압기의 창이 부족하다. 실제 제작을 고려할 때 변압기의 동작 자속밀도가 1500 G 정도가 되어야 한다.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 자속밀도 | 1500 G | S3 | 26turn/1 층 |
| 층 권선 두께 | 9.55 mm | S1 | 26turn/2 층 |
| 원도우 두께 | 13.2 mm | P | 12turn/12층 |
| 권선 저항 | 0.82 ohm | S2 | 26turn/2 층 |
| 코어/권선 손실 | 10.6/1.8 W | S4 | 26turn/1 층 |
| 변압기 손실 | 12.4 W | $\Delta T$ | 42.3 ℃ |

표 1 동작자속밀도 1500 gauss 변압기 설계 요약

### 2.2.3 누설인덕턴스 및 분포캐패시턴스 계산

그림 3의 권선 배치에서 변압기의 누설인덕턴스는 식(16)으로 표현된다.[3]이것을 동작자속밀도 변화에따라 계산하면 그림 7과 같이된다.

$$L_l = \frac{0.4 \cdot \Pi \cdot N_p^2 \cdot l_m}{w \cdot s^2}\left[\sum t + \sum \frac{h_p + h_s}{3}\right] \times 10^{-8} \quad (H) \qquad (16)$$

$\sum t$ : 절연지 두께 합, $\sum h_p + h_s$ : 일/이차권선 두께 합
$N_p$ : 일차권선 수 , $l_m$ : 변압기의 자로길이

변압기의 분포 캐패시턴스는 표 1에서 s3와 s4가 1층이므로 권선에서의 캐패시턴스는 무시하고 계산한다. 동작자속밀도가 1500 G로 설계된 변압기에서 누설 인덕턴스, 기생캡시턴스, 공진주파수는 표 2와 같다.

| | |
|---|---|
| 누설 인덕턴스 | 0.33 uH |
| 기생 캐패시턴스 | 500 pF |
| 공진 주파수 | 〉 10 MHz |

표 2 동작자속밀도 1500 G 변압기의 누설인덕턴스, 기생캐패시턴스, 공진주파수 설계값

### 2.3 변압기 파라메타 측정 및 펄스 시험

### 2.3.1 변압기 파라메타 측정

표 1과 같이 설계된 변압기를 그림 7과 같이 제작하여 변압기의 파라메타를 측정하였다.(표 3)

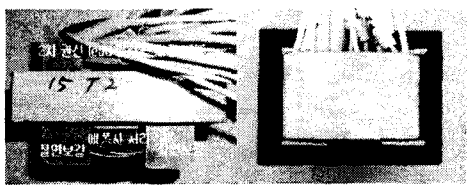

그림 8 제작된 1500 G 변압기

| 동작자속밀도: 1500 G(측정 100 kHz) | | |
|---|---|---|
| 턴 수(p: s1,s2,s3,s4) | 1: 2.17 | |
| Quality Factor(Q) | 〉 115 | |
| | 설계값 | 측정값 |
| 누설 인덕턴스 | 0.33 uH | 2.04 uH |
| 기생 캐패시턴스 | 500 pF | Cw: 0.28 nF |
| | | Cd: 3.12 pF |
| 공진 주파수 | 〉 10 MHz | 4 MHz |

표 3 변압기 시제품의 파라메타 측정

### 2.3.2 변압기 펄스 시험

변압기의 펄스 시험을 위하여 그림 2과 같이 변압기를 고전압 발생회로에 연결하고 변압기 1차에 250 VDC를 100 kHz 풀-브릿지 회로로 스윗칭 하면서 변압기 2차의 각 권선에서 그림 8과 같은 파형을 측정하였다.

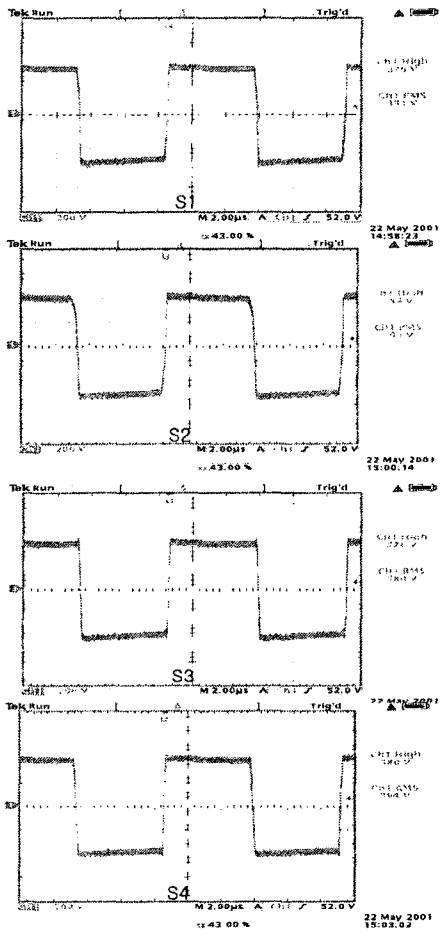


그림 9 변압기 펄스시험 파형

## 3. 결 론

진행파관 고전압전원공급기용 고주파수, 고밀도 고전압 펄스 변압기를 개발하기 위하여 코어, 권선, 절연지 및 동작주파수를 고려한 권선을 선정하였다. 그리고 동작자속밀도에 따른 각 권선의 설계 후 손실 온도상승 및 실제 제작을 고려하여 동작 자속밀도를 결정하였다. 개발된 변압기는 최대 부피가 213.3 $cm^3$이며 동작 주파수에서 누설인덕턴스, 캐패시턴스, 공진주파수등의 파라메타가 우수하였다. 그리고 실제 고전압 전원공급기에 적용한 결과 우수한 펄스재현 특성이 확인되었다.

### [참 고 문 헌]


[1] 김성철 외, "100kHz 고밀도 펄스변압기 설계", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문지 B 권, pp 1283-1285

[2] 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

[3] RALPH E. TARTER, P.E, "SOLID-STATE POWER CONVERSION HANDBOOK", chapter 3, JOHN WILEY & SONS, INC. 1993