

50 kV, 10 kW 소형 고주파 전원장치 변압기 개발

손윤규, 오종석, 장성덕, 조우현
포항공과대학교 가속기연구소

Development of a Compact 50 kV, 10 kW Transformer for High Frequency Switch M

Y. G. Son, J. S. Oh, S. D. Jang, M. H. Cho
Pohang Accelerator Laboratory, Postech

Abstract - We have developed a compact high frequency switch mode converter (HFSMC) power supply with DC 50 kV output voltage and 10 kW output power.

Since the inverter circuit uses 25 kHz res charging scheme, the current is flowing with t kHz. For the efficient output voltage transform performed a simple design process using the transformer principle and the commercial specification.

For the DC 50 kV output, we employed 7 pa windings of secondary coils for the series stac connection of the output with full-bridge rectifi In this paper the design detail and the test re the high frequency transformer together with HFSMC power supply are presented.

1. 서 론

고전압 전원장치는 직렬공진에 의한 full-wave bridg 인버터 방식이 대부분의 회로에서 사용되고 있다. 그림 1은 full-wave bridge 직렬공진 인버터회로를 보여주고 있다. 인버터회로의 IGBT 소자를 병렬로 연결하고 운 전주파수는 50 kHz하여 전력을 변환한다. 또한 이 회로는 고전압 대전류를 얻을 수 있는 것이 특징이다. 소형 고주파 전원장치를 효율적으로 제작하기 위해서는 변압기의 에너지 손실을 최소화하고 동시에 온도상승을 최소화할 수 있는 고주파 변압기 설계 및 제작이 필수적이다. 본 논문에서는 출력 10 kW, 50 kV 동작 주파수 5 kHz인 소형 전원장치의 설계방법과 변압기 이차 출력단 고전압부의 다이오드 선정방법을 보이고자 한다.

2. 시스템의 구성

기본적인 전원장치 구성회로는 그림 2와 같다. 교류 입력단은 3상 전원과 콤팩트 모드, 노멀 모드 EM filter, 과도 써지전류 제한회로, 3상 정류회로와 필터 커패시터로 구성된다. 인버터부는 직렬공진 "H" 브리지 방식에 의한 50 kHz 전류 사인파형 승압변압기에 전력

을 공급하는 스위칭 소자로 구성되어 있다.

고전압 정류부는 고주파 변압기로서 이차측은 다중분할 권선 방식으로 되어있고 고전압 직류전원을 만드는 고전압 다이오드 회로로 구성되어 있다.

교류 입력단의 EMI filter부는 사용전원에 고주파 노이즈가 침투할 경우 콤팩트 모드 노이즈와 노멀 모드 노이즈를 감쇄시키도록 회로가 구성되어있고 전원장치의 인버터부에서 만들어지는 내부 스위칭 노이즈에 대한 차폐를 목적으로 하고 있다. 콤팩트 모드 필터의 경우 감쇄비는 1 MHz에 40 dB 정도이다.

회로차단기 투입시에 입력단 커패시터로 충전되는 동안에 유입되는 높은 써지전류를 제한할 목적으로 콘택터 접점양단에 저항을 삽입하였다. 3상 정류용 필터 커패시터는 인버터 회로가 L-C 직렬공진에 의한 충분한 직류전원으로서 운전될 수 있도록 에너지를 저장하는 역할과 스위칭 중에 손실된 에너지를 보충할 수 있도록 설치하였다. 직렬공진 인버터는 L-C 공진회로와 IGBT 스위치로 구성되어 있다. L-C 직렬공진회로의 임피던스 Z_r 와 공진주파수 f_r 는 각각

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

로 되고 이때 전력 변환비 M은

$$M = \frac{N_p E_o}{N_s E_{input}} = \frac{n E_o}{E_{input}}$$

로 된다.

3. 고주파 변압기

3.1 변압기 설계 변수

전원장치의 회로구성과 설계 변수의 검토가 선행 되고 이를 바탕으로 하여 변압기 사양을 도출할 수가 있다. 본 실험의 전원장치에서는 full-wave bridge 방식 사용하였다. 교류 3상 480V, 60 Hz를 정류하여 직류 변환하여 이 전원을 고주파 스위칭 변압기 일차전원으로 사용하였다. 변압기는 일차와 이차를 절연함과 동시에 고주파 스위칭에 의한 이차로 전달된 스위칭 교류를 정류회로를 거쳐 다시 고전압 직류로 바꾸어 부하전원으로

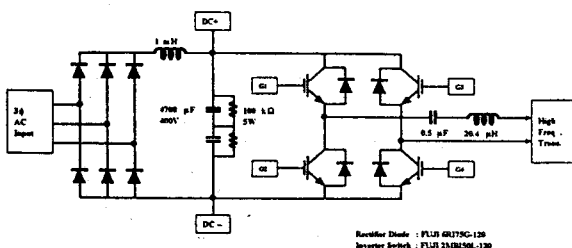


그림 1. 컨버터 전기도면
Fig. 1. Simplified converter schematic

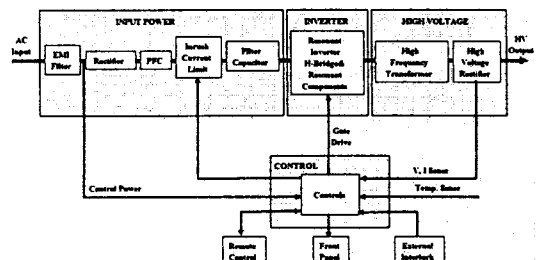


그림 2. 전원장치의 블록 다이어그램
Fig 2. Block diagram of the power supply

사용하게 된다. 이 회로의 부하는 커패시터이며, 일명 커패시터 충전용 전원장치라고 부른다. 커패시터 충전형 전원장치의 펄스변압기를 설계하기 위해 필요한 변수들은 표 1과 같다.

표 1. 펄스 트랜스포머 설계 변수
Table 1. Parameters of transformer design

Design Parameter	Value
Output Voltage (kV)	50
Resonant Frequency (kHz)	50
Peak Charging Rate (kJ/s)	10
Primary AC Voltage (V)	480
Duty	0.9
Voltage Margin	0.43
Period (μs)	20
Switch On Time (μs)	10
Dead Time (μs)	2.2
Switching Frequency (kHz)	45
Filtered Primary DC Voltage (V)	670
Resonant Impedance (Ω)	5.7
Resonant Inductance (μH)	18.2
Resonant Capacitance (μF)	0.56
Max. Power (kW)	25.7
Output Average Current (A)	0.4
Peak Switching Current (A)	238
RMS Switching Current (A)	75.8
Turn Ratio	170.5
Maximum Ambient Operating Temp (°C)	60
Efficiency of the Transformer (%)	99
Efficiency of the Power Supply (%)	85

3.2 변압기 설계과정

고주파변압기 설계에 있어서 중요한 것은 필요한 전력을 충분히 소화할 수 있는 적절한 형태를 지닌 코어를 선택하는데 있다. 코어에 대한 선정방법으로 우선 허용 온도상승과, 최대 자속밀도를 결정한다.

다음으로 주어진 동작주파수와 자속밀도 그리고 허용 온도 상승을 이용하여 변압기에서 허용할 수 있는 최대 전력을 계산한다. 코어의 손실은 최대 자속밀도와 허용 주파수를 이용하여 계산된다. 따라서 변압기의 허용 전력손실로부터 권선에서의 최대 전력손실을 구할 수 있다. 사용전압을 결정한 다음 변압기의 일차 권선수와 이차 권선수를 계산한다.

권선에서 최대동손을 기준으로 일차측과 이차측의 권선의 크기, 길이, 권선층의 형태를 결정하고 전체 동손이 예상되는 온도범위내에 있는가를 확인한다. 코어선정에 있어서의 유효전력 P_{VA} 은 아래와 같다.

$$P_{VA} = \frac{A_w A_e B_{max} f}{0.68 d_w \times 10^{-8}} \text{ [W]}$$

- A_e : 코어의 단면적(cm^2)
- A_w : 코어의 창면적(cm^2)
- B_{max} : 자속밀도(G)
- f : 운전주파수(Hz)
- d_w : 1차측에 사용하는 권선의 단면적(cm^2)

고주파변압기는 코어 자체의 전력손실이 작고 자속밀도가 큰 페라이트계 코어를 사용하여야 하며 유효전력을 충분히 소화할 수 있는 것을 선택한 후 최대 자속밀도가 포화 자속밀도를 넘지 않는 범위 내에서 히스테리시스에 의한 전력손실을 감안하여 선정한다.

여기서는 AlliedSignal사의 AMCC-500 코어를 선택하였다. 표 2는 변압기 설계에 필요한 코어의 사양을 정리하였다.

표 2. AlliedSignal AMCC-500 코어의 사양
Table 2. Core specifications of AlliedSignal AMCC-500

Parameter	Symbol	Unit	Value
Core Area Product	$A_w A_e$	cm^4	384.2
Magnetic Path Length	lm	mm	35.6
Cross-section	A_c	cm^2	11.3
Weight	Wt	gms	2900
Effective Surface Area	SA	cm^2	854.5

그림 3은 코어재질의 동작주파수에 따른 자속밀도와 코어손실의 변화를 보여주고 있다. 최대 자속밀도는 1500 Gauss로 코어의 $A_w A_e$ 를 계산해 보면 299.2 cm^2 가 된다. 펄스변압기의 전력손실 P_{tot} 과 변압기 온도상승 ΔT 는 다음과 같다.

$$P_{tot} = (P_p / \eta t) - P_p \text{ [W]}$$

$$\Delta T = (P_p \text{ [mW]} / SA \text{ [cm}^2])^{0.833} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

P_{tp} : 정격용량 [W]

ηt : 변압기 효율 [%]

SA : 변압기 표면적 [cm^2]

식에 의해 계산된 변압기 표면적은 854.5 cm^2 이고 ΔT 가 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 이면 계산된 손실은 40.73 W 가 된다. 이 손실을 40.73 W 이하로 유지하려면 변압기 온도상승을 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 이내로 유지해야 한다.

변압기 전체손실은 코어손실과 권선의 동손이 모두 포함되었으며 코어손실은 B가 0.15 Tesla일 때 14 W 로 산되고 권선의 동손은 26.73 W 로 제한된다. 변압기 설계의 다음단계로는 변압기의 권선수를 구해야 한다. 일차 권선수 N_p 는 다음과 같다.

$$N_p = \frac{V_{pmin} \times d_{max} \times 10^4}{\Delta B_{max} \times A_{emin} \times f_{sw}} \text{ [Turn]}$$

계산에 의해 구한 일차 권선수는 44.27 Turn 이고 전

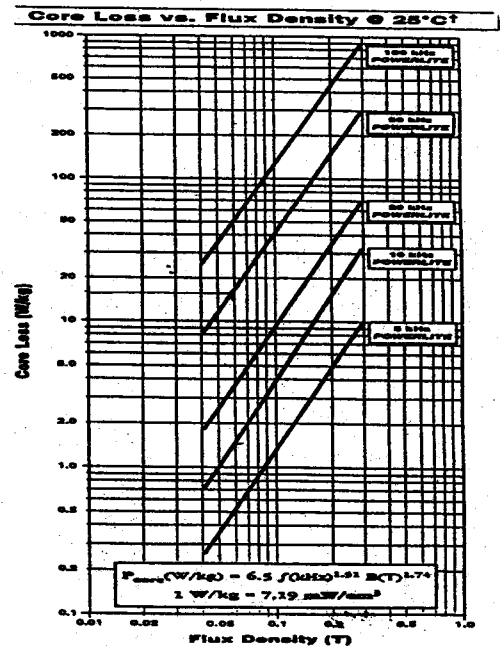


그림 3. 동작주파수에 따른 자속밀도 대 코어손실의 변화
Fig. 3. Core loss vs. flux density

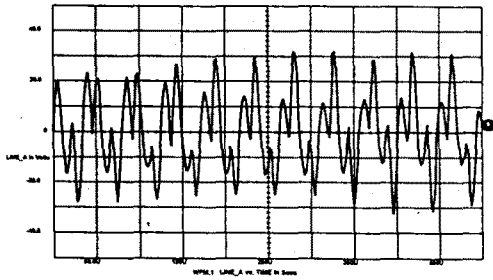


그림 4. 저전압 운전시의 컨버터 공진전류파형
Fig. 4. Converter resonant current waveform operat low voltage

비에 의한 이차 권선수는 3593 Turn이다. 이차측은 고전압이 유기되므로 중간 절연을 고려하여 7 단으로 나누어 분할권선을 하였다. 각 단수의 권선수는 513 Turn으로 하여 직렬로 결선하였다. 권선층의 배열은 코어 - 일차권선 - 이차권선(직렬 다중권선) 방식을 채택하였다. 일차권선의 총길이(MLT1)와 이차 권선의 총길이는 각각 5.45 m, 937.22 m로 된다. 권선 저항의 단위는 Ω 이며 권선 길이당의 저항은 아래의 식으로 나타 낼 수 있다.

$$R_{unit} = \frac{\rho}{A_x}$$

$$\rho = 1.724 \times [1 + 0.00429(T - 20)] \times 10^{-6}$$

A_x : 권선의 단면적, ρ : 온도저항

그림 4는 전산모사에 의한 변압기 일차측의 직렬공진에 의한 공진전류의 파형을 나타낸 것이고 이때 흐르는 전류는 30A 이다. 변압기 일차측 권선에는 리프(Litz) 전선을 사용하여 근접효과에 의한 AC저항 대 DC 저항의 비(R_{ac}/R_{dc})를 최소화 할 수 있게 하였다.

이차측 권선에는 0.5 mm 에나멜 동선을 사용하여 결선 하였고 중간절연에는 0.2 mm의 마일라 필름을 사용 하였다.

4. 고전압 다이오드 설계

출력 고전압 50 kV로서 고주파변압기 이차측을 승압하는 다중권선으로 분할하여 각각의 권선에 고압다이오드(RUSH104, edi사)를 직렬결선 한다.

이차측의 고전압 결선방식을 다중으로하여 사용하는 경우 하나의 권선방식의 경우에 비해 자기 커패시턴스와 이차측 인덕턴스에 의한 기생공진에 의한 효과를 감소시

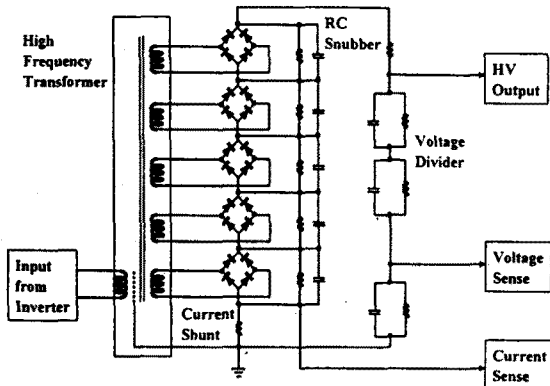


그림 5. 고전압 발생부
Fig. 5. Schematic diagram of high voltage section

키고 간단한 다이오드 회로로서 이루어진다. 각각의 권선 전압은 7600 V로 전파정류로서 고전압다이오드 브리지형태이다. 정류회로의 결선은 정류전압을 직렬로 연결하여 최종출력전압은 50 kV 이다.

출력전압을 저항으로 분압하여 낮은 아나로그 신호로 검출하고 계환회로에 공급된다. 전류신호는 고전압 리턴회로에 저 저항을 삽입하여 검출된 전압신호로 공급된다. 그림 5는 고전압 발생부분의 전기적인 회로도를 나타내고 있다.

그림 6 과 그림 7은 전산모사에 의한 모의시험 파형과 실제동작 측정을 비교 분석한 것이다.

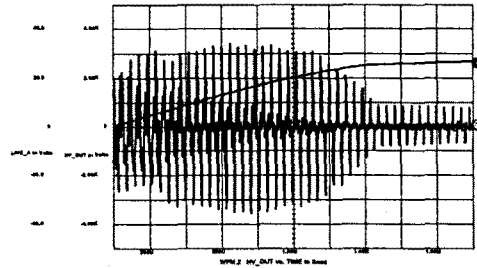


그림 6. 컴퓨터 전산모사 전압, 전류파형
Fig. 6. Computer simulation of voltage current waveform

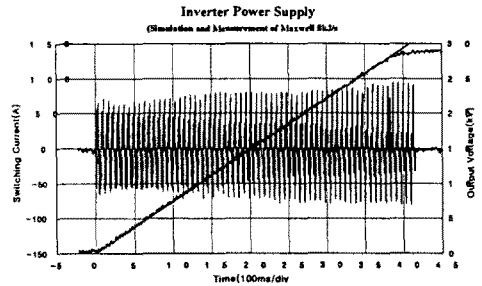


그림 7. 출력 전압 파형 및 공진전류파형
Fig. 7. Output voltage waveform

5. 결 론

50 kV 10 kW 고전압 소형 고주파 전원장치의 변압기를 설계하기 위해서 사용하는 전원장치의 사양을 결정하고 부하특성을 고려한 전류, 정격전압을 만족하는 고전압적이고 일반적인 방법을 사용하였고, 설계를 바탕으로 컴퓨터 전산모사를 수행하였으며 제작을 거쳐 실험적으로 검증하였다. 변압기의 최적화를 위해서 부하커패시터의 용량에 의한 충전시간의 측정 및 코어의 특성곡선 측정에 대한 연구, 특수형태를 가진 필스변압기 설계에 대한 연구가 필수적이다.

[참 고 문 헌]

- (1) Ralph E. Tarter, P.E., "Solid-State Power Conversion Handbook", 1993
- (2) Marty Brown, "Power Supply Cookbook", 1994
- (3) Colonel Wn. T. McLyman, "Transformer and Induc Design Handbook", Marcel Dekker, Inc., NY, USA
- (4) AlliedSignal Catalog, "High Power Switched Mode Transformer Design"