

# 대출력 고전압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구

論文  
51B-11-5

## Study on the High Power and High Voltage 35 kW, 50 kV Inverter Power Supply

孫 鎰 奎\* · 張 成 德\*\* · 吳 宗 錫\*\*\* · 趙 武 顯§  
(Yoon-Gyu Son · Sung-Duck Jang · Jong-Seok Oh · Moo-Hyun Cho)

**Abstract** - A capacitor-charging power supply using high frequency inverter technology is strongly recommended for the charging section of the pulsed power supplies. A high frequency inverter switching makes the overall system size small. The command-charging feature can guarantee the higher reliability of switching function. The protection circuit can be easily included in the system and the good regulation of charging voltage can be achieved by the feedback system. Several modules can be stacked to supply required output power and a failed module can be easily replaced. A 50-kV, 35-kW capacitor charging power supply is developed. In this paper the detailed design and test results of a prototype unit are presented.

**Key Words** : Capacitor-charging power supply, High frequency, High voltage

### 1. 서 론

높은 반복율을 이용한 펄스파워 방전회로는 레이저 발생 장치나 플라즈마 이온주입, 마이크로파 발생 및 고전압 방전 공정등에 사용된다. 방전회로에 사용되는 전원장치는 지령 충전이 가능해야되고 빠른 시간 내에 에너지 저장용 캐패시터를 충전할 수 있는 정전류 전원을 필요로 한다. 또한, 단락부하에 대한 보호기능이 용이해야 하고 전원장치의 부피를 줄여 콤팩트하고 표준랙에 장착되는 구조이면서 높은 전력을 가져야하며 병렬연결 확장이 가능해야 한다. 고전압 전원안정화는 필수적이며 쉽고 간단하면서도 유연한 제어가 되어야 한다. 캐패시터 충전전원은 고전압 승압 트랜스포머와 정류용 다이오드, 직렬공진회로, 인버터회로를 탱크 내에 수납하는 구조로 하고 냉각매체로 절연유를 강제 순환하는 독립적인 폐회로로 구성하였다. 소형이면서 높은 출력을 갖는 고전압 인버터전원장치의 회로에서 전력으로 변환되지 않고 발생하는 자체스위칭손실 및 각각의 부품에 대한 소비전력을 계산하고 열 교환기의 인입, 인출온도를 측정하여 장치의 전체 손실 량과 비교하였다. 출력전원의 품질과 안정도를 높이기 위해 제어회로에 Refresh 기능을 추가하고 최대 50 kV 출력전압에서  $\pm 0.5\%$  이내의 출력전압제어가 가능하도록 하였다. 본 논문에서는 직류고전압 출력용 인버터 전원장치의 설계, 제작 및 실험을 통해 얻어진 결과를 소개하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 고전압 인버터 전원장치 구성 및 설계

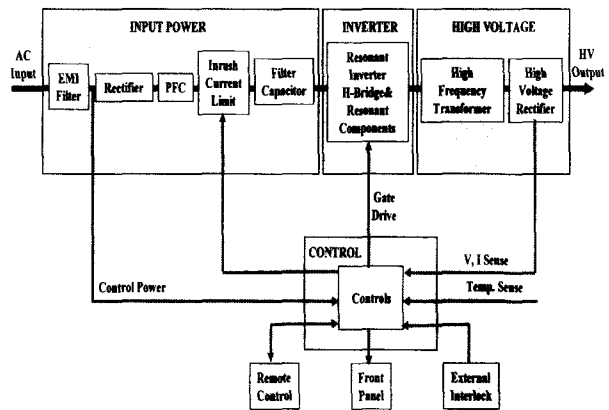


그림 1 전원장치의 블록 다이어그램.  
Fig. 1 Block diagram of Power supply

인버터를 이용한 고전압 전원장치의 시스템 블록 도는 그림 1에 표기하였다. 장치의 구성은 교류전원 정류부, 인버터부, 고압출력부, 제어부 및 냉각시스템으로 구성되어 있다. 교류전원의 정류부는 3상 480 V를 사용하며 콤팩트모드와 노멀모드 EMI filter, 과도 돌입전류 제한회로, 3상 정류회로와 필터 캐패시터로 직류전원을 공급하도록 설계되었다.[1][2] 인버터부는 full-bridge를 이용한 "H" 브리지 방식의 회로로 구성되었으며 스위칭 주파수는 50 kHz로 설계되었다. 고전압 출력부는 2차측이 다중분할 권선으로 설계된 고주파 변압기와 정류용 고속 고전압다이오드, 전압, 전류측정용 센서 회로로 구성되었다.

\* 正 會 員 : 慶一大學 電氣工學科  
\*\* 正 會 員 : 東亞大學 電子工學科  
\*\*\* 正 會 員 : 서울大學 原子核工學科 · 工博  
§ 正 會 員 : 浦項工大 物理學科 教授 · 理博  
接受日字 : 2001年 10月 6日  
最終完了 : 2002年 8月 28日

냉각시스템은 인버터부와 고압출력부를 동일한 탱크 내에 수납하였고 강제순환방식으로 절연유의 냉각계통을 설계하였다. 인버터 전원장치에서 부하회로 단락 시 고주파 변압기 인덕턴스 값은 1차 측 누설 인덕턴스만 존재하게되고, 이 값은 1차 공진회로에 영향을 미친다. 직렬 공진회로 설계시 최대전력은 식(1)과 같이 표현된다.

$$P = f_0 E_0 \quad [W] \quad (1)$$

$f_0$  : 공진주파수

여기서  $f_0$  는 공진 주파수, 그리고  $E_0$ 은 공진 펄스 당 에너지로서  $E_0 = 0.5C_R(2V)^2$ 이며,

공진회로의 공진 주파수는  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [Hz]$ , 임피던스는  $Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega]$ 이다. 전원장치의 부하 캐패시터  $C_L$ 에 목표로 하는 전압  $V_T$ 를 충전시간  $t_c$ 로 충전할 때의 최대전력은 식 (2)과 같이 표현되며, 평균출력은 식 (3)과 같다.

$$P_{CH} = \frac{C_L V_o^2}{2t_c} \quad [J/s] \quad (2)$$

$C_L$ : 부하캐패시터  
 $V_o$ : 출력전압  
 $t_c$ : 충전시간

$$P_{AV} = \frac{1}{2} C V_o^2 f_0 \quad [W] \quad (3)$$

부하캐패시터 충전시의 최대전류는 식(4)과 같다.

$$I_{max} = \frac{2 \times P_{CH}}{V_o} \quad [A] \quad (4)$$

이상의 관계식으로부터 시스템 설계를 위한 기본 파라메타를 선정하고 인버터회로의 공진회로 임피던스와 공진인덕터와 공진 캐패시터를 계산할 수 있다. 부하 캐패시터의 용량을 선정하 다음 컴퓨터 전산모사를 이용한 인버터 공진회로 동작시 공진회로에 흐르는 전류 값으로 출력이 목표로 하는 전압까지를 충전하였을 때 시간을 구한 다음 인버터 공진기의 임피던스 값을 재 수정하여 찾고 공진인덕터와 공진 캐패시터의 값과 고주파변압기의 권수 비를 조정하였다. 부하캐패시터에 따라 최초 설계 시에 선정하 공진회로의 변수 값의 차이가 상이할 수 있으므로 운전 가능한 조건 혹은 운전시의 동작특성을 예측할 수가 있다.

## 2.2 고주파 공진형 인버터회로

교류 3상 전원을 정류하여 에너지저장용 캐패시터(2개직렬)에 저장하고 인버터 직류전원으로 사용하였다. 에너지 저장용 캐패시터뱅크를 기준으로 상, 하로 나누어 두 개의 전원으로 분리하여 각각의 인버터 회로 전원으로 사용하였다. 캐패시터 뱅크전원은 2조 병렬로 된 인버터회로의 전원으로 공급된다. 상, 하 직류전원에 열결된 두 개의 H-Bridge회로

는 병렬로 동작되고 각각의 독립된 4개의 회로가 직렬공진이 일어나도록 설계되어있다. 고주파 변압기 1차는 병렬권선으로 되고 공진캐패시터와 각각직렬로 접속되어 공진이 일어나고 공진 주파수는 변압기 leakage inductance와 공진 캐패시터에 의해 정해진다. 상, 하 두 직류전원은 직렬접속으로 두개의 뱅크로 나뉘어져 있어 병렬운전 시 인버터회로 동작시 스위칭에 의한 공진 전류와 귀로 하는 전류를 콤팩트 모드형 필터를 거치게 하여 임피던스 차에 의한 불평형 전압 및 전류를 고려하여 전류평행이 이루어지도록 그림 2와 같이 2조 회로에 Balun을 설치하여 서로 상쇄가 일어나도록 하였다. 인버터회로의 H-Bridge 스위치로는 fast IGBT (APT100GF60JRD, APT사) 16개를 조합하여 회로를 구성하였다. 고주파변압기 1차 권선은 litz wire를 사용하였고 2차 권선은 Foil 전선을 사용하였다. 그림 2는 인버터 전원장치의 H-Bridge 회로이다.

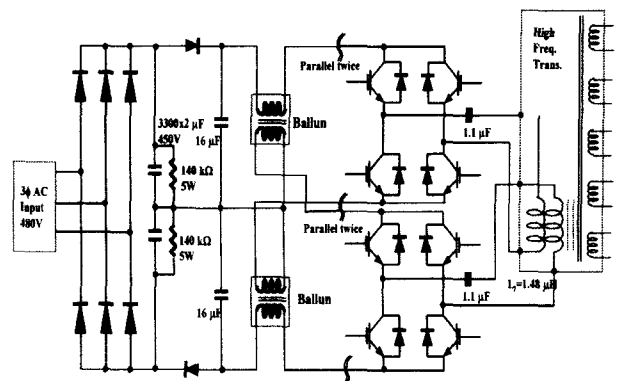


그림 2 인버터전원장치의 전기회로도.

Fig. 2 Electrical circuit of inverter power supply

## 2.3 동작원리

동작원리를 설명하기 위해 4개의 병렬회로를 1개의 등가회로로 구성하고 다음과 같은 초기조건을 가정한다. 필터 콘덴서  $C_F$ 와 buffer 콘덴서  $C_B$ 의 전압은 맥동이 없다고 가정한다. 그림 3과 4는 직렬공진 single stage full bridge 컨버터의 스위치  $S_1-S_4$ , 다이오드  $D_1-D_4$ , 공진인덕터  $L_s$ , 그리고 공진 콘덴서  $C_s$ 와 고전압 변압기, 출력직류전압 정류기, 부하 콘덴서  $C_L$ 을 나타내었고, 그림 5는 컨버터 제어신호와 고전압변압기 1차측 양단전압 파형이다. 인버터부의 회로는 DC-AC로 변환하여 승압용 고전압변압기 1차측에 공급된다. 부하 콘덴서에 충전되는 전류는 고전압 승압용 변압기 2차측 정류다이오드에 흐르는 전류이다.  $S_1, S_3$ (혹은  $S_4, S_2$ )이 turn-on 되어있는 mode 0(혹은 mode 2)과  $S_4, S_2$ (혹은  $S_1, S_3$ )가 turn-on 되어있는 mode 0(혹은 mode 3)은 powering mode로 동작한다.[8]

### MODE 1 ( $t_0-t_1$ ) $S_4-S_2$ on, $S_1-S_3$ off

$t_0$ 에서 스위칭소자  $S_2-S_4$ 가 turn-on되면 필터 콘덴서와 buffer콘덴서의 직류전원이 공진 콘덴서  $C_s$ 를 충전하고 공진 인덕터  $L_s$ 와 고주파승압변압기 1차를 환류하는 전류가 흐른다. 이때 인버터전압  $V_{ab}$  양단의 전압은  $+V_{BUS}$  되고 스위치  $S_4-S_2$ 와 공진회로를 통과하는 공진전류 IR은 방향은 정(+)

방향의 전류가 흐른다. 인버터의 제어신호가 있는 구간 동안 스위치에는 공진 주파수의 반주기만큼 전류가 흐르게 되고 전류가 0가되면 이 Mode는 끝난다. 고주파변압기 고압권선에 병렬로 접속된 정류다이오드에 정방향의 전류가 흐르게 되고 부하 콘덴서  $C_L$ 에 초기전압을 충전하게 된다.

**MODE 2 ( $t_1-t_2$ )  $S_4-S_2$  off,  $S_1-S_3$  off**

$t_1-t_2$ 시간동안 스위치  $S_2-S_4$ 가 turn-off되고, 공진 콘덴서에 충전된 에너지가  $D_2-D_4$ 를 통해서 귀로 하는 전류가 흐른다. 이때 인버터 양단의 전압  $V_{ab}$ 는  $+V_{BUS}$ 로 되고 스위치와 병렬로 접속된 freewheeling diode에는 귀로 하는 부(-)방향의 공진전류가 고주파 변압기의 1차측권선, 공진인덕터, 공진 콘덴서를 통해서 buffer cap으로 역 충전이 된다. 고주파변압기 고압권선에 유기되는 전압이 방향은 역 방향으로 되고 역 방향의 전류는 정류다이오드를 거치면서 정방향의 전류가 흘러 부하 콘덴서  $C_L$ 에 정방향의 전압을 충전하게 된다.

**MODE 3 ( $t_2-t_3$ )  $S_1-S_3$  on,  $S_2-S_4$  off**

$t_2-t_3$ 시간동안  $S_1-S_3$ 스위치가 turn-on되고 mode 1에서의 동작과 반대로 되며 인버터 전압  $V_{ab}$ 는  $-V_{BUS}$ 로 되어 공진회로에 흐르는 전류는 스위치  $S_1-S_3$ 과 공진회로에 흐르는 공진 전류의 방향은 부(-)방향이 된다. MODE 1에서 공진회로의 공진 콘덴서에 충전된 전압은 방향이 반대로 되어 인버터전압의 2배로 충전되고 공진회로에 흐르는 전류도 2배로 된다. 초기에 이런 현상은 5-6회 정도 생기고 시간이 경과함에 따라 안정화된다. 고주파변압기 고압권선에 흐르는 전류방향이 부방향이 되어 정류다이오드를 거치면서 정방향의 전류로 바뀌고 부하 콘덴서에 충전되는 전압은 정방향이 된다.

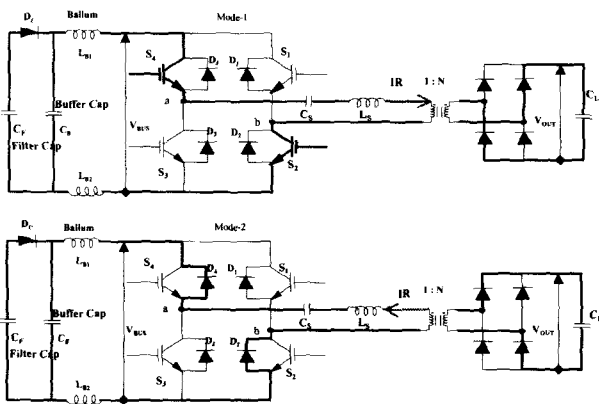


그림 3 인버터 콘트를  $\varphi A$  신호 인가시의 동작MODE  
Fig. 3 Operation mode of inverter for impression of  $\varphi A$  control signal

**MODE 4 ( $t_3-t_4$ )  $S_1-S_3$  off,  $S_2-S_4$  off**

$t_3-t_4$ 시간동안은 스위치  $S_1-S_3$ 이 turn-off 되고 공진 콘덴서에 충전된 에너지가  $D_4-D_2$ 로 통해서 귀로 하는 전류가 공진주파수 반주기동안 흐른다. 인버터전압  $V_{ab}$ 는  $-V_{BUS}$ 로 되고  $D_2$ , 고주파변압기 1차권선, 공진 콘덴서,  $D_4$ 에 흐르는 공진전류는 부방향의  $-IR$ 의 전류가 흐른다. 고주파 변압기 고압권선에 병렬로 연결된 정류다이오드를 통해서 정방향의 전류로 되고 부하 콘덴서에는 전압이 충전된다.

그림 3은 인버터 콘트를  $\varphi A$  신호인가시의 동작모드를 나타낸 것이고, 그림 4는  $\varphi B$  신호인가시의 동작모드를 나타낸 것이다. 고전압을 만드는 인버터회로는 MODE 1에서

MODE 4를 반복적으로 동작하며 목표로 하는 전압에 도달할 때까지 인버터의 제어신호를 인가하게된다. 인버터회로에서 출력전압을 만드는 정류다이오드와 부하 콘덴서에 충전되는 전압의 크기는 정류다이오드에 흐르는 전류의 크기에 비례한다. MODE 1과 MODE 4, MODE 2-MODE 3에서 인버터전압  $V_{ab}$ 는 극성이 반대로 되지만 출력 측에 흐르는 전류의 방향은 정(+)방향으로서 동일하다.[8]

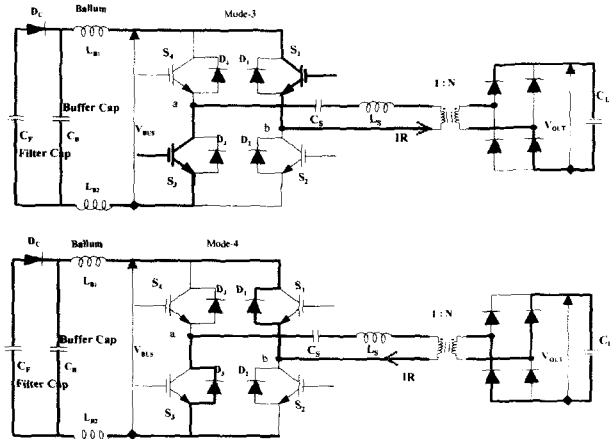


그림 4 인버터 콘트를  $\varphi B$  신호 인가시의 동작MODE  
Fig. 4 Operation mode of inverter for impression of  $\varphi B$  control signal

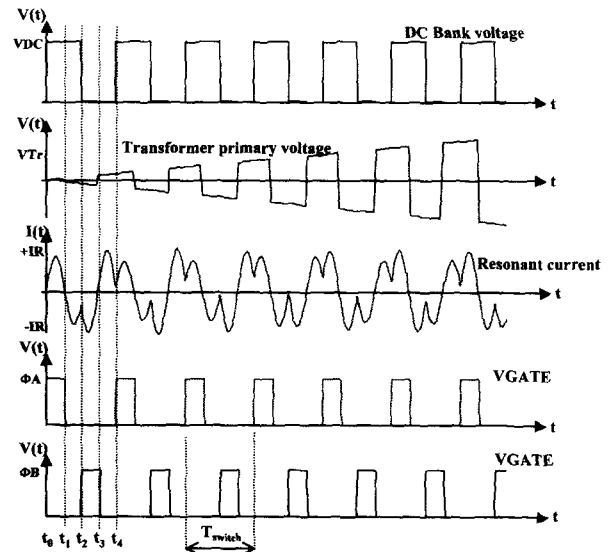


그림 5 컨버터 제어신호 및 변압기 양단전압  
Fig. 5 Control signal of converter and voltage across transformer

**2.4 제어회로**

인버터전원장치의 효율적인 운전과 전력의 품질을 결정하는 제어회로가 이 장치의 핵심이다. 그림 6은 부하 캐패시터에 충전되는 전압 파형과 제어신호와의 관계를 보여주고 있으며 출력금지구역인 inhibit신호와 충전이 완료되었을 때 전원장치에서 출력하는 EOC(end of charging)신호, 방전이 완료되고 얼마간 출력을 금지하는 auto dwell신호를 나타내고 있다.

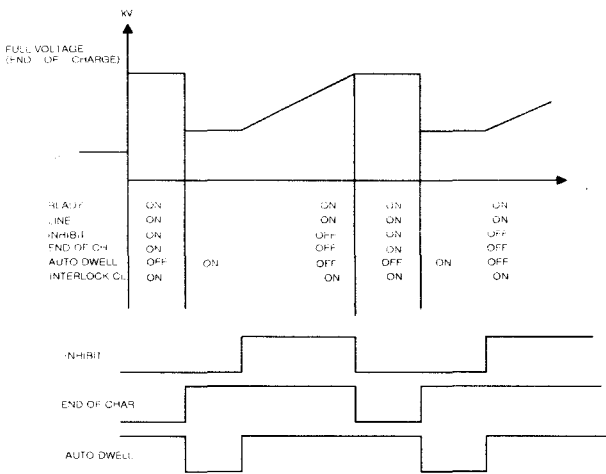


그림 6 인버터 전원장치 운전모드.  
Fig. 6 Operation mode of inverter power supply

부하 캐패시터의 용량의 크기에 따라 충전소요 시간이 달라지게 되며, 목표전압에 도달하여 유지하는 시간이 길수록 부하 캐패시터에 저장된 에너지의 누설이 생기고 이에 따라 전압이 줄어들게 된다. 피드백 제어에 의해 저하된 전압만큼을 전원장치가 재충전 하게된다. 정전류 전원장치의 경우 출력전류가 일정하고 짧은 시간동안 충전이 이루어지기 때문에 정밀한 제어가 이루어지지 않을 경우 목표전압 이상으로 과 충전이 이루어질 수 있다. 개발된 본 전원장치는 refresh mode 기능을 내장하고있어 출력전압을 일정하게 유지하는 기능을 제공하고 있다. 또한 Inhibit와 Auto dwell 기능을 삽입함으로써 전원장치의 안정성을 높였다.

인버터 전원장치에 채용된 인터록 종류로는 운전 중에 정상적인 동작상태를 표시하는 Operating status 인터록, 인버터부에 공급되는 전원상태를 나타내주는 Input power 인터록, 그리고 고전압 승압을 위한 HV Tank내부와 출력 및 부하에 관계된 High voltage 인터록 등 세 그룹으로 구분되어 있다. 기능상 중요한 인터록을 살펴보면 Excess Reversal 인터록은 부하와 임피던스 매치가 되지 않아 전원장치로 반송되어오는 전압과 전류를 감시하여 기준 값보다 높을 경우 출력을 차단한다. Over Load 인터록은 회로가 단락 되어 있거나 부주의로 인하여 외부에 큰 용량의 캐패시터를 연결하여 초기 운전시 출력 측의 전류가 500 ms 이상 흘렀을 때 동작한다. 초기충전시는 80 % Duty cycle 이상의 충전주기를 갖는 부하에 대해서도 동작한다. Open Circuit 인터록은 고압측 출력단이 개방되어 200 μs 동안 최대출력전압으로 동작시 회로를 차단하도록 되어있다.

## 2.5 고전압 출력회로

### 2.5.1 고주파 변압기

고주파 인버터전원장치를 효율적으로 사용하기 위해서는 회로의 에너지 손실을 최소화하고 동시에 소형화할 수 있는 고주파변압기 설계 및 제작이 필수적이며, 고주파변압기 설계에 있어서 중요한 것은 최소의 와전류 손실과 필요한 전

력을 충분히 소화할 수 있는 적절한 형태를 지닌 코어를 선택하는데 있다. 코어의 선택 및 트랜스의 설계는 다음과 같이 하였다. 주어진 동작주파수와 자속밀도 그리고 허용온도 상승을 이용하여 변압기에서 허용할 수 있는 최대전력을 계산한다. 코어의 손실은 최대 자속밀도와 허용주파수를 이용하여 계산하면 된다. 따라서 변압기의 허용전력손실로부터 권선에서의 최대 전력손실을 구할 수 있다. 사용전압을 결정한 다음 변압기의 일차 권수 비와 이차 권수 비를 계산한다. 권선에서 최대동손을 기준으로 일차 측과 이차 측 권선의 크기, 길이, 권선 층의 형태를 결정하고 전체 동손이 예상되는 온도범위 내에 있는가를 확인한다. 선택할 코어의 사이즈 및 자기특성 파라메타를 이용한 유효전력 ( $P_{AV}$ )은 공학 경험식인 식(5)를 이용하여 계산할 수 있다 [3][4][5][6][7].

$$P_{AV} = \frac{A_w A_e B_{MAX} f}{0.68 d_w \times 10^8} [W] \quad (5)$$

단,  $A_e$ 는 코어의 단면적,  $A_w$ 는 코어의 창면적,  $B_{max}$ 는 최대자속밀도,  $f$ 는 운전주파수, 그리고  $d_w$ 는 1차 측에 사용하는 권선의 단면적을 나타낸다. 고주파 변압기는 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. 본 장치에서는 TDK사의 PE22UU 120×160×20코어를 선택하였다. 표 1에 변압기 설계에 필요한 코어의 사양을 정리하였다. 공진 주파수를 결정하는 중요회로변수로서 변압기의 누설 인덕턴스는 식(6)으로 표현된다[4].

표 1 TDK PE22UU 120×160×20 코어 사양.  
Table 1 Specification of TDK core (PE22UU 120 × 160 × 20)

Parameter	Symbol	Unit	Value
Core Area Product	$A_w A_e$	cm <sup>4</sup>	720
Magnetic Path Length	lm	mm	414
Cross - section	$A_e$	cm <sup>2</sup>	12
Weight	Wt	gms	2400
Effectice Surface Area	SA	cm <sup>2</sup>	1112

$$L_L = 4\pi N_p^2 U_m (\Delta g + \Sigma \delta i) / L_m [nH] \quad (6)$$

여기서,  $N_p$ 는 1차측 권수  $U_m$ 은 권선길이  $\Delta g$ 는 1차권선과 2차권선사이의 거리  $\Sigma \delta i$ 는 권선두께  $l_m$ 은 권선 길이이다. 본 연구에서 제작된 고주파변압기의 누설 인덕턴스는 계산치가 1.34 μH이었으며, 제작 후 측정결과는 1.48 μH이었다. 인버터 전원장치의 정상적인 운전 시 1차측 권선에 흐르는 공진 전류는 528 A 가되며 사용된 1차 권선은 type5 litz wire 6(5×20/40) 전선을 사용하였다. 1차 권선은 litz wire 4가닥으로 병렬권선을 하였다. 변압기 온도상승은 60℃로 설계되었으며 코어손실과 동손을 포함한 것이다.

그림 7은 설계된 고주파 변압기의 단면을 보여주고 있다. 고주파변압기는 Ferrite core안쪽에 litz wire로 1차를 권선하고 HV rectifier diode를 실장한 PCB사이에 보빈을 이용하여 foil전선으로 flat "pancake" coil을 12층으로 2차 권선

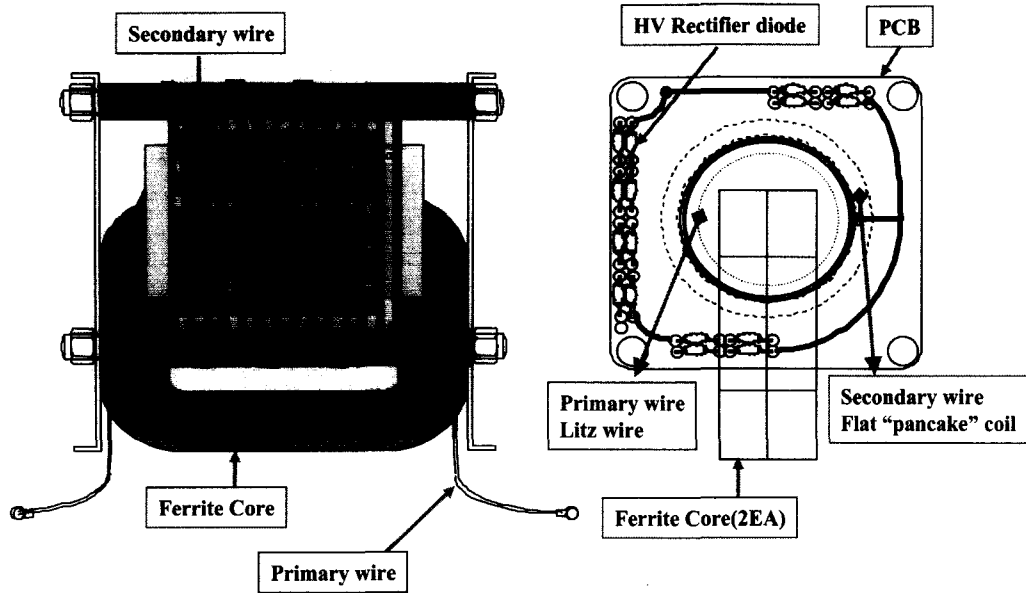


그림 7 고주파 변압기 측면도.  
Fig. 7 Side view of high frequency transformer

을 하였다. 또한, 1차 권선과 2차 권선 사이에는 혼촉방지를 목적으로 faraday shielding을 하였다. 고전압 출력 정류다이오드는 VMI사의 Z50FG Diode를 192개 사용하였다. Axial Leaded type의 소형다이오드로 역내전압 5 kV, 1 A이며 각각 16개의 다이오드를 조합하여 Bridge회로로 구성하고 이것을 12단 직렬 연결하여 최종출력을 내도록 하였다.

2.5.2 냉각 시스템

인버터 전원장치는 효율이 약 90% 정도이며 나머지 10%는 실제 전력으로 변환되지 않는 열 손실로서 효율적인 냉각시스템의 설계가 필요하다. 회로 대부분의 전력손실은 스위칭소자와 고전압 승압변압기에서 일어난다. 시스템의 효율적인 냉각을 위해 강제순환에 의한 공냉식으로 설계를 하고 냉각매체로는 절연유를 사용하였다.[2] 강제순환 공냉식에 적용된 열 교환기는 LYTRON사의 ES0714G14를 사용하였다. 열 교환기는 유로 압력손실을 적게 하면서 열 전달 표면적을 크게 하기 위해 관로 내벽에 방열판이 부착된 것으로 그림 8과 같다. 냉각기의 설계는 LYTRON사의 데이터를 근거로 하여 외기 공기온도 30℃를 기준으로 최고 절연유 온도는 60℃ 하여 최소 오일순환유량은 11.25 l/min로

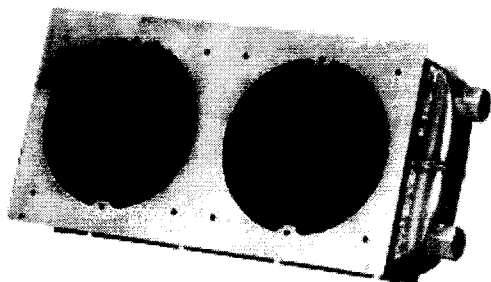


그림 8 순환 공냉식 열 교환기(LYTRON, ES0714G14).  
Fig. 8 Heat exchange with air cooling(LYTRON, E0741G14)

선정하였다.

2.6 실험

본 전원장치의 실험은 평균출력 37.5 kJ/sec로하여 200 nF의 정전용량을 갖는 부하에 대해 출력전압설계최대치인 50 kV로 충전하는 실험하였다. 부하 캐패시터에 충전 실험 파형은 그림 9와 같고 Ch-A는 출력 전압 파형이며 Ch-B는 인버터 공진 회로에 흐르는 전류 파형이다. 인버터 전원장

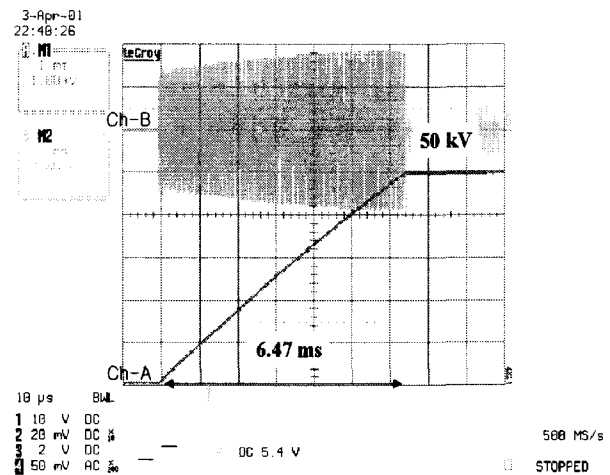


그림 9 공진 충전 시의 공진 전류 및 출력 전압 파형.  
(Ch-A ; 출력전압 X : 1 ms/div, Y : 10 kV/div)  
(Ch-B ; 공진 1차전류 X : 1 ms/div, Y : 230 A/div)  
Fig. 9 Resonant current and output voltage waveform during resonant charging (Ch-A; Output voltage X : 1 ms/div, Y : 10 kV/div) (Ch-B; Primary resonant current X : 1 ms/div, Y : 230 A/div)

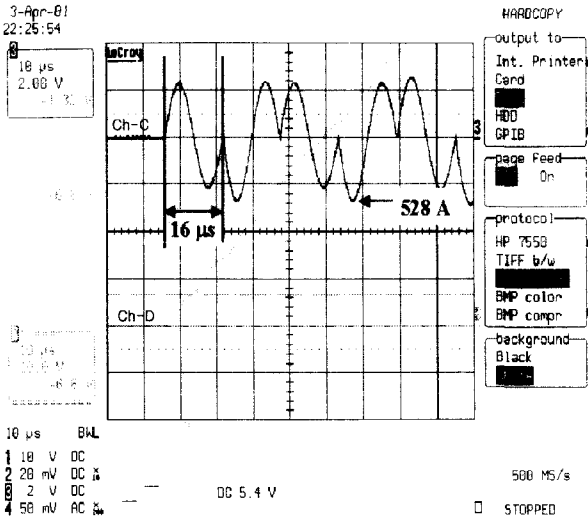


그림 10 인버터 1차 공진회로 전류 및 출력 전압 파형.  
 (Ch-C : 1차전류 X : 10  $\mu$ s/div Y : 264 A/div)  
 (Ch-D : 출력전압 X : 10  $\mu$ s/div Y : 100 V/div)

Fig. 10 Resonant primary current and output voltage waveform of inverter (Ch-C: Primary current X : 10  $\mu$ s/div, Y : 264 A/div) (Ch-D : Output voltage X : 1  $\mu$ s/div, Y : 100 V/div)

표 2 인버터 전원장치 전력손실.

Table 2 Power loss of inverter power supply

항 목	Power Loss(%)
DC bank	12.8 (620 W)
Switch 소자	33.6 (1.624 kW)
Resonant capacitor	0.8 (40 W)
고주파 변압기전선	15.5 (747 W)
고주파 변압기 코어	0.4 (19 W)
Rectifier diode	36.8 (1.78 kW)
Total power loss	(4.83 kW $\times$ 0.8)=3.864 kW

치의 내구성 시험을 위해 부하와 병렬로 스파크 갭과 저항 (40  $\Omega$ , 1 kW)을 직렬로 연결하여 연속 10 Hz의 스파크발생조건으로 10시간 연속운전을 하였다. 스파크전압은 갭의 간격을 조정하여 단계별로 하여 스파크가 발생하도록 하였다. 그림 10은 인버터전원장치의 충전 전압 파형과 공진회로에 흐르는 전류 파형을 보여주고 있다. 공진회로에 흐르는 전류의 한 주기는 16  $\mu$ s이며 주파수는 62.5 kHz로 관측되었다. 공진 전류에서 정 방향의 반주기는 IGBT소자를 통해서 흐르는 전류이고 부 방향의 반주기는 IGBT와 병렬로 연결된 Diode를 통해서 흐르는 전류이다. 초기 충전시는 IGBT와 Diode를 통해서 흐르는 전류가 평행을 유지하나 부하 캐패시터에 전압이 어느 정도 충전이 되면 IGBT를 통해서만 전류가 흐르고 Diode에는 전류가 흐르지 않는다. 공진이 일어날 때마다 2차측 캐패시터에 전하가 충전되게 되는데 1회 공진충전시 200 nF부하에 대해 약 100 V정도의 전압이 상승된다. 이 전압은 부하 캐패시터가 커지면 충전시 전압 리플은 작아진다. 직렬공진시 (초기충전동안) 1차측에 흐르는 공진 전류는 최대 528 A로 관측되었다. 고전압 탱크



그림 11 제작된 인버터 전원장치 외형도.

Fig. 11 Overview of developed inverter power supply

표 3 인버터 전원장치의 설계파라메타 및 시험결과 비교표.

Table 3 Comparison table between design parameter and test results for inverter power supply

Design Parameter	Design	Test
Output Voltage [kV]	50	50
Resonant Frequency [kHz]	50	63
Peak Charging Rate [kJ/s]	37.5	42.5
Primary AC Voltage [V]	480	480
Duty	0.9	0.9
Load Capacitor [ $\mu$ F]	0.2	0.2
Filtered Primary DC Voltage [V]	324	324
Resonant Impedance [ $\Omega$ ]	1.06	0.57
Resonant Inductance [ $\mu$ H]	3.4	1.48
Resonant Capacitance [ $\mu$ F]	3.01	4.4
Max. Power [kW]	40	42.5
Output Average Current [A]	1.5	1.7
Peak Switching Current [A]	1286	1120
Turn Ratio	245	210
Maximum Ambient Operating Temp [ $^{\circ}$ C]	60	60
Efficiency of the Power Supply [%]	90	90

의 냉각능력 실험은 소모전력 4 kW의 저항 Heater를 사용하여 실험하였다. 외기 공기온도 30  $^{\circ}$ C의 조건에서 오일순환유량을 12 l/min로 하였을 때 탱크 입, 출구 오일 온도차이는 12  $^{\circ}$ C (입구온도 53  $^{\circ}$ C, 출구온도 65  $^{\circ}$ C)로 최대냉각능력은 117.6 W/ $^{\circ}$ C의 결과를 얻었다. 인버터 전원장치의 운전실험에서는 Full 부하로 30분 운전시 탱크내의 오일온도

는 60℃로 유지되는 것으로 확인되었다. 표 2는 시스템의 부분별 전력손실을 퍼센트로 표기하였다.

그림 11은 제작된 인버터 전원장치의 외형을 보여주고 있으며 표준형 19"-Rack에 장착되어있다. 전원장치는 3단으로 구성되어있는데 위로부터 제어부분, 냉각부분, 고전압출력부로 배치되어 있으며 각각 별도의 외함으로 구성하여 유지보수가 모듈화로 이루어지도록 하였다. 표 3은 개발된 고전압 인버터 장치의 설계 파라메타 대비 제작 및 시험운전에서 측정하여 확인된 파라메타를 비교 표시하였다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 최대 출력전압 50 kV, 최대 출력 37.5 kJ/s 급의 공진형 인버터 장치를 개발하였고 완성된 장치의 시험 결과를 보고하였다. 개발된 공진형 고전압 인버터장치는 최대출력 전압 운전시에 ±0.5% 이내의 제어 정밀도를 가지는 것으로 측정되었다. 최대출력 연속운전에서 측정된 시스템의 효율은 90 %이었으며 이때 시스템의 절연 및 냉각겸용 절연유의 온도 상승은 60 ℃로 설계 값을 만족하였다. 개발된 고전압 인버터 장치는 특히 대용량 펄스 모듈레이터의 에너지 저장용 전원으로서 사용함을 목적으로 개발되었다. 펄스 모듈레이터의 운전 특성의 하나로서 대출력 펄스 스위칭시에 강력한 EMI 노이즈의 발생을 수반하게되어 주변 장치에 노이즈에 의한 제어장애의 가능성이 높다. 본 장치에 설계되어 있는 노이즈 방호설계를 검증하기 위해 인버터 출력부에 스파크 갭을 설치하여 최대 운전전압에서 스파크를 초당 10회 정도의 발생률로 장시간 연속 운전하였다. 시험기간 중 노이즈장애에 의한 Fault가 단 한 건도 발생되지 않는 것으로 관측되었다. 현재 이 장치는 전반적인 신뢰성 검증을 위해 1,000 시간 연속운전 시험을 준비하고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 기초과학지원 연구소 G-7 KSTAR프로젝트와 (주)동아하이텍의 부분적인 연구지원을 받았습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 오종석, 조무현, 손윤규, 장성덕 외. "Pulse modulator development for plasma DeNOx/DeSOx system", KIMM 과제보고서, 1996
- [2] 오종석, 조무현, 손윤규, 장성덕 외, "Development of high average power modulstor for Industrial Application of pulsed Corona Process to Flue Gas". RIST 과제보고서, 2000
- [3] Undeland, Tore M./Robbins, William P./Title. "Power Electronics" pp730-792, 1995
- [4] RALPH E. TARTER, P.E. "Solid-State Power Conversion Handbook", 1993
- [5] Marty Brown "Power Supply Cookbook", 1994
- [6] 손윤규 외, "50 kV, 10 kW 소형 고주파 전원장치 변압기 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 F, pp.

2027~2029, 1998.

- [7] 손윤규 외, "대출력 고전압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp.992~995, 2001.
- [8] Aaron C. Lipponcott, "A Capacitor-Charging Power Supply Using a Series-Resonant Topology, Constant On-Time/Variable Frequency Control, and Zero-Current Switching", IEEE Transactions on industrial electronics, VOL.38, NO.6, 1991

## 저 자 소 개



#### 손 윤 규 (孫 鎭 奎)

1964년 4월 2일생. 1998년 경일대 전기공학과 졸업. 1991년~현재 포항공과대학교 가속기연구소 선임기술원  
Tel : 054-279-1148, Fax : 054-279-1199  
E-mail : ygson@postech.ac.kr



#### 장 성 덕 (張 成 德)

1965년 4월 19일생. 1991년 동아대 전자공학과 졸업. 1995년~현재 포항공과대학교 가속기연구소 선임연구원  
Tel : 054-279-1146, Fax : 054-279-1199  
E-mail : sdjang@postech.ac.kr



#### 오 종 석 (吳 宗 錫)

1965년 3월 23일생. 1999년 서울대 원자핵공학과 졸업(박사) 1991년~현재 포항공과대학교 가속기연구소 책임연구원  
Tel : 054-279-1143  
Fax : 054-279-1199  
E-mail : jsoh@postech.ac.kr



#### 조 무 현 (趙 武 顯)

1954년 10월 1일생. 1979년 서울공대 원자핵공학과 졸업(석사),1979~1982년 육군제3사관학교 물리학 교관, 1988년 미국 UW-Madison 대 NEEP 졸업(이학박사), 1989년 포항공대 물리학과 조교수 부임, 1989~1994년 포항방사광 가속기 건설 참여, 현재 포항공대 물리학과 교수 및 환경공학부 겸임교수.  
Tel : 054-279-2075, Fax : 054-279-3099  
E-mail : mhcho@postech.ac.kr