

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

손윤규*, 오중석, 장성덕, 조우현
포항공과대학교 가속기연구소

Study on the high power and high voltage 35 kW, 50 kV inverter power supply

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

Abstract - 고전압 펄스파워를 이용한 장치들이 환경 설비 및 균용기술 등 여러 분야에서 적용되고 있다. 이들 장치는 고전압전원장치가 필수적이다. 고전압 전원장치는 소형이면서 높은 반복 율로 재충전이 가능하고 안정성 있는 운전이 요구되어진다. 개발된 전원장치는 펄스발생기의 에너지 저장 캐패시터를 50 kV까지 충전할 수 있고 다수의 병렬운전이 가능한 정전류 전원장치이다. 본 전원장치는 200 nF캐패시터를 6.48 ms 이내에 50 kV까지 충전할 수 있도록 설계되어있다. 본 논문에서는 직렬공진에 의해 35 kW, 50 kV의 고전압을 만드는 전원장치의 동작시험에 대한 결과를 보이고자 한다.

1. 서 론

200 nF의 정전용량을 갖는 부하 커패시터를 6.48 ms 이내에 50 kV까지 충전할 수 있는 캐패시터 충전전원장치인 정전류 전원장치를 개발하였다. 직렬공진회로와 인버터회로 및 고전압 승압 트랜스포머를 하나의 탱크 내에 수납하고 절연유를 채워서 외부에 라디에터를 설치하여 강제순환에 의한 냉각이 되도록 하였다. 탱크 내의 절연유는 고전압 절연과 동시에 냉각이 되도록 독립적인 폐회로 순환이 되도록 하였다. 출력전원의 품질을 높이기 위해 제어회로에 Refresh 기능을 추가하여 1%이내의 출력전압변동을 갖도록 하였다. 인버터 전원장치의 구성과 실험을 통해 얻어진 결과를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 고전압 인버터 전원장치 구성

고전압 인버터 전원장치는 그림 1과 같이 입력 정류부, 인버터부, 고압출력부, 제어부 및 냉각시스템 등으로 구성된다. 입력 정류부는 3상 480 V를 사용하며 콤팩트모드, 노멀모드 EMI filter, 과도 써지전류 제한회로, 3상 정류회로와 필터 커패시터로 직류전원을 공급하도록 설계되었다.⁽¹⁾ 인버터부는 다단직렬공진 "H" 브리지 방식에 의한 50 kHz 고주파 교류전원을 승압변압기 1차측에 전력을 공급하는 스위칭 소자로 구성되어있다.

고전압 출력부는 고주파 변압기 이차 측에 다중분할 권선을 사용하여 고전압 직류전원을 만드는 고전압 다이오드 회로를 직렬로 연결하여 고전압을 인출하도록 되어있다. 냉각시스템은 인버터부와 고압출력부를 한 탱크 내에 수납하여 절연유로 채우고 외부에 열 교환기를 설치하여 오일순환 펌프에 의해 강제냉각이 되는 구조로 설계하였다.

2.2 고주파 공진형 인버터회로

인버터회로의 직류전원은 상, 하 두 전원으로 분리되어 공급된다. 인버터회로는 두개의 회로가 병렬로 동작되고 각각의 인버터회로에 직렬공진회로 2회로가 한 조가 되어 운전되며 상, 하 두 개의 인버터회로 즉, 4회로가 병렬로 직렬공진이 일어나도록 설계되어있다. 각각의 공진 회로를 병렬로 조합했을 때 한 조의 직렬공진회로가 되도록 설계하여야 한다. 각각의 직렬공진회로는 고주파 변압기 1차권선에 병렬로 권선 되는 구조가 되

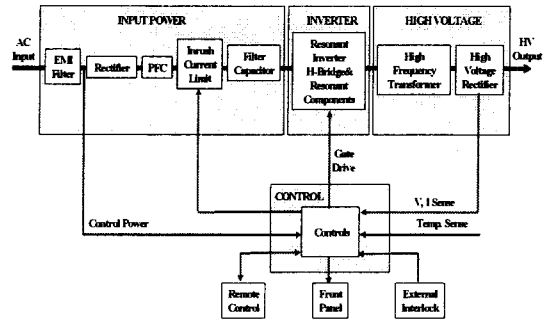


그림 1 전원장치의 블록 다이어그램

표 1 Parameters of transformer design

Design Parameter	Design	Test
Output Voltage [kV]	50	50
Resonant Frequency [kHz]	50	63
Peak Charging Rate [kJ/s]	37.5	38
Primary AC Voltage [V]	480	480
Duty	0.9	0.9
Voltage Margin	0.3	0.3
Period [μ s]	20	20
Switch On Time [μ s]	10	10
Dead Time [μ s]	2.2	2.2
Switching Frequency [kHz]	45	45
Filtered Primary DC Voltage [V]	648/2	648/2
Resonant Impedance [Ω]	1.06	0.846
Resonant Inductance [μ H]	3.4	2.15
Resonant Capacitance [μ F]	3.01	3.0
Max. Power [kW]	40	36.4
Output Average Current [A]	1.5	1.5
Peak Switching Current [A]	1285.6	1280
RMS Switching Current [A]	409	480
Turn Ratio	245	115
Maximum Ambient Operating Temp [°C]	60	60
Efficiency of the Transformer [%]	95	95
Efficiency of the Power Supply [%]	90	90

고 2차권선이 승압비 만큼의 출력을 내도록 되어있다. 인버터에 공급하는 직류전원이 두 뱅크로 나뉘어져 있어 병렬운전 시 임피던스 차에 의한 전류불평형을 고려하여 전류평행이 이루어지도록 설계하여야 한다. 인버터회로의 스위치로는 Fast IGBT(APT100GF60LRD, APT사) 16개를 조합하여 회로를 구성하였다. 1차 권선은 Litz wire를 사용하여 권선을 하였고 2뱅크의 공진 회로에 각각의 독립된 전원을 사용하므로 전압불균형에 의한 불평형을 없애기 위해 2조 회로에 Balun을 설치하여 상쇄가 일어나도록 하였다.

2.3 제어회로

인버터전원장치의 효율적인 운전과 전력의 품질을 결정하는 제어회로는 이 장치의 핵심이다. 전원장치의 안정적인 운전과 회로보호를 위한 제어회로는 크게 두 가지로 분류하여 반영시켰다. 회로보호를 위해 운전에 관계된 인터록은 필요충분조건이 만족했을 때 장치를 운전토록 되어있고 그 기능은 그림 2와 같다.

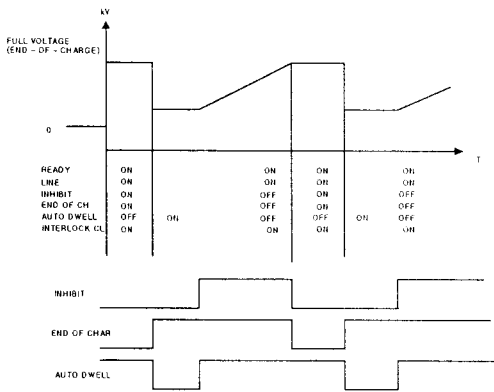


그림 2 인버터 전원장치 운전모드

그림 2는 부하 캐패시터에 충전되는 전압 파형과 제어 신호와의 관계를 보여주고 있으며 출력금지구역인 inhibit신호와 충전이 완료되었을 때 전원장치에서 출력하는 EOC(End of charging)신호와 방전이 되고 나서 얼마간 출력을 금지하는 Auto dwell신호를 나타내고 있다.

부하 캐패시터의 용량의 크기에 따라 전압을 충전하는

표 2 Interlock 종류

구분	항목
Operating Status	STAND BY
	LINE
	INTERLOCK CLOSED
	INHIBIT
Input Power	AND OF CHARGE
	OVER VOLTAGE
	UNDER VOLTAGE
	UNBLANCE VOLTAGE
	OVER CURRENT
High Voltage	LINE FAULT
	FUSE BURNOUT
	EXCESS REVERSAL
	OVER LOAD
	OVER VOLTAGE
	ARC
OPEN CIRCUIT	

시간이 다소 차이가 있으나 목표전압에 도달하여 유지하는 시간이 길면 길수록 부하 캐패시터와 부하에 의한 방전이 생기므로 전원장치가 재충전을 하게된다. 정전류 전원장치의 경우 출력전류가 일정하고 짧은 시간동안 충전이 이루어지기 때문에 목표전압 이상으로 과충전이 이루어지기가 쉽다. 목표전압까지 충전한 다음 캐패시터의 방전부분만큼을 전원장치가 채워주는 운전이 가능해야 전력품질을 높일 수 있다. 개발된 본 전원장치는 refresh mode 기능을 내장하고있어 출력전압을 일정하게 유지하는 기능을 제공하고 있다. 또한 Inhibit와 Auto dwell 기능을 삽입함으로써 전원장치의 안정성을 높였다.

표 2는 인버터 전원장치에 채용된 인터록 종류를 나타내고 있다. 인터록은 3종류로 분류하였으며 운전 중에 정상적인 동작상태를 표시하는 Operating status와 인버부에 공급되는 전원상태를 나타내주는 Input power와 고전압을 승압하는 HV Tank내부와 출력 및 부하에 관계된 High voltage 인터록이 있다.

2.4 고전압 출력회로

2.4.1 고주파 변압기

고주파 인버터전원장치를 효율적으로 사용하기 위해서는 장치가 갖는 에너지 손실을 최소화하고 동시에 소형화할 수 있는 고주파변압기 설계 및 제작이 필수적이다. 고주파변압기 설계에 있어서 중요한 것은 최소의 와전류 손실과 필요한 전력을 충분히 소화할 수 있는 적절한 형태를 지닌 코어를 선택하는데 있다.

주어진 동작주파수와 자속밀도 그리고 허용온도 상수를 이용하여 변압기에서 허용할 수 있는 최대전력을 계산한다. 코어의 손실은 최대 자속밀도와 허용주파수를 이용하여 계산하면 된다. 따라서 변압기의 허용전력손실로부터 권선에서의 최대 전력손실을 구할 수 있다. 사용 전압을 결정한 다음 변압기의 일차 권수비와 이차 권수비를 계산한다. 권선에서 최대동손을 기준으로 일차 축과 이차 축 권선의 크기, 길이, 권선 층의 형태를 결정하고 전체동손이 예상되는 온도범위 내에 있는가를 확인한다.

코어선정에 있어서 유효전력 Pva는 아래와 같다. [3], [4], [5]

$$P_{AV} = \frac{A_w A_e B_{MAX}^2 f}{0.68 d_w \times 10^8} [W]$$

Ae : 코어의 단면적 [cm²]

Aw : 코어의 창면적 [cm²]

Bmax : 자속밀도[G]

f : 운전주파수[Hz]

d_w : 1차 축에 사용하는 권선의 단면적[cm²]

표 3. TDK PE22UU 120×160×20 코어 사양

Parameter	Symbol	Unit	Value
Core Area Product	AwAe	cm ⁴	360
Magnetic Path Length	lm	mm	41.42
Cross - section	Ac	cm ²	6.0
Weight	Wt	gms	1200
Effectice Surface Area	SA	cm ²	1112

고주파 변압기는 코어자체의 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 3은 변압기 설계에 필요한 코어의 사양을 정리하였다.

제작된 고주파변압기의 누설인덕턴스는 계산결과 0.94 μH이고 측정결과 1.45 μH였다.

인버터 전원장치의 정상적인 운전 시 1차측 권선에 흐르는 공진 전류는 480 A 가되며 사용된 1차 권선은 TYPE5 LITZ WIRE 6(5×20/40), 600가닥의 전선을 사용하였다. 1차 권선은 Litz wire 4가닥으로 병렬 권선을 하였다. 변압기 온도상승은 계산결과 60℃로 설계되었으며 코어손실과 동손을 포함한 것이다.

2.4.2 냉각 시스템

인버터 전원장치의 효율은 90 % 이상을 유지하므로 나머지 10%는 실제 전력으로 변환되지 않는 손실에 해당된다. 전체 전력의 10 %가 손실부분으로 나타나기 때문에 효율적인 냉각시스템이 필요하다. 본 시스템에 적용된 냉각시스템은 전력손실이 많은 스위칭소자와 고전압 송압변압기를 절연유속에 잠기는 구조로 하여 강제적으로 절연유를 순환시켜 냉각과 고전압에 의한 절연을 하는 일차냉각 절연유, 이차냉각 강제순환 공냉식 구조로 설계하였다.^[2] 강제순환 공냉식에 적용된 열 교환기는 LYTRON사의 ES0714G14를 사용하였다. 열 교환기는 유로 압력손실을 적게 하면서 열 전달 표면적을 크게 하기 위해 특수하게 설계되어있다. 설계된 최대 열 부하는 3.3 kW로 하였고 외기 공기온도 30℃기준으로 최고 절연유 온도는 60℃하여 최소 오일순환유량은 11.25 ℓ/min로 하였다. 시험결과 열 부하 4 kW에 대해 탱크내 상승한 오일의 출구온도는 65℃, 입구 온도 53℃ 외기 공기온도는 31℃ 오일순환유량은 12 ℓ/min로 탱크 입, 출구 오일 온도차이는 12℃로 최대냉각능력은 117.6 W/℃의 결과를 얻었다.

2.5 실험

본 전원장치의 실험은 출력전압을 설계최대치인 50 kV로 유지하고 평균출력 35 kW로하여 200 nF의 정전용량을 갖는 부하에 대해 실험하였다. 부하 캐패시터에 충전 실험 파형은 그림 4와 같고 ch. A는 출력 전압 파형이며 ch. B는 인버터 공진 회로에 흐르는 전류 파형이다. 인버터 전원장치의 내구성 시험을 위해 부하와 병렬로 스파크 갭과 저항을 직렬로 연결하여 연속 10 Hz로 10시간 운전을 하였다. 스파크전압은 갭의 간격을 조정하여 다양한 조건에서 스파크가 발생하도록 하여 시험하였다. 그림 4는 충전시의 출력전압과 공진 회로에 흐르는 전류 파형을 보여주고 있으며 목표치 전압 50 kV로 부하 캐패시터 200 nF에 6.47 ms동안 충전하였다.

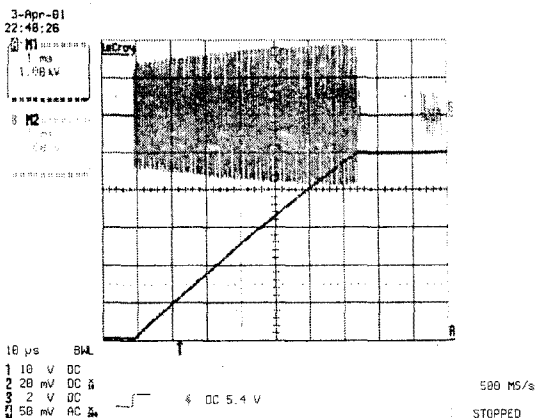


그림 4 공진 충전 시의 공진 전류 및 출력전압파형

2.5.1 실험결과 및 고찰

고전압 인버터의 공진 주파수는 아래와 같다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

직렬공진회로의 임피던스는

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

스위칭 시간은

$$t_{ON} = \frac{1}{2} T_0 = \frac{1}{2f_0}$$

최대주파수는

$$f_{max} = \frac{1}{t_{on} + \text{dead time}} \text{로 된다.}$$

본 시스템의 공진 주파수는 설계 값이 50 kHz이고 실제 측정값은 63 kHz이다. 공진회로의 임피던스는 1 Ω 이하이고 스위칭 주파수는 25 kHz이다. 부하 캐패시터 C_L 과 목표치전압 V_T , 충전시간 t_c 동안의 충전 시에 전력은 계산해보면

$$P_{CH} = \frac{C_L V_T^2}{2t_c} [J/S] \text{로 나타낼 수 있다.}$$

공진충전 시의 전력은 계산에 의해 38.64 kJ/sec가 된다.

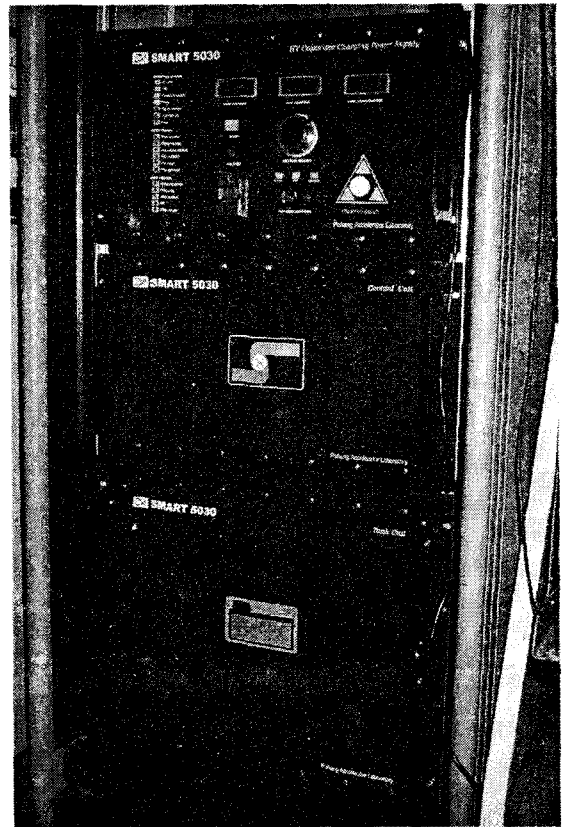


그림 5 제작된 고전압 인버터 전원장치

전원장치의 평균출력을 구해보면

$$P_{AV} = \frac{1}{2} CV^2 f = \frac{1}{2} \times 200 \times 10^{-9} \times 50000^2 \times 150 = 37.5 \text{ kW}$$

충전시의 최대전류는

$$I_{\max} = \frac{2 \times P_{CH}}{V_i} = \frac{2 \times 38.64k}{50000} = 1.55A \text{로 된다}$$

그림 5는 제작된 인버터 전원장치의 외형도이다.

3. 결 론

고전압 인버터 전원장치는 효율적인 운전과 안정적인 제어가 필수조건이며 짧은 시간 내에 원하는 전압까지 충전이 가능하고 제어가 용이하다. 본 장치는 200 nF의 정전용량을 갖는 부하 캐패시터에 6.47 ms이내에 50 kV의 전압을 충전하였고 평균출력 35 kW를 얻었다. 최대출력 연속운전에서 측정된 효율은 90 %이었으며 이때 시스템의 냉각용 순환오일의 최대온도 상승은 70 °C이었다. 고전압 펄스파워 시스템이나 첨단 과학 연구분야나 산업분야에 적용가능한 대출력 고전압 인버터 전원장치의 설계핵심은 소형화 고 효율화하는데 있다. 소형 고주파 인버터는 다음과 같은 기능을 가져야 한다.

- 1) 높은 신뢰도와 지령충전이 가능해야 한다.
- 2) 단락부하에 대한 보호기능이 용이하다.
- 3) 높은 주파수를 이용함으로써 장치들 소형화할 수 있다.
- 4) 높은 파워에 대한 병렬로 확장이 가능하다.
- 5) 전원장치의 고장시 신속한 정비가 가능하다.
- 6) 유연한 제어가 가능하다.
- 7) 방전회로의 전원안정화 장치에 적합하다.
- 8) 고전압의 대전류를 제어가 가능하다.

본 연구에서 개발 시험된 고주파 고전압 인버터 전원 장치는 상기항목의 성능조건이 대부분 만족됨을 확인하였으며 앞으로 장시간 운전에 따른 장치보완사항 연구를 수행할 예정으로 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 오종석, 조무현 외 11명. "Pulse modulator development for plasma DeNOx/DeSOx system". KIMM 과제보고서, 1996
- [2] 오종석, 조무현 외 14명. "Development of high average power modulator 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