

# 공진주파수 추적형 직렬공진 인버터를 이용한 고전압 CCPS에 관한 연구

(A Study on the High Voltage CCPS Using a Resonant Frequency Tracking Type Series Resonant Inverter)

노성찬\* · 김윤호

(Sung-Chan Rho · Youn-Ho Kim)

## 요 약

본 논문은 직렬공진 인버터를 이용한 고전압 커패시터 충전형 전원장치(CCPS)에 관하여 기술하였다. 본 논문에서 사용된 고전압 CCPS는 PLL제어를 사용한 45[Khz]의 직렬공진 인버터를 사용하여 고효율제어를 하였으며, 고전압 변압기를 사용하였다. CCPS의 성능을 평가하기 위하여 14[nF]의 부하에 100[kV]의 출력전압을 300[Hz]의 방전주기를 가지고 실험하였다. 실험결과 최대출력은 18.75[kJ/sec]이고, 방전시간은 200[Hz]로 운전하였으며, 충전시간은 4.5[mS]임을 확인하였다.

## Abstract

This paper presents a high voltage capacitor charging power supply(CCPS) using a series resonant inverter. The CCPS adopted a 45[kHz] IGBT series resonant inverter using PLL control and a high-efficiency, high-voltage transformer.

The performance test of the CCPS was carried out with a 14 nF load capacitor at 100[kV] output voltage and 200[Hz] repetition rate. Peak power rate of 18.75[kJ/sec] and charging time of 4.5[mS]

Key Words : (CCPS), (Series resonant inverter), (PLL)

## 1. 서 론

고전압 Pulse 전원장치로 많이 이용되는 커패시터 충전형 전원장치(CCPS : Capacitor Charging

Power Supply)는 레이저나 가속기, 펄스 플라즈마 용 전원장치로 사용되고 있다.

CCPS용 인버터는 에너지 변환 효율이 좋고 승압형 인버터로 설계시에 부하 임피던스 변화에 대하여 무관하게 일정한 전류를 낼 수 있는 장점을 가지고 있는 직렬 공진형 인버터를 많이 사용하고 있다[1].

본 논문에서는 부하의 변동에 대하여 공진 상태를 유지하면서 일정한 전류 출력을 갖고, 출력전압을 100[kV]까지 승압시킬 수 있는 PLL제어 기법을 이

\* 주저자 : 중앙대학교 전기전자공학부 박사과정  
Tel : 031-460-4319, Fax : 031-462-2944

E-mail : scrho@naver.com  
접수일자 : 2005년 9월 5일  
1차심사 : 2005년 9월 6일  
심사완료 : 2005년 9월 15일

용한 공진주파수 추적형 직렬공진 CCPS를 제작하고 실험하였다.

## 2. 직렬공진형 인버터

CCPS는 부하로 캐패시터를 사용함으로 초기에는 부하단락과 같은 임피던스를 갖다가 충전이 완료되면 높은 임피던스 부하 특성을 가지고 있으므로 직렬공진형 인버터를 사용하여 정전류 특성을 유지하는 것이 가장 바람직한 형태이다. 따라서 직렬공진형 인버터를 이용하여 캐패시터 부하에 연속 충전전류를 공급할 수 있고, 단락부하상태에서도 정전류 제어 기능을 갖을 수 있도록 설계되었다[2].

본 연구에서 제작된 CCPS용 직렬공진 인버터의 사양은 아래와 같다.

- 최대 출력 : 18.75[kW]
- 최대 출력 전압 : 100[kV]
- 최대 출력 전류 : 0.15[A]
- 입력 전압 : 3 $\phi$  380[V]
- 스위칭 주파수 : 45[kHz]
- 공진 주파수 : 37[kHz]
- 공진 인덕턴스 : 28[ $\mu$ H]
- 공진 캐패시턴스 : 0.66[ $\mu$ F]

아래의 그림은 본 논문에서 사용된 직렬공진형 인버터의 구조를 보여 주고 있다.

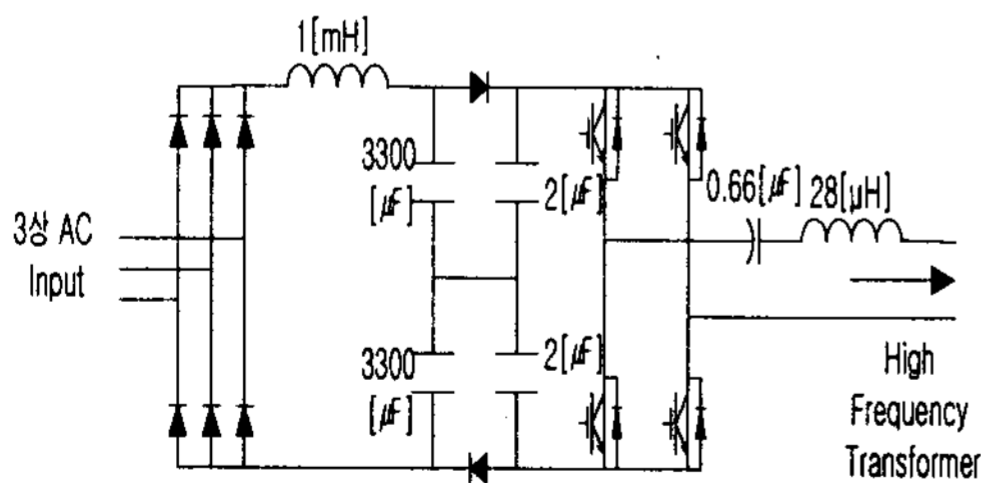


그림 1. 직렬 공진 인버터 구조  
Fig. 1. Configuration of series resonant inverter

인버터의 입력부는 Common/Differential Mode EMI 필터와 Inrush Surge Limit Circuit, 3상 정류기 및 필터 Capacitor로 구성되어 있다.

입력부의 EMI 필터는 사용전원에 고주파 노이즈가 침투할 경우 Common Mode Noise와 Normal

Mode Noise를 감쇄시키도록 구성하였으며, Common Mode 필터는 감쇄비가 1[MHz]에 40[dB] 정도로 설계 하였다.

직렬공진형 인버터에 사용된 스위치는 1200V30A의 IGBT를 5개 병렬로 연결하여 사용하였다. 아래의 표는 사용된 IGBT의 사양을 나타내고 있다.

표 1. IGBT 사양  
Table 1. Specification of IGBT

구 분	단 위	값
Max. Emitter-Collector Volt.	V	1200
Max. Gate-Emitter Volt.	V	±20
Max. Continuous Collector Current(90℃)	A	30
Max. Power Loss	W	200
Max. Junction Temperature	℃	150
Turn On Time	μs	0.07
Turn Off Time	μs	0.07
Collector-Emitter Saturation Volt.	V	2.4
Diode Recovery Time	μs	0.06
Diode Forward Voltage Drop	V	2.5

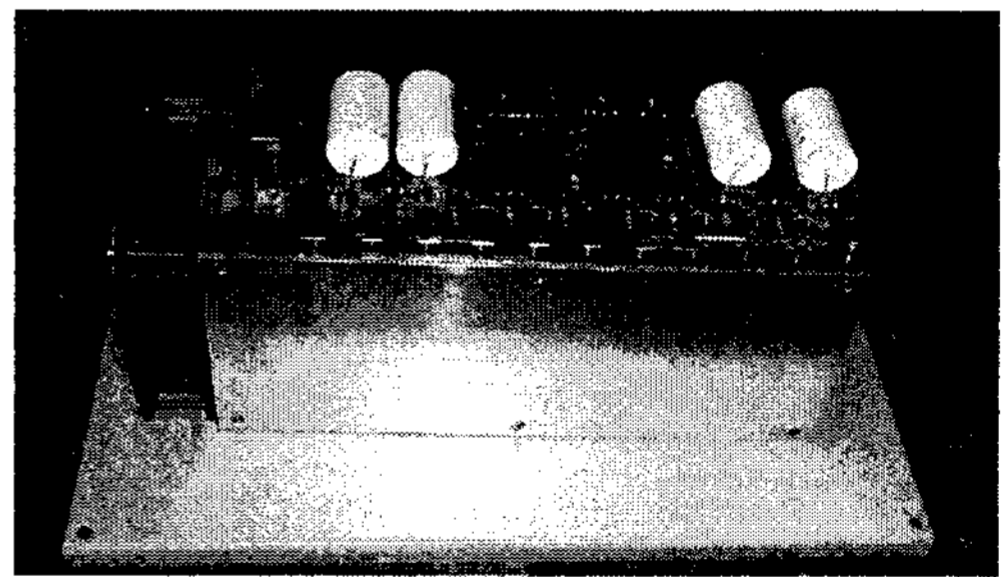


사진 1. IGBT 모듈  
Photo 1. IGBT Module

인버터 1차측 스위칭 전류는 공진시 100[A]가 넘지 않도록 설계하였다.

인버터의 공진회로는 공진 인덕터와 캐패시터, 승압용변압기 1차 권선이 직렬로 연결되어 있고, 직렬공진회로의 공진 주파수는  $F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  [Hz]로 나타낼 수 있다.

공진 인덕터는 고전압 승압용 변압기의 1차측 누설 인덕턴스와 직렬인덕터로 구성하였다.

고전압 고주파 변압기는 인버터의 회로구성과 설

계변수를 검토한 후 이를 바탕으로 하여 변압기 사양을 도출하였다.

표 2. 변압기 설계 파라미터  
Table 2. Transformer design parameter

구 분	단 위	값
출력전압	[kV]	100
Peack Charging Rate	[kJ/S]	18.75
공진 임피던스	[Ω]	6.5
공진 인덕턴스	[μH]	28
최대 출력	[kW]	18.75
평균 출력전류	[A]	0.15
최대 스위칭 전류	[A]	100
실효 스위칭 전류	[A]	70.7
변압기 효율	[%]	95

고전압 고주파 변압기에 사용된 코아는 허용온도 상승과 최대 자속밀도, 동작 주파수등을 고려하여 결정하고, 이를 이용하여 변압기의 최대 허용전력을 계산한다. 코아의 손실은 최대 자속밀도와 허용 주파수를 이용하여 계산된다. 코아선정 시의 유효전력은 다음과 같다.

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

여기서

$A_e$  : 코아의 단면적[cm<sup>2</sup>]

$A_w$  : 코아의 창면적[cm<sup>2</sup>]

$B_{max}$  : 자속밀도[G]

$f$  : 운전 주파수[Hz]

$d_w$  : 1차측에 사용하는 권선의 단면적[cm<sup>2</sup>]이다.

고전압 변압기는 코아 자체의 전력손실이 작고 자속밀도가 큰 Ferrite계 코아를 선정하였다. 또한 절연내력확보를 위하여 I형 코아를 UU 형태로 제작하여 사용하였다.

본 연구에서 사용한 변압기의 최대 자속밀도는 1500[G]이며 코아의  $A_e A_w$ 를 계산해 보면 3472

[Cm<sup>4</sup>]이고, 전체 전력손실은  $P_{tot} = \left(\frac{P_{tg}}{\eta t}\right) - P_{\phi}$ 로

표현할 수 있으며 계산된 전력손실은 25[°C]에서 40.73[W]가 된다.

아래 표는 Core 파라미터를 나타낸 것이다.

표 3. Core 파라미터  
Table 3. Core Parameter

구 분	단 위	값
Core 단면적	[Cm <sup>2</sup> ]	8
Core 창 단면적	[Cm <sup>2</sup> ]	434
Core Area Product	[Cm <sup>4</sup> ]	3472
Magnetic Pass Length	[mm]	940
Cross Section	[gmS]	434
Effective Surface Area	[Cm <sup>2</sup> ]	1112

변압기의 일차 권수비는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

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

위 식에 의하여 구해진 1차 권선수는 24[Turn]이고 전압비에 의한 2차 권선의 권선수는 5400[Turn]이다. 2차측은 고압이 유기되므로 층간절연을 고려하여 25단 분할 권선으로 제작하였다. 각 단의 권선수는 216[Turn]으로 하여 직렬로 결선하였다. 변압기 권선 중 2차 권선은 0.35[mm] 에나멜 동선을 사용하였으며, 층간절연은 0.2[mm]마일라 필름을 사용하였다.

### 3. 고전압 발생부

고전압 발생부는 변압기 2차측에서 발생하는 고전압을 정류하는 회로로, 변압기 2차측 각 단의 전압 4000[V]를 고전압 브리지 다이오드를 사용하여 전파 정류한다.

아래의 그림은 고압 발생부를 나타내고 있다.

인버터 제어를 위한 궤환신호는 저항과 콘덴서를 이용하여 10[V]신호로 변환하여 제어회로의 입력으로 사용된다.

전류궤환회로는 고압 Return회로에 Shunt저항을 삽입하여 전류-전압 변환을 거쳐 제어회로에 공급된다.

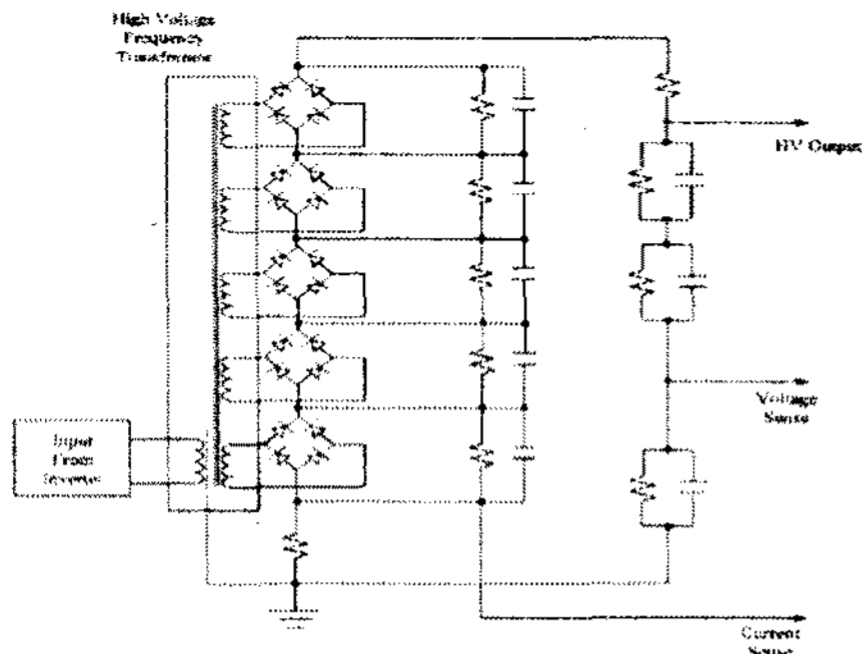


그림 2. 고전압 발생부 구조  
Fig. 2. Configuration of high voltage generation part

아래의 표는 고압 다이오드의 사양을 나타내고 있다.

표 4. 고압 다이오드 사양  
Table 4. Specification of high voltage diode

구 분	단 위	값
Max. Working Reverse Volt.	[V]	10000
Forward Voltage	[V]	9.5
Average Rectified Current	[A]	0.5
Max. Reverse Current	[ $\mu$ A]	25
Max. Reverse Recovery Time	[ns]	200
Max. Thermal Impedance	[ $^{\circ}$ C/W]	6
Junction Capacitance	[pF]	16
Operating Temperature	[ $^{\circ}$ C]	-65~175

### 4. 인버터 제어회로

부하변화 추적을 위한 제어회로는 부하 가변에 따른 공진점 변화를 추적할 수 있는 형태로 제작하였다.

직렬공진 인버터는 부하의 변화에 따라 공진점의 변화를 가져올 수 있으므로 공진 전류를 피드백하여 공진 전류의 위상과 주파수를 계산하여 동 위상의 게이트 신호로 공진할 수 있도록 제어할 필요가 있다.

부하변화를 추적하기 위한 방안으로 공진 전류의 변화를 추적하여 공진점 변화를 추적하고 변화된 공진 주파수에 해당하는 주파수를 생성하는 방식을 사용하고 있다.

이를 위하여 PLL(Phase Lock Loop)제어기를 사용하였다. PLL제어기는 모토롤라의 MC14046을 사

용하여 구성하였으며 아래의 그림은 MC14046의 구성을 나타내고 있다[3].

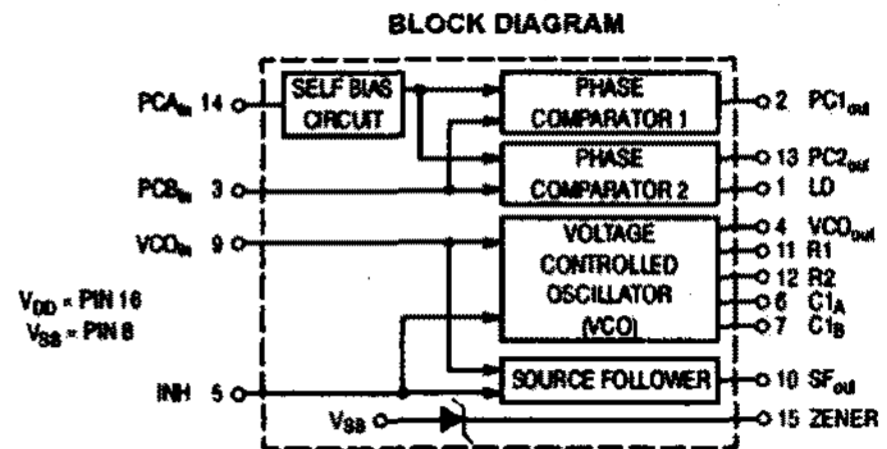


그림 3. MC14046 블록 다이어그램  
Fig. 3. Block diagram of MC14046

주파수 추적을 위하여 MC14046의 위상검출기 II를 사용하여 3상태 기능을 사용함으로써 위상검출과 주파수 추적기능을 갖게 하였다[3].

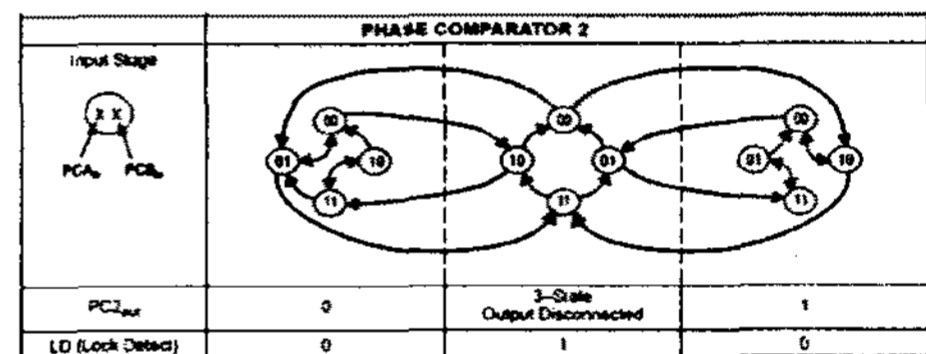


그림 4. MC14046위 위상검출기 II 상태변화  
Fig. 4. State transition of MC14046 Phase comparator II

위상 검출기 II는 입력신호의 위상과 주파수를 동시에 비교할 수 있다. 위 그림에서 알 수 있듯이 입력 신호 위상이 비교기 위상보다 늦은 위상의 신호가 입력되면 VCO의 주파수가 상승되도록 하기 위하여 위상 검출기가 High로 셋트된다. 따라서 루프 필터의 전하가 상승하게 되고, VCO에 인가되는 전압이 상승하여 VCO의 출력 주파수는 상승하게 된다[4].

아래 그림은 PLL제어기의 동작을 나타낸 블록도이다.

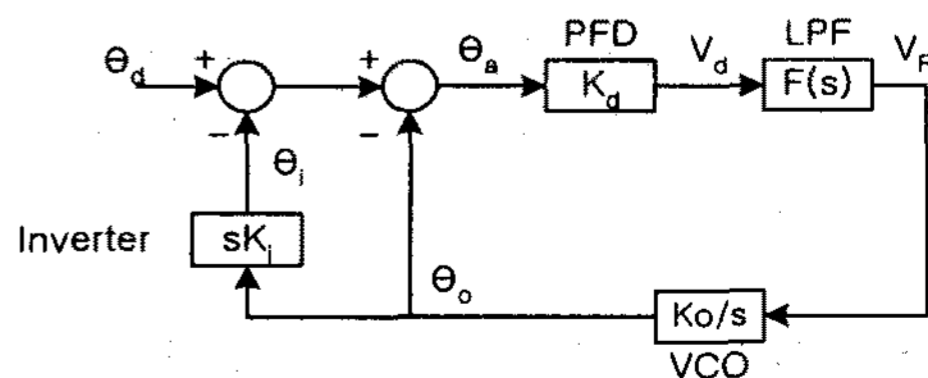


그림 5. PLL을 이용한 공진 주파수 추적 시스템  
Fig. 5. Resonant Frequency tracking system using PLL

여기서 출력위상  $\phi_e(s)$ 는

$$\begin{aligned} \phi_e(s) &= \frac{\frac{1}{s} K_0 Z_F(s) K_D}{1 + \frac{1}{s} K_0 Z_F(s) K_D} = \frac{K_0 Z_F(s) K_D}{s + K_0 Z_F(s) K_D} \\ &= \frac{s}{s + K_0 Z_F(s) K_D} \times \phi_i(s) \end{aligned}$$

이다. 여기서  $K_0$ 는 VCO의 이득이고,  $K_D$ 는 검출기 이득이다. 또  $Z_F(s)$ 는 Loop 필터의 임피던스이다.

또한 Loop 필터의 전달함수  $H(s)$ 는 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_e(s) &= \frac{\phi_e(s)}{\phi_i(s)} = \frac{s^2}{s^2 + s \cdot RC \cdot \frac{K_0 K_D}{C} + \frac{K_0 K_D}{C}} \\ &= \frac{s^2}{s^2 2\zeta\omega_n \cdot s + \omega_n^2} \end{aligned}$$

여기서  $\omega_n = \sqrt{\frac{K_0 K_D}{C}}$  이고  $\zeta = \frac{1}{2} RC\omega_n$ 이다.

아래의 그림은 인버터의 제어구조를 나타낸 것이다.

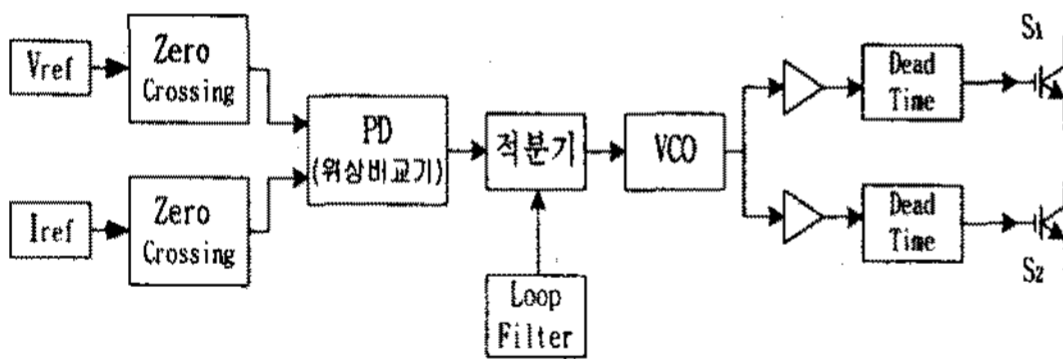


그림 6. 인버터 제어 구조  
Fig. 6. Configuration of inverter control

### 5. 실험 결과

제작된 직렬공진형 인버터의 동작을 시험하기 위하여 공진회로 동작시험과 고전압 발생부의 동작을 확인하기 위하여 출력시험을 시행하였다.

그림 7은 기본적인 공진회로의 동작을 시험하기 위하여 낮은 전압에서 공진회로를 동작시킨 동작 파형이다.

아래의 그림은 공진 커패시턴스 0.66[ $\mu$ F]에 공진 인덕턴스 28[ $\mu$ H]의 조건에서 VDC 510[V], 공진전류 100[Apeak]의 파형을 보여주고 있다.

그림 8은 1차 최대공진 전류 114[A], 2차 전류 584[mA], 공진 주파수 37[kHz], 공진 임피던스 65 [ $\Omega$ ]의 조건에서 100[kV] 충전시의 2차 전압과 1차 공진전류의 파형을 나타내고 있다.

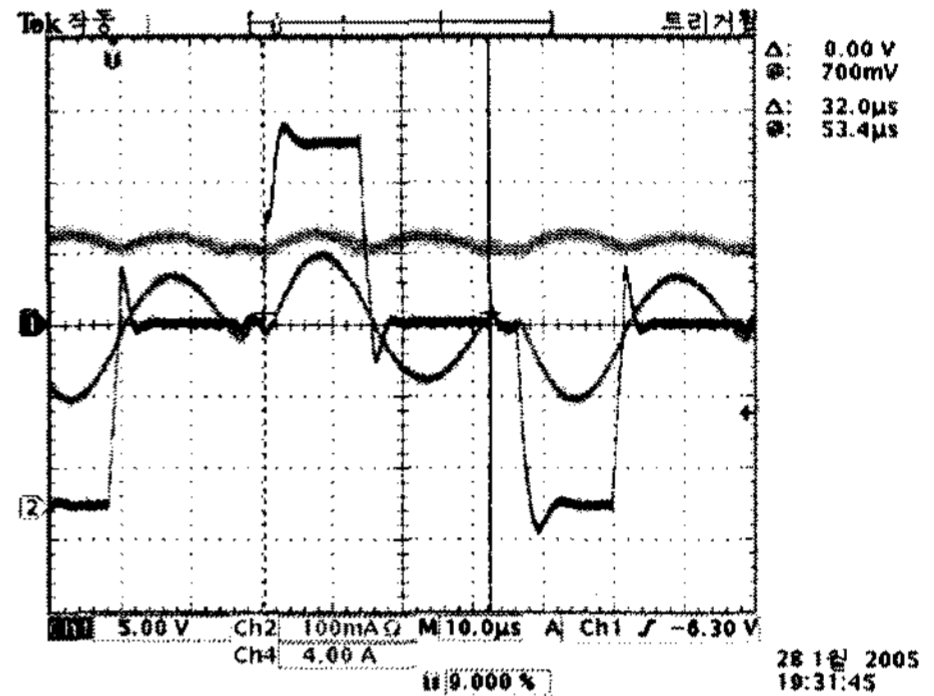


그림 7. 공진회로 동작 파형  
Fig. 7. Waveform of resonant circuit

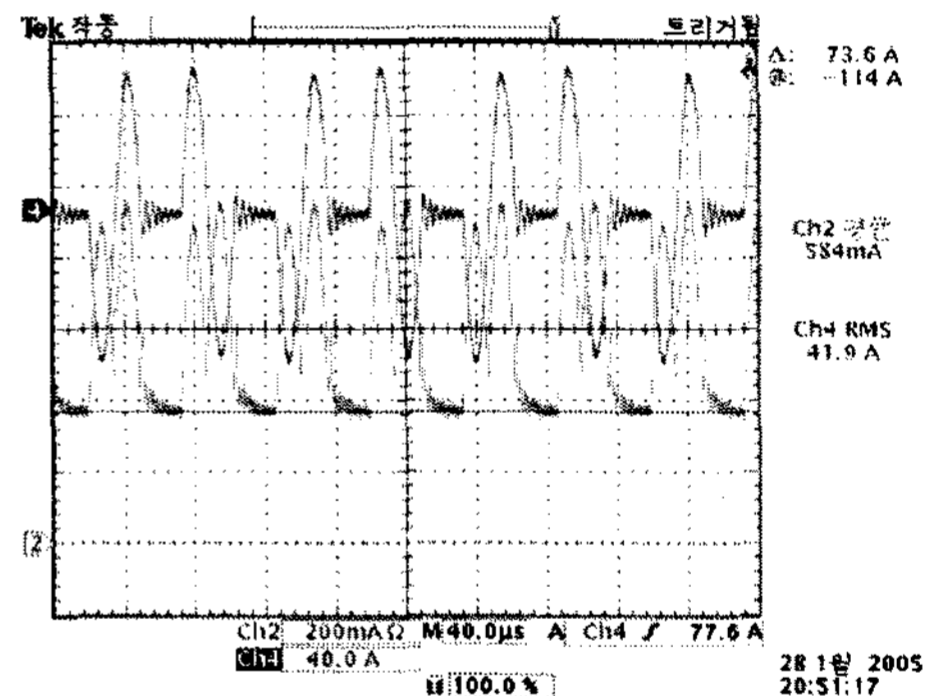


그림 8. 공진전류 파형 ( $C_0 = 0.66(\mu F)$ ,  $L_0 = 28(\mu H)$ )  
Fig. 8. Waveform of resonant current ( $C_0 = 0.66(\mu F)$ ,  $L_0 = 28(\mu H)$ )

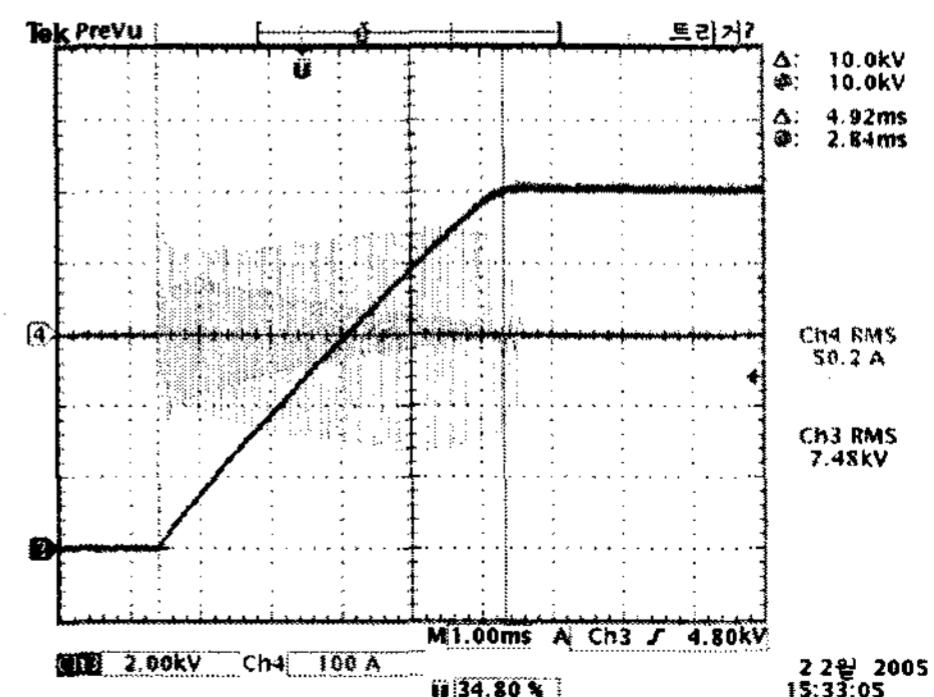


그림 9. 2차 전압, 1차 공진전류 파형  
Fig. 9. Secondary voltage and primary resonant current Waveform

아래의 그림은 100[kV]의 DC 모드 출력파형으로 부하 커패시턴스는 14[nF]이다.

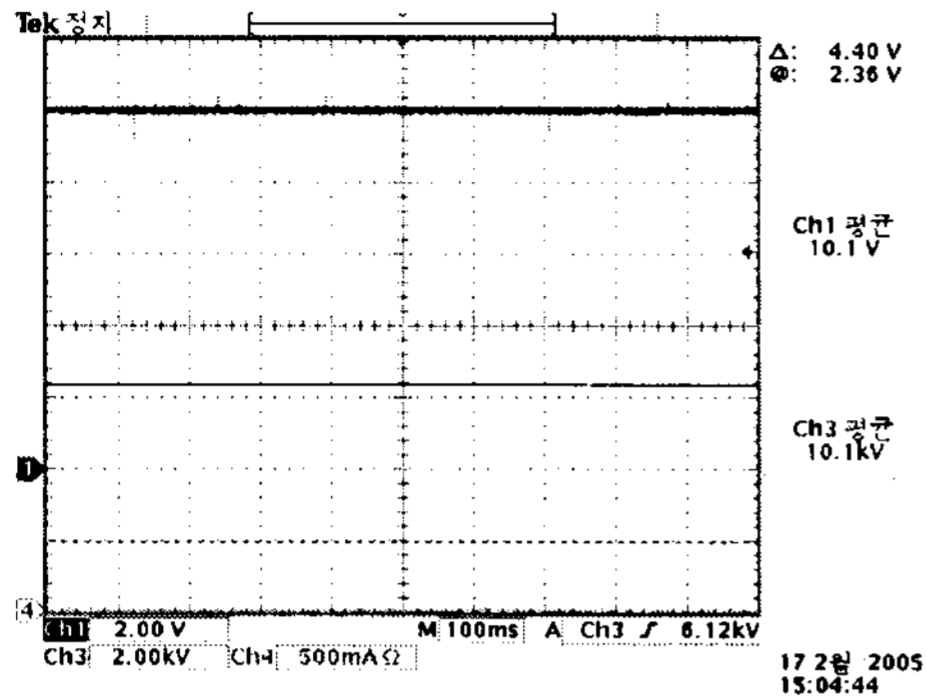


그림 10. DC모드 출력파형  
Fig. 10. Waveform of DC mode output

아래의 파형은 100[kV]의 전압을 부하커패시턴스 14[nF]에 충전하는 것을 보여여주는 파형으로 상승 시간은 4.5[ms]로 측정되었다.

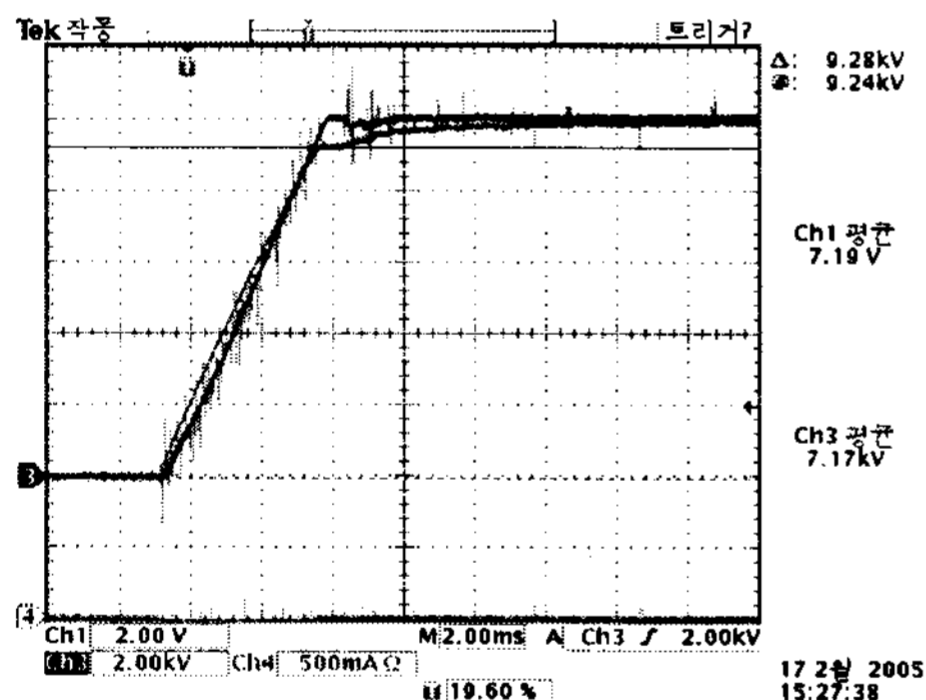


그림 11. 충전전압 파형(100[kV])  
Fig. 11. Waveform of charging voltage(100[kV])

## 6. 결 론

본 논문에서는 PLL 제어를 이용한 CCPS를 제작 실험하였다. CCPS를 위하여 일정 전류를 출력할 수 있는 직렬공진형 인버터를 사용하였으며, 제어를 위

하여 PLL제어기를 사용하였다. PLL제어기는 부하 변화에 따른 공진 주파수를 추적하고 추적된 주파수에 따라 스위칭 주파수를 변화하여 직렬공진인버터가 언제나 공진을 이룰 수 있도록 제어하였으며 주파수 범위는 35~55[KHz]로 하였다. 스위치 손실은 1차 272[W], 2차 202[W]의 손실이 발생한 것으로 확인되었으며, 시스템의 효율은 입력 18[kVA], 스위치 손실, 변압기 손실 등을 고려한 출력은 17[kVA]로 효율은 94[%]로 계산되었다.

본 논문에서 부하의 변화에 따라 스위칭 주파수가 변화하고 공진점 변화를 정확하게 추적하는 것을 확인하였고, 100[kV]까지 충전 시간이 부하 커패시터 14[nF]에서 4.5[ms]임을 확인하였다.

## References

- [1] R. E. Tartler, Solid-State Power Conversion Handbook, Wiley, 1993, p.528.
- [2] A. C. Lippincott, R. M. Nelms, "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, pp. 438-447, December 1991.
- [3] ON Semiconductor, "MC 14046B Phase Locked Loop", ON Semiconductor semiconductor components, LLC, May, 2001-Rev. 7.
- [4] Guan-Chyun Hsieh, James C. Hung, "Phase-Locked Loop Techniques-A survey", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 6, pp. 609-615, December 1996.

## ◇ 저자소개 ◇

### 노성찬 (魯成贊)

1966년 7월 4일생. 2000년~현재 중앙대학교 대학원 전기전자공학부 박사과정.

### 김윤호 (金倫鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M 대학 졸업(박사). 현재 중앙대학교 전기전자공학부 교수.