

# 공진주파수 추종 직렬공진형 고효율 유도·가열장치에 관한 연구

(Series-resonant High efficiency Induction Heating System following  
Resonant Frequency)

성병기\* · 박성준\*\* · 김광태\*\*\* · 김철우\*\*\*\*

(Beang-Gee Sung · Sung-Jun Park · Kwang-Tae Kim · Cheul-U Kim)

## 요 약

본 연구는 고주파 직렬공진 인버터를 이용한 20[kHz], 10[kW]급 고효율 유도·가열장치에 관한 것이다. 피가열체 인 부하변동에 대해서는 인버터의 직류 입력 전압을 가변시키고 인버터 스위칭을 공진 주파수를 추종해 동작 시킴으로써 무효 전력을 최소화 할 수 있는 회로 구성을 제시하였다. 그리고 시뮬레이션과 실험을 통해 유도·가열 장치의 인버터 역률이 약 0.96으로 양호함을 알 수 있었다.

## Abstract

The object of the present study is to obtain a 20[kHz], 10[kW] rating, high efficiency induction heating system by high frequency series-resonant inverter

Proposed is a topology that minimize a reactive power, by which direct input voltage is variable corresponding to the variation of the load, heated-object, and by which the switching of inverter is forced to follow a resonant frequency.

And assured that the power factor of the inverter in a induction heating system is proper about 0.96 through the simulation and results.

## 1. 서 론

금속의 용융이나 접합, 열 처리용에는 고주파 교번 자계에 의한 유도·가열 장치가 주로 이용 되었고 이 유도 가열의 전원으로서는 공진형 인버터를 많이

사용하여 왔다.

일반적으로 종래의 전압형 인버터는 그 출력을 조절하기 위해서는 DC측 전압을 고정해 두고 스위칭 주파수를 가변시켜 공진회로의 무효 전력을 조절하였다. 이는 공진 회로의 파라미터에 의해 정해지는 공진 주파수보다 높은 주파수로 스위칭함으로써 공진회로의 전류 위상각을 제어하여 무효 전력을 제어하는 방식이다[1][2]. 그러나 다양한 출력을 요구하는 열처리 용 유도 가열 장치에서는 부하 변동에 따른 무효 전력의 발생을 최소화하면서 안정된 출력을 얻을 수 있

\* 정회원 : PSTEK 대리

\*\* 정회원 : 거제대학 전기과 조교수

\*\*\* 정회원 : 부산정보대학 전기전자계열 부교수

\*\*\*\* 정회원 : 부산대학교 전자전기통신공학부 교수

접수일자 : 1999년 7월 16일

는 방법이 크게 요구되고 있다[3]. 최근의 유도 가열 기술은 대용량 IGBT의 개발과 더불어 고효율화 되고 있다. 본 연구에서는 인버터의 스위칭 주파수를 회로의 공진 주파수에 추종 제어하면서도 그 부하 변동에 대해서는 DC Link 전압의 크기를 조정함으로써 무효전력의 발생을 최소화 할 수 있는 10[kW]급 고효율 직렬 공진형 인버터를 설계 구성하고 실험을 통해 그 실용성을 확인하였다.

## 2. 유도 가열 장치의 구성

그림 1은 본 연구에서 구성한 유도 가열 장치의 개략도이다.

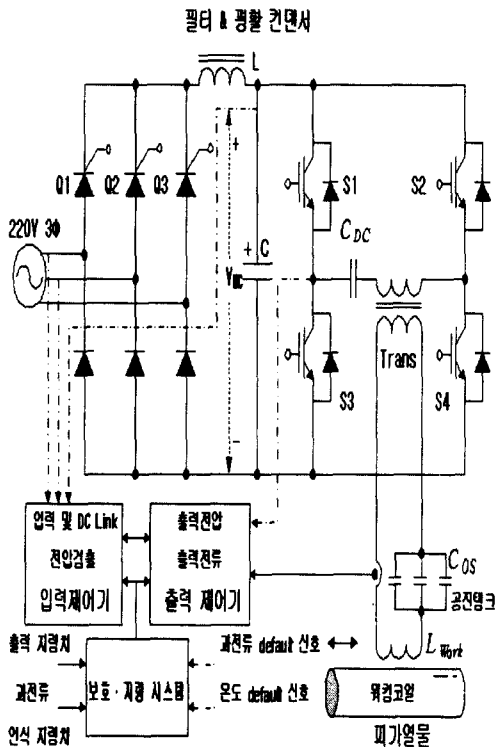


그림 1. 유도 가열 시스템의 구성

입력 정류부는 SCR-다이오드 (800V - 150A급)를 이용한 가변 출력 3상 세미 컨버터와 리플 저감용 필터 L,C로 구성 된다. 리플 저감용 인덕터 L은 성층 철심형 C-cut 코어에 6.3[φ] 동파이프를 사용하여 수

냉식으로 설계하였으며 약 50[μH]의 인덕턴스값을 갖는다. 그리고 리플용 콘덴서 C는 인버터의 스위칭 주파수가 20[kHz]이상되므로 고주파 충전전에 강한 MF콘덴서를 병렬로 사용하였고 그 용량은 200[μF]이다. 그리고 인버터부는 고주파 직렬 공진형으로서 스위치 S1-S4로 구성된 풀-브릿지 방식의 구조이며, 1200V/300A 급 IGBT 모듈로 구성되어 있다. 모듈 사이의 배선은 동판으로 구성하여 배선간 인덕턴스 값을 무시할 수 있는 수준 (0.5[μH] 이하)으로 처리하여 스위칭시에 발생하는 노이즈를 현격히 줄일 수 있도록 하였다. 또한 넓은 면적의 동판으로 스위치 S1-S4를 덮었으며, 순동으로 만들어진 수냉식 방열판이 스위치의 아래쪽을 받침으로서 스위칭시에 발생하는 EMI와 노이즈를 차폐토록 강구하였다. 또한 실질적인 부하가 되는 공진 회로는 동작코일(working coil)과 공진 캐패시터 Cos 및 정합 변압기로 구성되며 변압기 1차측은 리츠선(Litz wire)으로 감고 2차측 동작 코일은 6.3 φ 동파이프로 감은 수냉식 구조이다. 그리고 블리킹 콘덴서 CDC는 정합 변압기의 1차측의 직류 성분 유입을 막아 변압기의 자기 포화를 막기 위해 설치된 것이다.

## 3. 유도 가열 시스템의 등가회로와 각 파라미터 산정

### 3.1 등가회로

그림 2는 정합 변압기의 1차측으로 환산한 유도 가열 장치의 등가 회로도이다.

그림 2에서 사용된 기호를 아래와 같이 정의하면

$L_p$ : 1차 권선의 인덕턴스

$L_s$ : 2차 권선의 인덕턴스

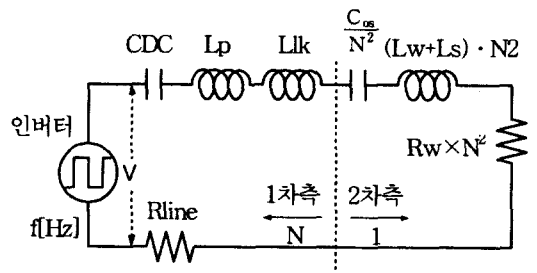


그림 3. 유도 가열 시스템의 등가회로

- L<sub>lk</sub> : 정합변압기의 누설 인덕턴스
- L<sub>w</sub> : 동작코일(working coil)의 인덕턴스
- R<sub>w</sub> : 동작코일내의 피가열체의 등가 저항
- R<sub>li</sub> : 1차측 회로의 배선간 도체저항
- N : 정합 변압기의 권선비

정합변압기의 1차측으로 환산된 등가 인덕턴스 L<sub>1</sub>, 등가 캐패시턴스 C<sub>1</sub> 및 등가 저항 R<sub>1</sub> 은 식 (3.1)과 같다.

$$L_1 = (L_p + L_{lk}) + (L_s + L_w) \cdot N^2$$

$$C_1 = \frac{C_{DC} \cdot \frac{C_{os}}{N^2}}{C_{DC} + \frac{C_{os}}{N^2}} \quad (3.1)$$

$$R_1 = R_{li} + R_w$$

그리고 공진 주파수 f<sub>os</sub> 와 피가열체에 전달되는 전력 P<sub>w</sub> 는 식 (3.2)로 주어진다.

$$f_{os} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3.2)$$

$$P_w = \frac{V^2}{Z_L^2} R_w$$

단,  $Z_L = R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})$

### 3.2 정합변압기용 코어의 선정과 권선수 선정

유도 가열장치의 정합 변압기는 고주파 대전류용이므로 그 코어의 선정이 매우 중요하다.

변압기용량이 주어지면, 코어의 단면적(A<sub>c</sub>)과 권선이 감기는 공간의 단면적(A<sub>w</sub>)의 곱에 해당하는 코어의 크기를 결정해야 한다. 이 때의 코어 재질은 최대 허용자속 자속 밀도의 변동폭 ΔB (풀브릿지 방식의 전압형 인버터에서는 ΔB는 0.3 Tesla 정도 요구됨)을 고려하고, 필요한 volt-second를 제공할 수 있는 코어를 선정해야 한다. 본 연구에서는 용량 10[kW], 공진 주파수 25[kHz]를 목표로 TDK사의 PE22UU79를 사용하였다.

권선설계에 있어서는 1차측의 최소턴수 N<sub>p</sub>는 volt-second 조건으로부터

$$N_p > \frac{V_{1(min)} T_{max}}{\Delta B A_c} \times 10^4 = \frac{5000 V_{1(min)}}{\Delta B A_c f_{os}} \quad (3.3)$$

으로 선정하였다.[4]

또한, 2차측 권선수 N<sub>s</sub>는 식 (3.4)와 같이 결정하였다.

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_2}{0.95 V_1} = \frac{V_2}{0.95 (V_{DC} - 2V_T - V_{cos}) \cdot D} \quad (3.4)$$

단, 여기서

- V<sub>1(min)</sub> : 1차측 입력전압의 최소치
- T<sub>max</sub> : 인버터의 출력주파수(공진주파수)에 따라 결정되는 최대 스윗칭 시간
- f<sub>os</sub> : 공진주파수
- V<sub>DC</sub> : 직류전원전압
- V<sub>T</sub> : 스위치(IGBT)의 순방향 전압강하
- V<sub>cos</sub> : 직렬커패시터 CDC의 양단 전압
- D : duty ratio 이다.

식 (3.4)에서 변압기 1차측에 인가되는 직류 전압은 0.95 V<sub>1</sub> 로 잡았다. 이는 인버터부의 주 스위칭소자의 암(Arm)단락을 방지하기 위하여 데드존(dead zone)을 설정하기 때문에 그 전압이용율이 감소하기 때문이다.

### 4. 시뮬레이션과 실험결과

본 연구에서 구성된 유도 가열 장치의 회로정수는 표 1과 같다. 이들 값은 LCR-메타 (HP-4284A)로 측정하였다.

공진 부하회로에 대한 시뮬레이션은 P-Spice를 이용하였으며, 스윗칭 주파수 변화에 대한 출력 변화를 그림3에 나타내었다

공진 주파수는 약 20[kHz]이며, 스윗칭 주파수 22~30[kHz] 범위 내에서 출력 2~10[kW]를 얻을 수 있음을 이론적으로 알 수 있다.

표 1. 유도 가열 장치의 회로시정수

명칭	기호	정수값	단위	비고
DC캐패시턴스	$C_{DC}$	173	$\mu F$	무시가능함
누설인덕턴스	$L_{lk}$	14.5	$\mu H$	
1차저항	$R_i$	0.01	$\Omega$	무시가능함
1차인덕턴스	$L_p$	17.07	mH	
2차인덕턴스	$L_s$	1.09	mH	
공진캐패시터	$C_{os}$	9.8	$\mu F$	
위킹코일인덕턴스	$L_w$	4.75	$\mu H$	
위킹코일등가저항	$R_w$	0.235	$\Omega$	
권선비	$N$	3.95	turn	
등가공진캐패시턴스	$C_1$	0.626	$\mu F$	
등가공진인덕턴스	$L_1$	101.20	$\mu H$	
등가저항	$R_1$	3.68	$\Omega$	
공진주파수	$f_{os}$	21.37	kHz	

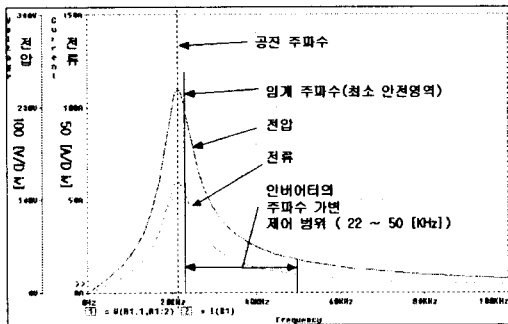


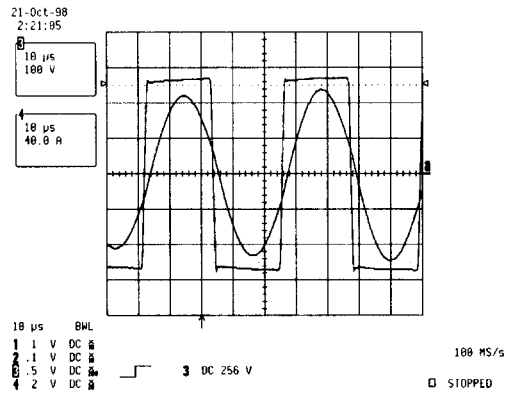
그림 3. 주파수에 대한 출력 변화

표 2. 운전 실험 조건

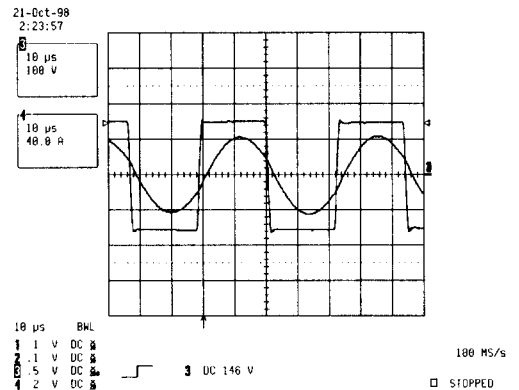
교류 입력 전압	220[V] 3상 rms
교류 입력 전류	최대 50[A] rms
출력 전압	0~270[V]
출력 전류	최대 65[A] rms
출력 주파수	22~50 [kHz]
부하대상	강철 파이프 (일반 Steel, 30 $\varnothing$ [mm])
부하대상온도변화	25[ $^{\circ}C$ ]-700[ $^{\circ}C$ ] (큐리온도 = 750[ $^{\circ}C$ ])

본 연구에서 행한 실험은 표 1과 같은 회로 정수로 시스템을 구성하고, 실제 운전하였다. 표 2는 운전 실험 조건을 나타내고 있다.

그림 4는 유도 가열 장치의 출력이 각각 10[kW], 1 [kW]일 때 공진 주파수 20[kHz]보다 약간 높은 약 22 [kHz]로 인버터터를 스위칭할 때의 출력단 전압, 전류 파형이다. 유도 가열 장치의 전원인 인버터터의 요구 출력이 높을 때나 낮을 때에도 항상 전압과 전류는 15 $^{\circ}$  정도의 위상차를 유지하면서, 일정한 주파수 추종 제어가 가능하였고 따라서 무효전력을 최대한 줄일 수 있음을 알 수 있다

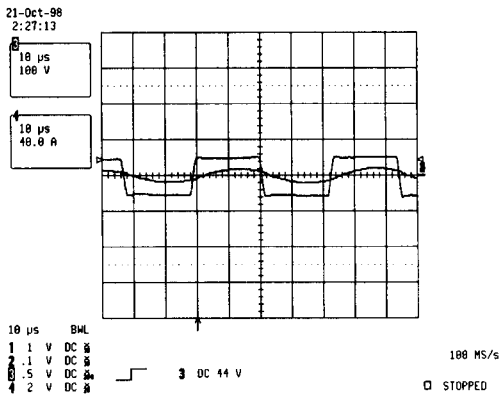


(a) 출력 10(kW) 일 때



(b) 출력 5(kW) 일 때

참고 문헌



(c) 출력 1 [kW] 일때

그림 4. 유도 가열 장치의 출력 전압, 전류 파형

5. 결론

본 연구에서는 고주파 직렬 공진형 인버터를 이용하여 스위칭 주파수 22~25[kHz]범위 내에서 안정하게 동작하는 유도 가열 장치의 회로 파라미터를 산정하고, 이를 토대로 유도 가열 시스템을 설계하였다. 실험결과 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 피가열체인 부하의 변동에 대하여 인버터의 입력 전압이 연동되는 위상제어 정류기를 사용하여 DC 링크단 전압을 조정함으로써, 항상 공진 주파수보다 약 10% 높은 스위칭 주파수에서 안정한 동작이 가능함을 알 수 있었다.

2. 부하 변동에 대해서도 출력 인버터의 전압, 전류의 크기는 가변되나, 그 위상차를 항상 일정히 유지함으로써 역률 0.96으로 운전 가능하고 무효전력을 최소화 할 수 있었다.

그러나, 정합 변압기의 설계기준과 EMI를 고려한 배선기술 및 기하학적 형상 설계가 이 분야의 중요한 과제라고 생각된다.

본 연구는 1998년 부산대학교 학술 연구 조성비 지원에 의해 수행되었음

- (1) Henry W. Koertzen, Jacobus D. van Wayk and Jan A. ferreira "Design of the Half-Bridge, Series Resonant Converter for Induction Cooking" PESC pp729-735 1995.
- (2) L. Grajales, J. A. Sabate, K. R. Wang, W. A. Tabisz, and F. C. Lee "Design of a 10kW, 50kHz Phase-shift Controlled Series-Resonant Inverter for Induction Heating" IEEE pp.843-849, 1993.
- (3) Maurice Orfeuill "Electric Process Heating" 1992
- (4) "Unitorde Application Handbook"-Unitorde Corp. 1993.
- (5) Colonel Wm. T. McLyman "Transformer and Inductor Design Handbook" 1996.
- (6) Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins "POWER ELECTRONICS Converters, Applications, and Design" 1994.

◇ 저 자 소 개 ◇

성 병 기 (成炳壽)

1970년 6월 5일생. 1997년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 PSTEK 근무.

박 성 준 (朴 晟 濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대 지능기계공학과 박사과정. 거제대학 전기과 조교수.

김 광 태 (金光泰)

1952년 3월 1일생. 1983년 경남대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1985년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 2월 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산정보대학 전기전자계열 부교수.

김 철 우 (金 喆 禹)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경 공업 대학 전기전자공학과 객원교수. 1986년 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 공대 전자전기통신공학부 교수. 당 학회 평의원