

공진형 인버터를 이용한 유도가열 시스템의 주파수 제어에 관한 연구

우형균, 유재훈, 권혁민, 신대철
호서대학교

A study on the frequency control of Induction Heating System for Using Resonant Inverter.

Hyoung Gyun Woo, Jae Hoon Yoo, Hyuk Min Kwon, Dae Chul Sin
Hoseo Univ.

ABSTRACT

In this paper is described frequency control of Induction Heating System for using the resonant high-frequency inverter. To follow in output temperature and frequency in order to change, it controls a system and it confirms the electric change of induction heating system.

1. 서론

유도 가열의 기초가 되는 전자기유도 현상은 패러데이에 의해 발견되었다. 그 이후 전자기유도의 잠재적 응용성을 인식한 많은 사람들은 수십 년에 걸쳐 고주파의 교류 전류를 발생시키는 장치를 개발하는데 몰두하였다. 최근에는 전압구동 제어 소자로 구동 회로의 전력 소모가 적고 스위칭 속도가 빠른 중대용량 스위칭 소자(GTO, MOSFET, IGBT)가 개발되어 수백 [kHz]대 또는 그 이상의 고속 스위칭이 가능해짐에 따라 전력 변환 장치의 응용 기술이 날로 발전하고 있다.

본 논문에서는 직접 제작한 1[kW]의 고주파 유도가열 시스템을 사용하여 출력 온도에 따라 주파수를 변화하도록 시스템을 제어하여 유도가열 시스템의 전력변화를 확인하고 그에 따른 안정성을 논하고자 한다.

2. 유도가열 시스템

2.1 유도가열의 원리

그림 1과 같이 고주파 교류 전원, 가열 코일, 피가열체로 구성이 되면 패러데이의 전자 유도 현상에 의해 가열 코일에 고주파 교류 전류가 흐를 때 발생하는 고주파 자기 중에 도전성을 가지는 금속을 위치시키면 금속에 식(1)의 유기기전력이 발생되고 이로 인하여 금속의 표면에 와전류가 유기기전력에 의해 $\rho \cdot I^2 R$ 의 전력크기만큼 주열 열을 발생시키는 원리이다. 이러한 열의 대부분은 식(2)로 표현되는 표피 두께 δ 내에 분포하게 되며, δ 는 유도 가열의 여러 응용분야에서 인버터 동작 주파수를 결정하는 주요한 요소가 된다.

$$e = - N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

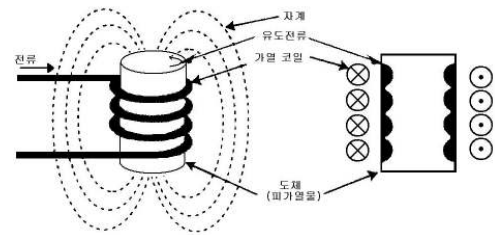


그림 1. 유도 가열의 원리
Fig. 1. Principle of induction heating.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (2)$$

여기서 ρ :저항률(Ωm), μ_0 :비투자율, f :주파수(Hz)

유도가열의 부하는 직렬 RLC회로를 구성하고 있다. 직렬 RLC회로에 대한 입력 임피던스는 식 (3)과 같다.

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (3)$$

식 (3)의 허수 부분이 식 (4)와 같은 조건을 만족하면 0이 된다.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (4)$$

위의 관계를 만족하는 ω 의 값을 공진주파수 ω_0 라고 하면 식 (5)과 같다[3].

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

공진상태에서는 전압과 전류가 동상이므로 위상각이 0이고 역률이 1이 된다. 직렬 회로의 경우 공진 상태에서 임피던스가 최소가 되므로, 주어진 전압에 대해 전류가 최대가 된다. RLC 직렬회로에 대한 선택도를 Q 라고 할 때 식 (6)과 같고, 입출력 전압의 관계를 ω 와 Q 로 나타내면 식 (7)와 같다.

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega RC} \quad (6)$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (7)$$

식 (6)은 Q 가 R 에 종속적이며, R 에 반비례 관계를 알 수 있다. R 의 변화에 따른 Q 의 변화와 Q 에 따른 주파수 선택성을 보여주며, 식 (7)는 스위칭주파수에 따른 진폭을 나타낸다.

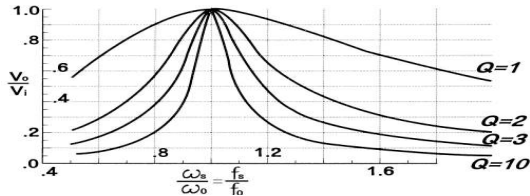


그림 2. 주파수 특성
Fig. 2. Frequency characteristics.

그림 2은 Q 가 큰 회로는 대역폭이 작아서 매우 선택적임을 보여주며, 스위칭주파수가 공진주파수와 같을 때 진폭이 가장 큼을 보여주고 있다.

2.2 유도 가열 시스템의 구조

그림 3은 유도 가열 시스템의 구조를 나타낸다. 절연 파이프의 가열 용기 내부에 발열체인 충전물을 워크코일로부터 전자 유도에 의해 와전류로 발열시켜 절연파이프 용기에 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 충전물에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 충전물을 급속가열이 가능하게 하는 새로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

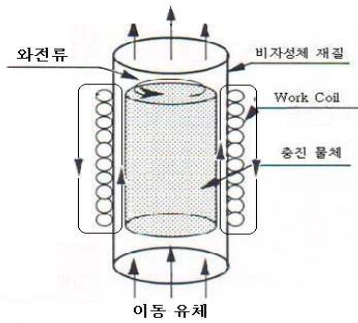


그림 3. 유도 가열 시스템의 구조
Fig. 3. Configuration of the induction heating system.

2.3 고주파 공진형 인버터

그림 4은 고주파 인버터로서 Half-Bridge 직렬 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 충전물의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성되는 전기회로 모델로 볼 수 있다. 실제로 워크코일과 피가열 물체계의 사이에 정합 트랜스가 사용되는데 R-L부하와 L을 보상하는 C로부터 직렬 공진 회로계를 위한 고효율 운전을 위하여 인버터의 동작 주파수 선정이 매우 중요하다. 이는 R-L 회로에 직렬보상 C를 사용하여 R-L-C 직렬부하 공진회로 부하계를 구성하는데 발열체를 극한정도까지 가열하지 않으면 전기회로 정수는 거의 변화하지 않기 때문에 R-L회로계로 볼 수 있으므로 직렬부하보상 콘덴서 C는 R-L부하계의 R이 IGBT의

도통 저항에 비해 작은 경우에는 직렬 인덕턴스를 갖는 병렬공진회로가 효율적 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

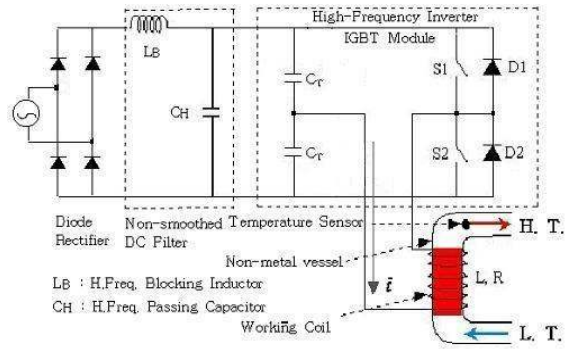


그림 4. 하프-브릿지 공진형 인버터
Fig. 4. Half-bridge resonant inverter.

3. 실험 및 고찰

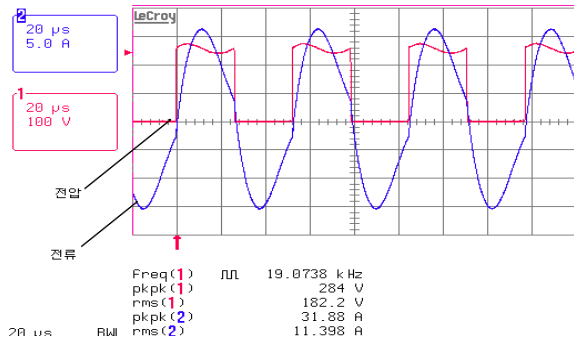
본 실험에서 사용한 IGBT모듈은 페어차일드사의 FMG2G100US60제품으로 내압이 $600[V]$, $100[A]$ 이다. 또한 1차측 파라미터로 용량이 $0.1[\mu F]$ 인 콘덴서를 여러개 병렬 연결하여 사용하였으며, 코일 값인 인덕턴스는 $100[\mu H] \sim 200[\mu H]$ 으로 조정하였다.

공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 적절한 용량의 것을 사용하였다. 브릿지 다이오드 뒷단에 사용되는 LC필터는 상용주파수의 전원측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특히 선전류의 정현파화 기능을 갖도록 설계하는데 소형화로 구성된 시스템 특성상 리플성분을 그대로 통과시킬 수 있도록 작은 용량의 필터를 선정하였다. 또한 필터 선정 시 역률 제어 특성을 고려하여 통상 LC 필터로 사용되는 인덕턴스는 수십 $[\mu H]$, 콘덴서는 수 $[\mu F]$ 정도의 용량을 사용하였다.

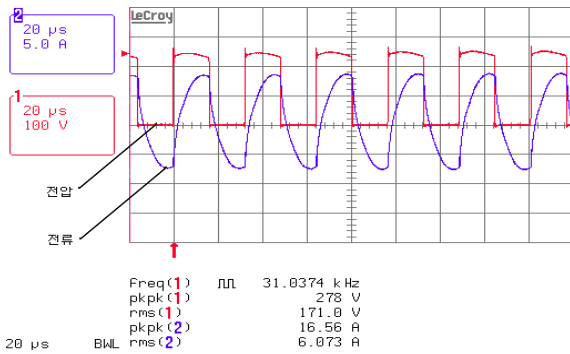
표 1은 주파수에 대한 입,출력 전류변화이다. 이 유도 가열 시스템의 공진 주파수는 $18[kHz]$ 이다.

표 1. 각 주파수의 전류변화
table 1. Current change of each frequency

주파수[kHz]	전압[V]	입력전류[A]	출력전류[A]
19	200	4	11.40
20	200	3.9	10.89
21	200	3.73	10.55
22	200	3.49	9.67
23	200	3.25	8.91
24	200	3.04	8.78
25	200	2.85	8.51
26	200	2.68	7.59
27	200	2.53	7.13
28	200	2.40	6.95
29	200	2.28	6.74
30	200	2.17	6.54
31	200	2.07	6.07



(A) 주파수[19kHz]



(B) 주파수[31kHz]

그림 5. 주파수에 따른 전압 및 전류파형
fig 5. Waveforms of output voltage and current according to frequency

그림 5은 주파수에 따른 부하 양단의 전압 및 전류파형을 나타낸 것이다.

출력에 따른 주파수 가변을 위해 PICBASIC 2000 KIT와 온도조절기를 사용하였다. 온도조절기는 4~20mA의 출력을 내는데 이를 전압으로 변환하여 PICBASIC KIT의 입력으로 넣고 그에 따른 출력으로 주파수를 가변하였다.

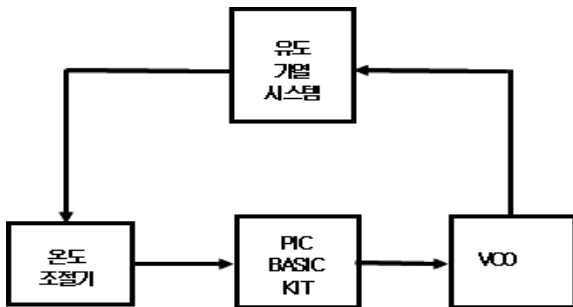


그림 6. 유도가열 시스템 구성도
fig 6. A block diagram of induction heating system

그림 6은 제어를 하기위해 제작한 유도가열 시스템의 구성도이다.

표 2. 출력에 따른 전압 및 주파수
table 2. Voltage and frequency according to output voltage

온도조절기 출력전압 [V]	PICBASIC KIT디지털 출력(0~4095)	VCO입력 [V]	주파수 [kHz]
1V	4095	4.1	34
2V	3276.8	3.4	30
3V	2457.6	2.8	26
4V	1638.4	2.2	22
5V	819.2	1.5	18

표 2는 직접 실험하여 얻은 온도조절기 출력에 대한 전압 및 주파수이다. PICBASIC KIT에서 온도에 대한 제어가 이루어진다.

5. 결론

유도가열에 의한 유체가열방식은 절연체 용기 내에 특수 스텐레스 합금의 박판 적층형 규칙 충전발열체를 수납하여 용기 외부의 고주파 공진형인버터 접속의 위킹코일로부터 비접촉 상태로 전자유도 와전류를 구조체에 흘림으로서 발열하게 된다. 이러한 상태에서 주파수의 가변은 전자유도 와전류의 흘림을 변화시킬 수 있다.

본 논문에서는 공진형 인버터를 이용해 각각의 주파수에 따른 유도 가열 시스템의 전력 변화와 그에 따른 온도제어를 제안하였다. 주파수에 대한 동작특성을 확인하여 공진형 인버터를 이용한 유도 가열 시스템의 안정성을 확인하고 주파수 선택도에 따른 전류의 변화 역시 확인할 수 있었다.

앞으로 고주파 인버터의 스위칭 손실 및 노이즈 대책, 고성능화 그리고 시스템의 출력 제어를 위한 컨트롤러 및 보호회로의 설계에 대한 연구가 필요하며, 유도 가열의 보다 넓은 응용분야에 대한 연구가 진행되어야 한다.

참고 문헌

- [1] Y J KIM, K H KIM, D C SHIN, "Electromagnetic Indirect Induction Fluid Heating System using Series Resonant PWM Inverter and Its Performance Evaluations", 전력전자학회 논문집, 2004년 4월.
- [2] 권혁민, 신대철, 김기환, 김용주, "간접유도가열용 고주파 공진형 인버터 시스템에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp. 322 ~ 325, 2002년 7월.
- [3] 최규하, "반도체 전력변환을 중심으로 한 전력전자", pp. 269 ~ 331, 2003년 2월.
- [4] 신대철, 권혁민, 김기환, 김용주, "유도가열용 고주파 공진형 인버터를 이용한 과열증기 발생장치 개발에 관한 연구", 전력전자학회 논문집, pp. 119 ~ 125, 2004년 4월.
- [5] S. B. Yoo, D. Y. Lee, D. S. Hyun, "Characteristics and System Trend of Induction Heating Inverter", Proceedings of KIEE, vol. 50, No. 2, p.22, FEB, 2001.