

유도 가열기의 제어시스템에 관한 연구

김동운* 성낙규* 최기수** 안규복** 이승환*** 한경희*
*명지대학교 전기공학과 에너지 변환 연구실 **Intech-FA ***대덕대학

A Study on Control System Of Induction Heating

Dong-Un Kim*, Nark-Kuy Sung*, Kyung-Hee Han*, Gi-Soo Choi**, Gyu-Bok Ahn**, Seung-Hwan Lee***
Dept. of Electric Eng. in Myong-Ji University*, Intech-FA**, Dae-Duck College***

Abstract - In this paper, a control scheme for induction heating is proposed. The propose scheme estimates resonant frequency by PI control subbing a phase of output voltage and resonant capacitor voltage. There are would be two advantages in the proposed system over existing induction heating system. One is the rapid resonant frequency estimation. Aother is the just control of temperature. Power Circuit is used a inverter stack and transformer rated on 5.5kw.

1. 서 론

유도 가열 시스템은 전력용 반도체 소자의 발전으로 진공관에서부터 효율이나 작업속도를 개선시킨 고주파 공진형 인버터 시스템으로 발전이 이루어져 왔다. 종래의 가스로, 중유로등에서의 에너지 효율이나 환경 규제 등으로 인해 유도 가열기로 전환되어지는 추세이고 사용범위도 광범위하게 되었다. 또한 제품의 품질 면에서 볼때 가열시간이 짧아 열 영향이 적어 변형이 적고 필요부분의 국부 열처리와 가열 깊이의 조절이 용이하고 가열물의 자체발열이므로 에너지 효율이 높은 장점을 가지고 있다. 그러나 기존의 유도 가열 시스템의 경우 아래의 부하 조건에 따른 민감한 파라미터 변동에 빠르게 대처를 하지 못하는 단점을 가지고 있다.

- 1. 가열 코일 내에서의 가열물의 위치, 종류
 - 2. 가열 코일을 통과하는 가열물의 속도
- 그러므로 가열물의 가열 시 빠르게 변화하는 파라미터를 추종할 수 있는 제어가 필요하다.

본 논문에서는 부하 파라미터 변동에 민감하게 동작하는 유도 가열용 직렬 공진형 인버터를 위한 효과적인 제어기에 대해 제안하였다. 공진 캐패시터 전압의 위상과 현재 출력 전압의 위상을 이용하여 공진 주파수를 추종하도록 제어함으로써 가열물의 균일한 가열이 되도록 하였고 또한 고효율 운전이 가능하도록 하였다.

2. 유도 가열 제어 시스템

2.1 유도 가열의 원리

고주파 유도 가열은 전자유도 작용에 의한 것으로 와전류 손실과 히스테리시스 손실에 의하여 열이 발생한다. 이러한 열의 대부분은 식(1)로 표현되는 표피두께 δ 내에 분포하게 되며 δ 는 유도 가열의 여러 응용분야에서 인버터 동작 주파수를 결정하는 주요한 요소가 된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot \frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (1)$$

ρ : 저항률($\Omega \cdot m$), μ_r : 비투자율, f : 주파수(Hz)

가열 부하의 표피저항은 두께, 가열코일내에서의 위치, 부하의 도전율과 투자율, 동작 주파수 등에 의해 변한다. 이때 저항은 와전류에 의한 표피두께 δ 에 의해 결정되므로 실제 유도 가열에 의해 발생하는 출력 전력

은 저항과 전류의 관계에 의해 다음과 같이 표현된다. [1][2]

$$R = \frac{\rho}{\delta} = k\sqrt{\rho \mu_r f} \quad (2)$$

$$P = k \cdot I^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (3)$$

여기서, k 상수 ($\sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}}$)

2.2 유도 가열 부하의 특성

표 1은 27.2kHz의 주파수에서 금속 재질에 따른 전기적 특성을 나타내고 있다. 여기서, 알루미늄과 같은 비자성체는 철과 같은 자성체에 비해 훨씬 낮은 저항률과 투자율을 가지므로 가열 부하로 비자성체를 적용 시에 출력 전력을 증가 시키기 위해서는 식(3)으로부터 가열 코일에 흐르는 전류나 주파수의 증가와 같은 조건이 필요하게 된다. 그러나 이러한 조건을 만족시키기 위한 주파수와 전류 크기의 증가는 가열 코일의 표피효과로 인해 코일의 저항을 증가시켜 인버터 시스템의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 인버터 전력 특성이 자성체에 비해 상대적으로 훨씬 더 민감하게 된다. [3]

재질	철	알루미늄
특성		
저항률(ρ)	9.8×10^{-8}	2.5×10^{-8}
비투자율(μ_r)	100	1
표피두께(δ)	0.0955	0.4825
표피저항(R)	10.24×10^4	0.518×10^4

표 1. 금속 재질에 따른 전기적 특성

2.3 유도 가열 시스템 구성

그림 1은 유도 가열기의 전체 시스템을 보여주고 있다. 4개의 스위치와 역병렬 다이오드를 가지는 Full-Bridge 인버터를 주회로로 사용하였고 변압기를 통해 가열 코일(L)과 공진 캐패시터(C)를 절연하였다. 프리휠링 모드가 없는 Half Bridge 인버터는 L부하가 큰 경우 전압 스파이크로 인해 스위치 off시 손실이 많은 반면 Phase-Shift 방식의 Full-Bridge 인버터는 프리휠링 모드를 가지므로 스위치 off시의 손실을 줄일수 있다.

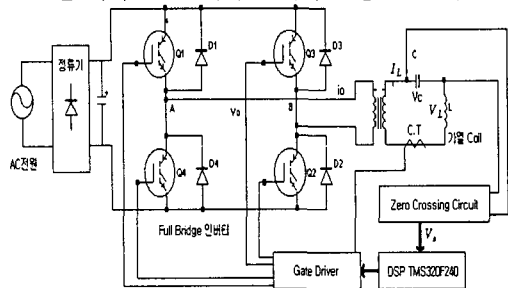


그림 1. 유도 가열기의 전체 시스템

2.4 제안한 공진점 추종 알고리즘

유도 가열기는 공진 주파수에서 최대 효율을 가지는데 가열물의 두께와 종류, 코일 내에서의 위치에 따라 주파수가 빠르게 변하기 때문에 이것을 추종하는 알고리즘은 간단하고 빠른 연산이 가능해야만 한다. 본 논문에서는 빠른 연산이 가능하도록 공진 캐패시터 전압의 위상과 현재 출력 전압의 위상을 사용하였다. 그림 3은 공진주파수일 때 공진 캐패시터 전압의 위상과 출력 전압과의 관계를 보여주고 있다. 공진 조건일 때 출력 전압의 위상보다 공진 캐패시터 전압의 위상이 90도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 만약 공진 캐패시터의 위상이 출력 전압의 위상보다 90도 보다 앞서면 가열 코일의 임피던스보다 공진 캐패시터의 임피던스가 더 커지게 되고 공진 주파수를 벗어나게 된다. 또한 공진 캐패시터의 위상이 출력 전압의 위상보다 90도 보다 뒤지면 공진 캐패시터의 임피던스보다 가열 코일의 임피던스가 더 커지게 되고 공진 주파수를 벗어나게 된다. 이런 관계를 이용하여 출력 전압의 위상과 공진 캐패시터 전압의 위상을 90도가 되도록 PLL하면 항상 공진 조건을 만족하게 된다.

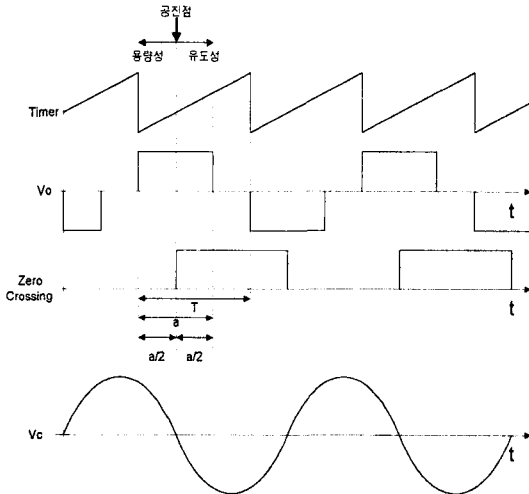


그림 2. 공진점 추종 알고리즘

2.5 제어 블럭

그림 3은 제안한 유도 가열기의 제어 시스템 블럭을 보여주고 있다. 우선 공진 주파수를 추종하기 위해 공진 캐패시터의 전압(V_c)을 검출받아 제로크로싱 회로를 거친 위상과 현재 출력 전압 위상($a/2$)의 차를 PLL을 하고 그 출력을 PI제어를 함으로써 지령치 주파수를 얻는다. 또한 가열물의 온도 제어를 하기 위해서는 부하의 전류제어가 필요하다. 부하전류와 전류 지령치의 차를 PI제어 함으로써 전류제어가 가능하도록 하였다.

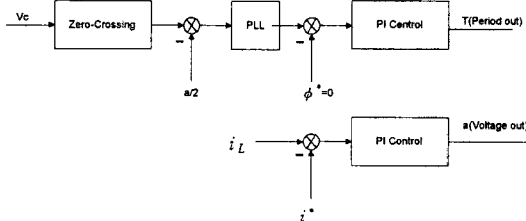


그림 3. 제안한 제어 블럭

3. 실험 결과

제안한 유도 가열기의 시스템은 그림 4, 5, 6과 같이 구성하였다. 그림 4는 TMS320F240과 SMPS와 광

라이버로 구성된 유도 가열 시스템의 디지털 제어를 보여주고 있다. 그림 5는 광 게이트 드라이버와 Full-Bridge 인버터(5.5kw)의 주회로를 보여주고 있다. 그림 6은 가열할 때 사용하는 가열 코일이다. 시스템의 파라미터는 다음 표2와 같다

표 2. 시스템 파라미터

입력 전압	AC 50Volt
공진 캐패시터	6uF
가열 코일	5.3uH
변압기 턴수	12(1차):2(2차)

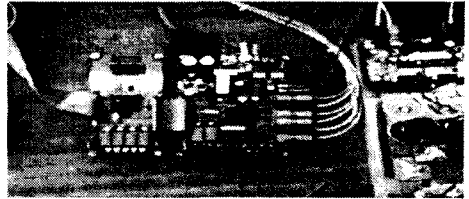


그림 4. 디지털 제어기, 광 드라이버, SMPS

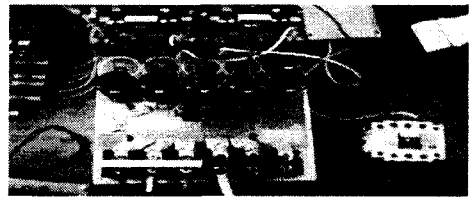


그림 5. 인버터 주회로, 게이트 드라이버

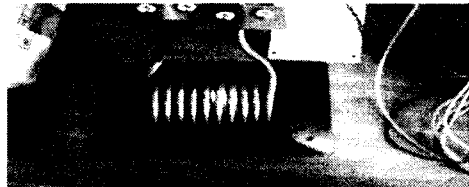


그림 6. 가열 코일

유도 가열기의 가열 코일에 가열물이 있지 않을 경우와(무부하시), 쇠 파이프나 알루미늄 파이프를 넣었을 경우 모두 정전류 제어가 되도록 하였다.

그림 7은 유도가열기의 가열 코일에 가열물이 있지 않을 경우(무부하시)의 출력 전압 및 전류, 공진 캐패시터의 전압과 제로크로싱 전압을 보여주고 있다. 무부하시 공진 주파수는 27.2kHz인데 이론상의 공진 주파수보다 0.8kHz정도 낮다. 이것은 변압기의 코일의 L값과 도선의 L값의 영향으로 주파수가 낮아진 것이다. 실제 직렬 L-C 공진 회로에서 주파수가 공진 주파수에 도달하면 L과 C의 임피던스가 같고 위상이 180도 차이가 있다. 그림 8에서 보는 것과 같이 공진주파수 부근에서는 위상은 180도 차이가 나지만 공진 캐패시터와 가열 코일의 전압 크기가 다르다. 이것은 공진 캐패시터와 가열 코일의 내부 저항 성분으로 인해 출력 전압의 크기가 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 인버터 스위칭시 데드타임때 플로팅 상태이므로 가열코일의 전압 파형에서 스파이크가 나타난다.

그림 9는 유도 가열기의 가열 코일에 쇠 파이프를 넣었을 경우의 출력 전압 및 전류, 공진 캐패시터의 전압과 제로크로싱 전압을 보여주고 있다. 가열 코일 안에 강자성체가 들어 감으로 인해 가열 코일의 L값과 등가적인 임피던스가 커지므로 무 부하 시보다 공진 주파수가 2.4kHz정도 떨어지는 것과 입력 전류가 커짐을 확인할 수 있었다. 그림 10은 공진시 L과 C의 전압파형이다. 그림 11는 유도 가열기의 가열 코일에 알루미늄 파이프를 넣었을 경우의 출력 전압 및 전류, 공진 캐패

시터의 전압과 제로크로싱 전압을 보여주고 있다. 코일 안에 비자성체가 들어 감으로 인해 가열 코일의 L값과 등가적인 임피던스가 작아져서 무부하시 보다 공진 주파수가 0.8kHz정도 상승하고 입력전류가 작아짐을 확인할 수 있었다. 그림 12는 공진시 L과 C의 전압파형이다.

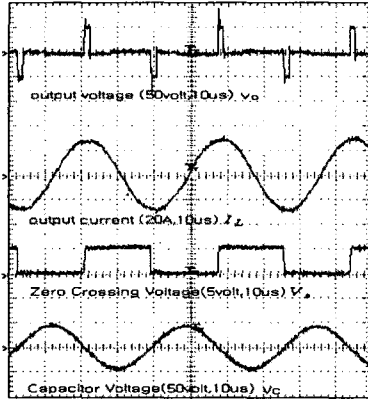


그림 7. 무부하시 유도 가열기 출력 파형

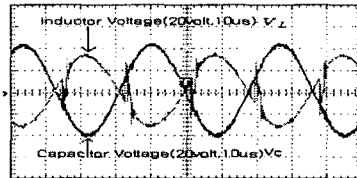


그림 8. 공진시 L과 C의 전압 파형 (무부하시)

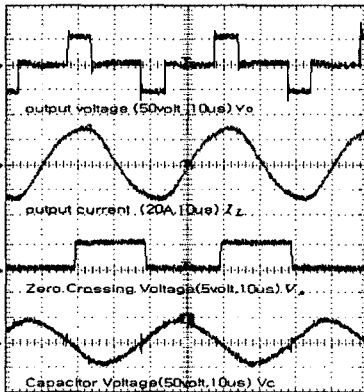


그림 9. 쇠 파이프 가열시 유도 가열기 출력 파형

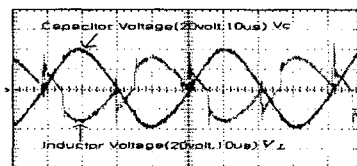


그림 10. 공진시 L과 C의 전압 파형(쇠 파이프)

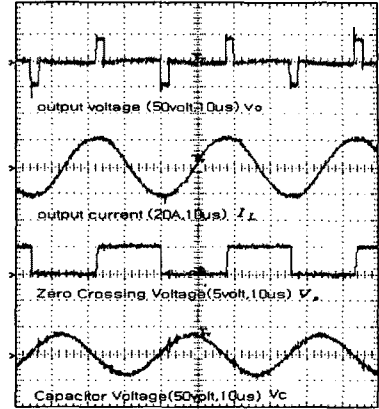


그림 11. 알루미늄 파이프 가열시 유도 가열기 출력 파형

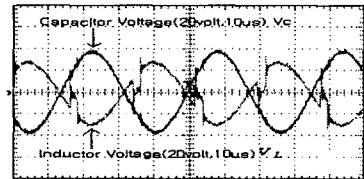


그림 12. 공진시 L과 C의 전압 파형(알루미늄 파이프)

4. 결 론

기존의 전류 위상을 사용한 유도 가열 방식에서는 필터나 위상 변조 회로를 사용함으로써 위상 지연 요소가 생기는데 제안한 제어기는 공진 캐패시터의 전압을 받으므로 노이즈가 적고 바로 제로크로싱 회로에 연결할 수 있어 빠르고 정확하게 검출할 수 있다. 또한 출력 전압의 지령치 값은 DSP 내부의 타이머 값에서 읽으므로 보다 정확한 연산이 가능하다. 그리고 주파수를 변화 시키지 않고 Duty를 가변함으로써 전류제어가 가능하므로 인버터의 효율을 높일 수 있는 장점을 지니고 있다.

본 논문에서는 가열체의 종류와 두께, 움직이는 속도에 따라 변하는 부하 파라미터를 효과적으로 추종할 수 있는 제어기에 대해 제안하였으며 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Mokhtar Kamli, Shigenhiro Yamamoto, and Minoru Abe. "A 50-150kHz Half-Bridge Inverter for Induction Heating Applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 1, pp. 163-172, 1996
- [2] Henry W. Koertzen, Jacobus D. van Wyk, and Jan A. Ferreira. "Design of the Half-Bridge, Series Resonant Converter for induction Cooking", IEEE-PESC Conf. Rec. pp. 729-735, 1995.
- [3] 권영섭, 현동석, "자성 및 비자성용 유도 가열 시스템의 성능과 안정성 향상을 위한 개선된 적응 제어 기법", 대한 전기학회 춘계 전력전자 연구회 논문집, 100-105, 1998