

위킹코일 온도를 고려한 All Metal IH 제어 알고리즘 설계

박상민¹, 주동명¹, 장은수¹, 강홍주², 이병국^{1†}
¹성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과, ²삼성전자

Design of Control Algorithm for All Metal IH Cooking Heater Considering Working Coil Temperature

Sang Min Park¹, Dong myoung Joo¹, Eun Su Jang¹, Hong Ju Kang², and Byoung Kuk Lee^{1†}

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University
²Samsung Electronics

ABSTRACT

본 논문에서는 자성체 및 비자성체 용기 판별이 가능하고 위킹코일 온도 변화가 고려된 All Metal IH(Induction Heating) 제어 알고리즘을 설계한다. 용기 재질과 위치에 따른 파라미터를 분석하여 전력 Curve fitting 모델링을 통해 용기 판별을 수행하고 비자성체 가열 시 급상하는 위킹코일 온도를 반영하여 변화하는 전력 제어 알고리즘을 보상한다. 설계된 All Metal IH 제어 알고리즘은 실험을 통해 검증한다.

위킹코일 온도가 상승함에 따라 변동되는 부하 파라미터 값들과 관계없이 적응적으로 동작할 수 있는 제어 알고리즘 구현이 필수적으로 요구된다.

따라서 본 논문에서는 All Metal IH 레인지의 성능 및 안정성 향상을 위해 전력 Curve fitting 모델링을 통하여 용기 재질 및 위치를 빠르게 판단이 가능하고, 위킹코일 온도를 제어 기법에 반영함으로써 부하 파라미터 변동에 민감하게 동작이 가능한 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 All Metal IH 제어 알고리즘은 3.2kW급 Cooking Heater를 이용한 실험 결과를 통해 그 타당성을 검증한다.

1. 서 론

기존 인덕션 레인지는 흔히 가정에 보급되어 있는 조리용기인 알루미늄, 구리, 스테인리스 스틸 등 통상의 제품들을 사용할 수 없으며, 인덕션 레인지에서 발생하는 자장에 의해 자기 유도되기 위해서 위킹코일에 근접하는 부분인 용기 바닥면이 전도체로 형성된 조리용기만 사용할 수 있다. 따라서 유도가열 조리용기 뿐만 아니라 비자성체 용기를 포함한 모든 용기를 가열할 수 있는 All Metal IH 제품의 연구 개발이 필요하다.

비자성체 용기는 표 1과 같이 낮은 비저항과 비투자율을 갖기 때문에 유도가열이 어렵고 높은 동작 주파수가 요구되며, 자성체 용기와 비자성체 용기의 특성 차이로 인하여 운전 동작 모드를 달리해야 한다^[1]. 따라서 All Metal IH를 구현하기 위해서는 용기 재질 및 위치 판별이 가능한 시스템이 필요하며,

2. All Metal IH 제어 알고리즘 설계

2.1 전력 Curve-fitting 모델링 및 용기판별 알고리즘

All Metal IH 가열을 구현하기 위한 토폴로지는 공진 커패시터 절체방식의 Half Bridge 직렬 공진형 컨버터를 사용한다^[2]. 따라서 용기 재질이 자성체인지 비자성체인지 판단하여 각 용기에 맞는 모드로 동작하기 위해서는 초기 용기 판별 알고리즘이 필요하다. 또한 가열 중 용기를 들어 올리거나 위킹코일 중앙에서 벗어날 시 전력이 차단되어야 하며, 다른 재질의 용기로 교체한다 하여도 정상적으로 모드 변경 후 가열 동작하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 주파수별 실제 전력곡선을 Matlab 시뮬레이션과 실험을 통한 Curve fitting 모델링을 이용하여 제어 알고리즘을 설계한다. 그림 1은 초기 Soft Start 시작점인 140kHz에서 115kHz까지의 용기별 전력을 나타낸다. 초반 전력 차이를 이용하여 용기 재질을 판별 후 각 동작모드로

표 1 용기 재질에 따른 파라미터 값
 Table 1 Parameter Value According to Pot Materials.

Parameter		High Resistivity	Low Resistivity
		(Fe)	(Al)
Resistivity	[$\rho(\mu\Omega m)$]	0.17	0.027
Relative Permeability	[μ_s]	200	1
Operating Power	[W]	400~3200	400~2600
Operating Frequency	[kHz]	28~51	105~110
Maximum Coil Current	[A_{rms}]	19	48
Working Coil Max. Temp.	[$^{\circ}C$]	50	145

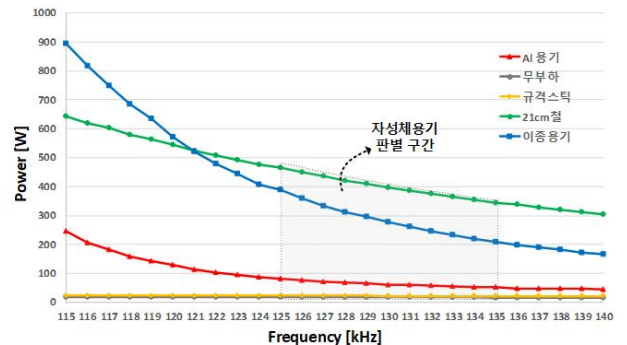


그림 1 전력값을 이용한 용기 재질 판별 구간
 Fig. 1 Pot material discrimination section using power value.

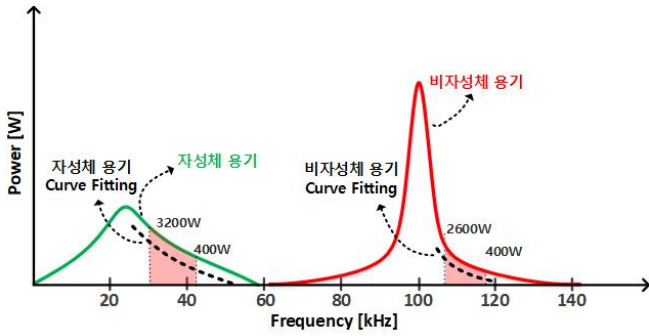


그림 2 용기 재질에 따른 주파수별 전력 곡선
Fig. 2 Power curve by frequency according to pot materials.

운전한다. 이중 용기는 비자성체 용기를 자장의 유도를 위해 바닥면에 철(Fe)성분을 도포한 유도가열 용기를 의미한다. 그림 2는 용기별 실제 전력곡선과 Curve fitting 곡선의 비율을 조절하여 전력 Under Limit를 구현한 것을 나타낸다. 가열 중 용기가 중량을 벗어나면 부하 저항 R_{eq} 가 감소하여 목표전력을 추종하기 위하여 주파수가 감소하는데 이때 해당 운전 주파수에서 Curve fitting 곡선보다 전력이 낮아지는 순간 전원이 차단된다. 또한 용기가 없는 무부하 상태거나 손가락 같은 물체가 올라왔을 시 전력추종을 위해 주파수가 감소하면 자동적으로 전력 Under Limit에 도달하여 전원이 차단된다.

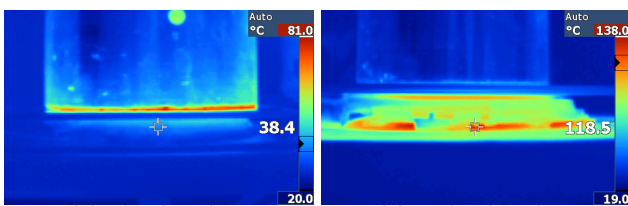
2.2 워킹코일 온도 보상 설계

알루미늄과 같은 비자성체 용기는 표 1에서 확인할 수 있듯이 낮은 비저항과 비투자율 특성으로 인하여 식 (1)로 표현되는 용기 저항값 확보를 위하여 운전 주파수를 증가시켜야 한다. 또한 식 (2)로부터 출력 전력을 증가시키기 위하여 코일의 턴수를 증가시켜야 하지만 이런 조건들은 가열 코일의 표피 효과(Skin Effect)와 근접 효과(Proximity Effect)로 인해 코일의 저항을 증가시키며, 비자성체 가열 시 상대적으로 높은 전류가 흐르므로 워킹코일 온도가 상승하는 문제점이 발생한다.

$$R_{pot} = \frac{\rho}{\delta} = k \sqrt{\rho \mu_r 2\pi f} \quad (1)$$

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

그림 3은 자성체/비자성체 용기 가열 시 워킹코일 온도를 열관측기(Thermal Imager)로 촬영한 사진이다. 동손으로 인하여 워킹코일 온도가 상승하여 페라이트의 큐리(Curie) 온도로 가깝게 접근할수록 투자율이 급격히 감소하고 코일 저항 상승으로 인하여 가열 효율이 저하되므로 그림 4처럼 목표전력을 추종하기 위해서는 주파수를 감소시켜야 한다. 따라서 비자성체 가열 시 Curve fitting 모델링으로 구현한 전력 Under Limit 곡선은 온도에 따라서 좌측으로 이동하며 감소해야 한다. 자성체 가열 시 워킹코일 온도는 최대 50°C 수준이지만 비자성체 가열



(a) 자성체 용기 (b) 비자성체 용기
그림 3 용기 재질에 따른 워킹코일 온도
Fig. 3 Working coil temperature by pot materials

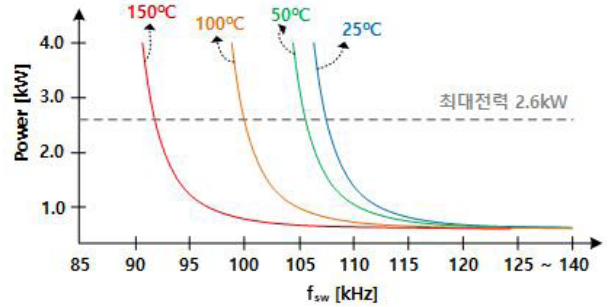


그림 4 온도 상승에 따른 전력곡선 변화량
Fig. 4 Power curve variation based on coil temperature.

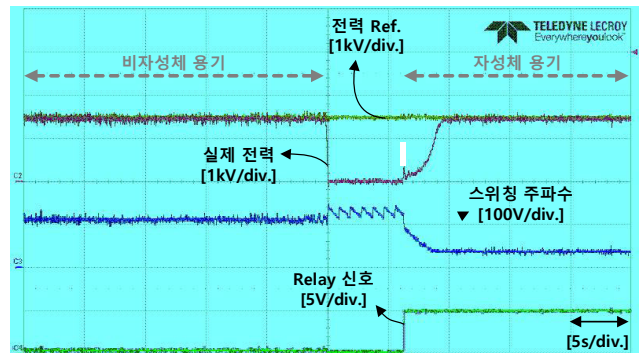


그림 5 비자성체/자성체 용기 교체 가열시험
Fig. 5 Alternative heating experiments of Fe/Al pots.

후 워킹코일에 남아있는 잔존 열이 있는 상황도 고려해야하기 때문에 온도보상이 필요하다. 워킹코일 온도는 표면아래 열전대(Thermocouple)를 직접 부착하여 순시 온도를 측정하고, 제어 알고리즘에 온도 정보를 반영하여 Curve fitting 용기판별 곡선과 전력 Under Limit의 비율을 조절한다. 그림 5는 비자성체 용기를 5분 이상 충분히 가열 후 자성체 용기로 교체한 실험 파형이다. 워킹코일 온도가 100°C를 넘긴 상태에서 정상적으로 자성체 용기를 판별하여 공진캡 Relay가 붙고 자성체 모드로 변환 후 목표전력을 추종하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 All Metal IH 레인지의 성능 및 안정성 향상을 위해 전력 Curve fitting 모델링을 통하여 용기 재질 및 위치를 빠르게 판단이 가능하고, 워킹코일 온도를 제어 기법에 반영함으로써 부하 파라미터 변동에 민감하게 동작이 가능한 제어 알고리즘을 설계하였다. 설계된 제어 알고리즘의 정상동작 유무는 실험을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] I.Millan, J.M Burdio, "Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all metal domestic induction heating", *IET Power Electron.*, 2011, Vol. 4, No. 5, pp. 587-592.
- [2] H. Sadakata, A. Fuhita, and S. Sumiyoshi, "Latest practical developments of triplex series load resonant frequency operated high frequency inverter for induction heated low resistivity metallic appliances," *Proc. IEEE APEC Expo.*, 2010, pp. 729-735.