

자성 및 비자성 용기 겸용 HB 공진형 인버터 유도 가열기를 위한 공진 네트워크 설계 및 제어 알고리즘

임종모, 안정훈, 김옥진, 유승희, 이병국[†]
 성균관대학교 정보통신공학부

Magnetic Substance Detecting Method for All Metal Induction Heating System

Jong Mo Lim, Jung Hoon Ahn, Og Jin Kim and Byoung Kuk Lee[†]
 College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 유도가열 시스템의 자성체 판별 알고리즘을 제안한다. 코일의 형상 및 구성에 따른 임피던스를 수학적으로 분석하여 자성체와 비자성체 동시 가열을 위한 유도 코일을 능동적으로 설계 한다. 또한 인버터 출력전압과 부하 전류를 센싱하여 계산한 임피던스 값과 수식으로 구한 부하 임피던스를 비교해 가열 용기의 재질을 판별한다. 제안된 알고리즘을 통해 자성체 및 비자성체 유도가열을 하나의 공진형 인버터로 구현할 수 있다. 제안된 판별법은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

근래 각광 받는 유도가열조리기는 높은 효율과 안전성에도 불구하고 전용재질의 용기를 반드시 사용해야 한다는 점에서 그 한계가 있다. 하지만, 선행 연구에서 제시된 3고조파 운전방법을 이용할 경우^[1] 스위칭 주파수의 3배 높은 주파수의 공진 전류 운용을 통하여 투자율과 비저항이 낮은 비자성체 가열 및 제어를 용이하게 할 수 있다. 그러나 자성체와 비자성체 가열 시 필요한 주파수 영역과 운전범위가 다르므로 단일 인버터로 모든 재질 가열을 위해서는 적합한 운전 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 용기의 재질 및 코일의 구성에 따른 임피던스 변화 양상을 수학적으로 예측함으로써 3고조파 운전 및 기본파 운전 모두에 최적화된 코일과 공진형 인버터를 설계하였다. 또한 제안하는 금속 용기 재질 판별 알고리즘을 통하여 용기의 재질을 판단하고 용기의 종류에 따라 적합한 운전(기본파 운전, 3고조파 운전)을 하도록 지령한다. 3고조파 운전의 경우 예상되는 좁은 주파수 운용폭의 문제를 용기와 유도코일간의 거리 제어를 통하여 극복하였다. 제안한 알고리즘은 이론적 분석과 시뮬레이션 결과를 통하여 타당성과 가능성을 검증한다.

2. 모든 재질의 용기 가열이 가능한 유도가열기

2.1 코일 변화에 따른 임피던스 변화를 통한 코일설계

모든 금속용기 가열이 가능한 코일은 비자성체 가열시 무효 전력을 감소시키고 자성체 가열시 전력소모량을 충족 시켜야 한다. Maxwell's Equation을 통해 유도 가열기의 부하를 수식화 하여 유도 코일의 변화에 따른 임피던스 변화양상을 살펴본다. 임피던스 수식은 아래와 같고^{[2][3][4]}, 조건에 따른 변화 양상은 그림1과 같다.

$$R_{eq} + L_{eq} = R_0 + \Delta R + L_0 + \Delta L \quad (1)$$

$$R_0 + \Delta R = \frac{l\rho}{2\pi r_0\delta} + \omega\mu_0\pi \int_0^\infty \phi_i(k)e^{-2kl}T(k)dk \quad (2)$$

$$L_0 + \Delta L = \mu_0\pi \int_0^\infty T(k)dk - \mu_0\pi \int_0^\infty \phi_r(k)e^{-2kl}T(k)dk \quad (3)$$

R_0 는 유도코일만의 저항이고 L_0 는 인덕턴스이다. ΔR 과 ΔL 은 용기를 추가하였을 때 저항과 인덕턴스의 변화량이다. (l :코일의 길이, ρ : 코일의 비저항 r_0 :코일 도선의 반경 δ :코일의 skin depth)

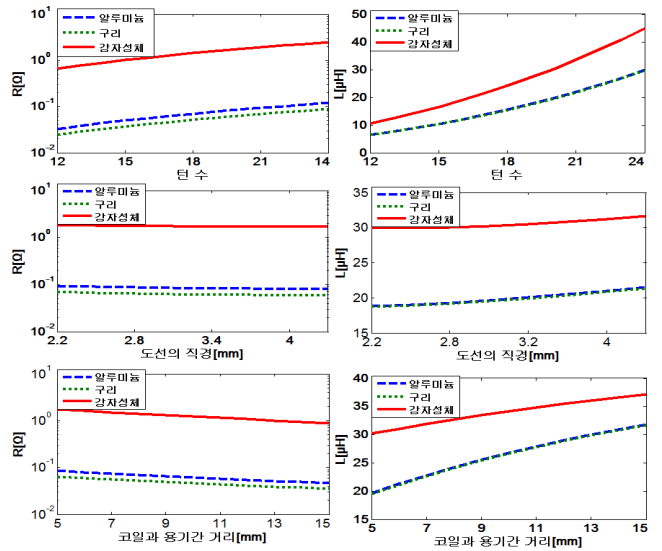


그림 1. 유도코일 변화에 따른 임피던스 변화양상.
 Fig. 1. Calculated impedance for different condition of induction coil.

비자성체 가열은 상대적으로 역률이 낮고, 자성체 가열은 출력 전력 최대치가 낮다. 단일 인버터로 자성체와 비자성체를 가열하기 위해 두 가지 모두 충족이 필요하다. 그림 1의 결과로 턴 수 증가와 유도코일의 도선 직경을 감소시킬수록 등가저항을 높일 수 있고, 등가임피던스의 증감은 두 조건의 변화로 상세시킬 수 있다. 임피던스 변화양상을 통해 비자성체 가열시

높은 역률을 갖는 부하를 설계 할 수 있다. 그러나 턴 수의 증가와 도선직경의 감소는 자성체 운전시 출력 전력의 최대값 감소를 가져오므로 자성체 최대 전력이 원하는 출력보다 낮아지지 않는 한도내에서 설계 해야 한다.

2.2 공진형 HB인버터의 설계

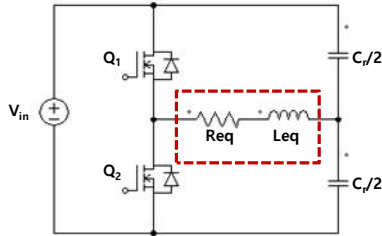


그림 2. 유도가열기의 직렬 공진형 인버터와 등가부하 회로.
Fig. 2. Series resonant inverter and equivalent load circuit of induction cooker.

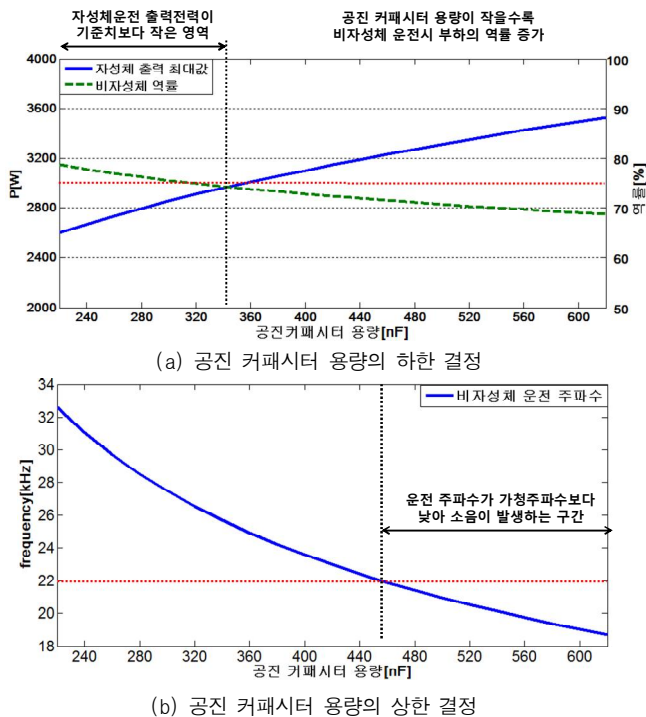


그림 3. 공진 커패시터의 용량 결정.
Fig. 3. Selection of resonant capacitor.

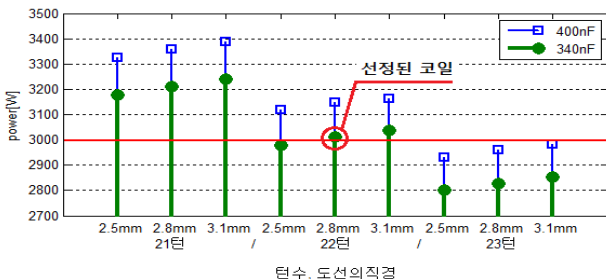


그림 4. 유도코일과 공진 커패시터의 선정.
Fig. 4. Selection of induction coil and resonance capacitor.

유도 가열장치의 전원부는 그림 2와 같이 직렬 공진형 HB (Half bridge)인버터로 구성하였다. 공진 커패시터 C_r 의 선정 을 통해 구체적인 유도 코일의 설계가 가능해 진다. 그림 3(a)

와 같이 C_r 은 자성체운전의 출력을 만족하는 한도 내에서 비 자성체 운전 역률이 가장 높게 선정한다. 본 논문에서 출력 기준치는 유도 가열시 보편적으로 사용되는 3kW로 임의 선정하였다. 그림 3(b)와 같이 C_r 이 커질수록 공진 주파수가 감소하 기에 3고조파 운전을 하는 비자성체 운전시 스위칭 주파수가 가청주파수 보다 크게 C_r 용량의 상한을 정한다.

본 논문에서는 유도 코일을 $a_1 = 23mm$, 코일과 용기간의 거리를 5mm로 두고 도선의 직경과 턴 수를 다르게 설계하였 다. 그림 4와 같이 선정된 몇 코일에 C_r 의 크기별로 출력 전 력을 구해 적합한 코일과 그에따른 C_r 를 최종 선정 하였다. 출력전력이 3kW를 초과하면서 가장 낮은 값을 가지는 22턴 직경2.8mm의 유도 코일과 340nF의 공진 커패시터를 자성체와 비자성체 유도 가열에 적합한 가열기로 선정하였다

2.3 운전 알고리즘

비자성체 가열은 자성체보다 높은 주파수의 공진전류를 필 요로 한다. 3고조파 운전은 기본파보다 3고조파가 지배적으로 적용되는 영역에서 운전을 하여 기존 ZVS운전 주파수 영역보 다 3배 적은 스위칭 주파수로도 높은 공진 전류 주파수를 얻어 비자성체 가열에 적합한 출력을 낼 수 있다. 이의 적용을 위해 자성체는 기본파 운전을, 비자성체는 3고조파 운전을 할 수 있 는 단일 인버터사용 유도가열기를 위한 알고리즘을 제시한다.

$$R = R_0 + \sqrt{\mu_r/\sigma} \times 2\pi \sqrt{\mu_0\pi f} \int_0^\infty k e^{-2kd} T(k) dk \quad (4)$$

$$R = \frac{V}{I} \cos\theta \quad (5)$$

$$f_r = \left(L_a + L_b \times \frac{\sqrt{\mu_r/\sigma}}{\sqrt{f_s}} \right) \times C_r \quad (6)$$

유도한 임피던스 수식으로부터 위 식을 구할 수 있다. (4)와 인버터 전압과 부하 전류를 센싱하여 얻은 (5)를 비교하여 $\sqrt{\mu_r/\sigma}$ 의 향으로 자성체 여부를 판별할 수 있다. 여러 급속들 의 자성체 여부를 위 향으로 판별 할 수 있음을 그림 5를 통해 알 수 있다. 설계된 공진형 회로의 경우 (4)와 사용된 C_r 값으 로 (6)과 같이 공진 주파수를 구할 수 있다. 이 공진주파수를 판별을 위한 주파수 f_d 와 비교하여 재질을 판별 할 수 있다.판 별 주파수 f_d 는 그림 6와 같이 선정한다.

전원부의 운전은 그림 7과 같은 형태로 이루어져 있다. 용기 를 감지하여 10ms 동안 센싱주파수 f_s 로 운전을 하여 식 (6)으 로 재질을 판별한다. 자성체일 경우 기본파로, 비자성체일 경우 3고조파로 운전을 한다. 계산된 공진 주파수보다 높은 주파수 로 ZVS영역 운전을 한다. f_s 는 자성체와 비자성체 모두 ZVS 영역이며 출력이 낮아 소자에 무리가 없는 값으로 선정한다.

본 논문에서는 자성체 가열을 위한 유도가열기를 3고조파 운전을 이용한 비자성체 가열이 가능하게 개선하였기에 비자성 체 유도가열시 운전 주파수 폭이 좁게 나타난다. 이를 보완하 기 위해서 유도코일과 용기간의 거리 조절을 통해 주파수 폭을 넓힐 수 있다. 기존 방식은 유도코일과 용기간의 거리를 5mm 로 고정시켜 주파수 제어만으로 출력 조절을 하였지만 이 방식 은 최저 출력일 때 거리를 5mm로 설정하고 출력을 높이기 위 해 주파수를 올릴 때 유도 코일과 용기간의 거리도 같이 늘어 운전 주파수 폭을 늘이는 방식이다.

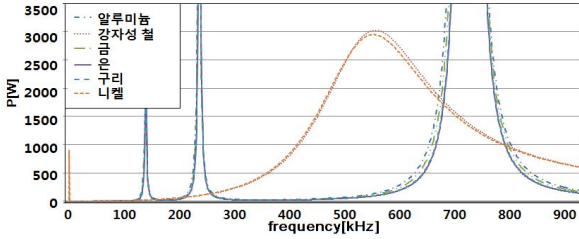


그림 5 여러 금속에 따른 출력 전력
Fig. 5 power of several metals

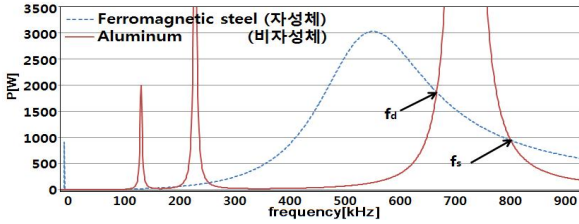


그림 6 판별 및 센싱주파수 결정
Fig. 6 decision of detecting and sensing frequency

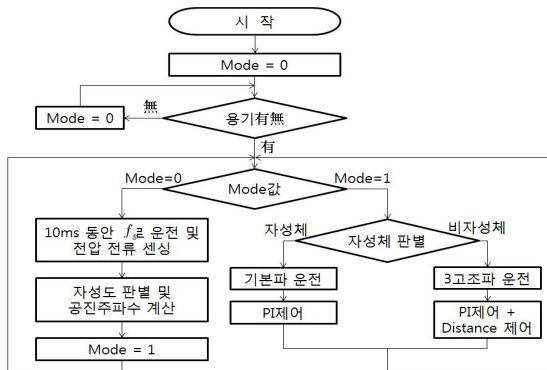


그림 7 유도가열기의 운전 알고리즘
Fig. 7 Driving algorithm of induction cooker

2.4. 시뮬레이션 결과

자성체와 비자성체 가열시 파형은 그림 8과 같다. 재질 판별 시간이 지난 후 각 재질별 출력에 필요한 주파수로 스위칭 주파수가 변하는 것을 볼 수 있다.

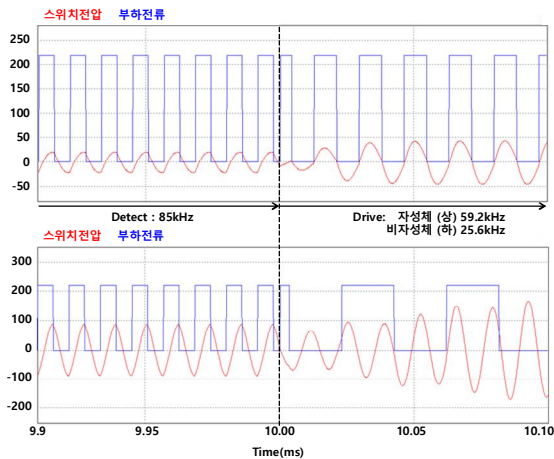
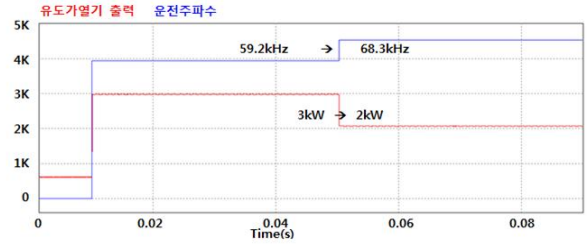
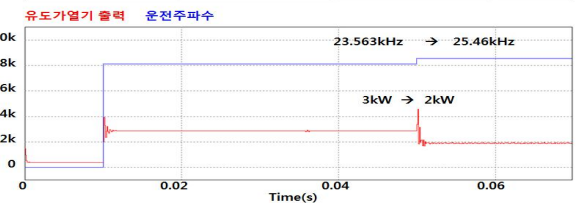


그림 8 재질별 판별과정과 운전시 주파수
Fig. 8 Frequency of detect and drive process



(a) 자성체 운전



(b) 비자성체 운전과 거리제어를 사용했을 시 비자성체 운전
그림 9 출력대별 유도 가열시 주파수
Fig. 9 Induction heating frequency of different power

그림 9 (a)는 3kW와 2kW의 출력시 자성체가열의 운전주파수다. 그림 9 (b)와 대조할 때 기본파 운전보다 3고조파 운전의 스위칭 주파수가 현저히 적다. 또한 그림 9 (b)를 통해 거리 조절을 할 때 주파수 폭이 늘어남을 알 수 있다. 2kW는 용기와 코일간 거리가 5mm, 3kW출력시는 55mm이다. 주파수 폭은 156Hz에서 2010Hz로 늘어났다.

3. 결론

본 논문에서는 유도가열기 부하의 수식 모델을 통하여 공진 네트워크를 주도적으로 설계 하고, 용기 재질 판별 및 재질별 적합 운전을 선택하는 알고리즘을 제안하였다. 전체 모델은 수학적 분석을 통하여 설계 하였으며, 시뮬레이션 결과를 통하여 그 타당성을 입증 하였다. 본 연구의 결과는 용기의 재질에 구애받지 않는 유도가열기 연구에 크게 기여할 것으로 기대한다.

참고 문헌

- [1] 안정훈, 유승희, 김옥진, 이병국 "비자성체 유도가열을 위한 HB공진형 인버터의 고조파 운전방법분석," 전력전자학회 2013년도 전력전자학술대회 논문집 (2013.7), gpp.333 334
- [2] W. G. Hurley and M. C. Duffy, "Calculation of self and mutual impedances in planar magnetic structures," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 4, pp. 2416 2422, Jul. 1995.
- [3] J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdío, Member, *IEEE*, L. A. Barragan, and D. Puyal, "Analytical Equivalent Impedance for a Planar Circular Induction Heating System," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 1, Jan. 2006.