

낮은 저항의 IH 전용용기를 가열할 수 있는 유도 가열 컨버터와 코일 설계

정시훈, 박화평, 정지훈
울산과학기술원 (유니스트)

Design Methodology of Series Resonant Converter and Coil for Heating Low Resistance Container in IH Applications

Sihoon Jeong, Hwapyeong Park, and Jee Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

본 논문은 직렬 공진형 컨버터를 이용하여 낮은 저항을 갖는 주방 용기를 가열하기 위한 유도 가열(Induction Heating; IH)용 공진형 컨버터와 코일 설계방법을 제안한다. 기존 IH 시스템은 저항이 작은 용기를 가열할 때 낮은 전압이득으로 인해 정격보다 큰 전류가 흘러 스위칭 손실 및 전도 손실이 증가하고 소자의 정격 전류량을 초과하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 용기에 따른 임피던스를 분석하고 다양한 저항 조건의 용기를 모두 가열하기 위한 적절한 IH용 코일 설계 방법을 제안한다. 이는 2.4 kW의 최대 전력을 가지는 IH용 공진형 컨버터 시작품을 사용하여 제안하는 설계의 타당성을 검증하고자 한다.

1. 서 론

최근 유도 가열 (Induction Heating; IH) 기술은 높은 가열 효율, 빠른 가열 속도, 안전성 등의 장점으로 산업계와 가정용 어플리케이션에 널리 사용되고 있다. 하지만 IH 기술은 강자성체 용기를 사용해야하고 제작사별 용기의 강자성체 비율에 따라 냄비 저항이 달라져서 작은 저항을 갖는 용기의 경우 1차측에 큰 전류를 야기할 수 있다. 이를 해결하기 위해 전달되는 전력을 제한할 경우 가열이 늦어지는 문제점이 생긴다.

본 논문에서 국내 선진사에서 개발한 IH 시스템을 기반으로 All Clad와 King sense 사에서 제작한 용기를 2.4 kW 최대 전력으로 가열하는 실험을 하였다. 스위치에 걸리는 전류를 최소화하여 손실을 줄일 수 있는 코일 턴수를 이론적으로 분석하고 이를 공진형 컨버터 설계에 반영하여 실험적으로 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 Induction Heating Topology와 실험 조건

그림 1 은 직렬 공진형 컨버터의 구조를 갖는 Induction Heating 회로도를 나타내고 표 1은 기존 선진사의 규격을 나타내었다.

2.2 IH 용기별 전송전력 분석

그림 2는 국내 선진사 제품을 이용하여 King sense용기를 가열할 때 IH용 공진형 컨버터의 전달 가능한 전력의 한계를 보여준다. 해당 전력 변환 장치는 King sense 용기의 낮은 출력 저항으로 인해 1차측에 높은 전류가 유기되고 인버터 정격 한계에 도달하여 2차측으로 전달되는 전력을 제한한다.

그림 1 Induction Heating 회로도

Fig. 1 Induction Heating topology

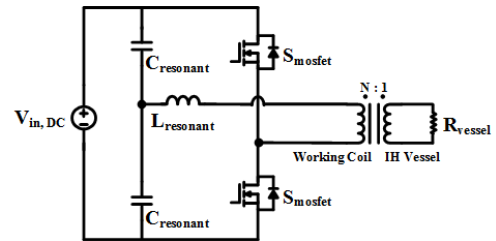


표 1. Induction Heating 실험 조건

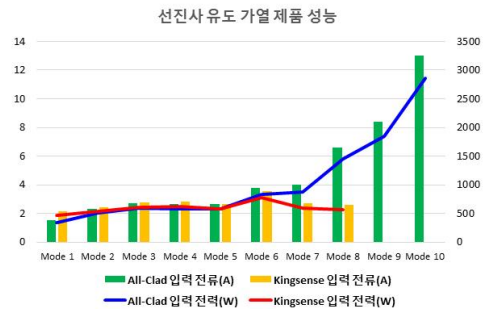
Table 1 Specification of induction heating system

입력 전압(V)		220V	코일 턴수(Turns)	16
공진 인덕턴스 (uH)	All Clad	17.46	공진 커패시턴스 (nF)	780
	King sense	8.125		
코일+All Clad 합성 저항(Ω)	2.600	공진 주파수(kHz)	43	
	2.931		동작 주파수(kHz)	45 55
코일+King sense 합성 저항(Ω)	1.047	공진 주파수(kHz)	63.2	
	1.079		동작 주파수(kHz)	65 80

본 논문은 코일 턴수에 따른 전송전력 및 임피던스를 분석하여 All Clad 용기와 King sense 용기를 모두 정격전력으로 가열 가능한 코일 턴수를 제안한다. 코일 턴수의 선정방법은 다음과 같다.

그림 2 King-sense 용기 가열 시 불안정한 동작

Fig. 2 Unstable operation of King-sense vessel heating



첫 번째, 코일과 용기의 합성저항을 추정하여 식 (1)로 용기의 저항을 계산한다. 여기서 n은 IH용 코일의 턴수, R_{eq} 는 코일과 가열용기의 합성저항이고 R_{vessel} 은 용기의 저항이다.

$$R_{eq} = n^2 \times R_{load} \quad (1)$$

두 번째, 정격전력과 1차측 스위치 정격전류를 만족하는 저항값의 범위를 산정한다. IH에서 부하로 전달하는 최대 전력 전달 공식은 식 (2)로 나타낸다. $P_{transfer}$ 은 전송전력, V_{coil} 은 코일 1차측에 걸리는 전압이다.

$$P_{transfer} = \frac{V_{coil}^2}{R_{coil}} = \frac{(V_{\in put} \times G_v)^2}{n^2 \times R_{load}} \quad (2)$$

위 식에서 입력전압과 용기의 저항은 주어졌고 설계하고자 하는 정격전력과 최대 전압이득 값을 대입하여 최대 합성저항 값을 계산한다. 또한, 설계할 시스템의 1차측 스위치 정격전류를 만족하는 저항 값을 계산한다. 따라서 그림 3과 같이 설계요건을 만족하는 저항범위가 산정되고 이 범위 안에 가열할 용기의 저항이 속해있을 때 설계목적이 달성된다.

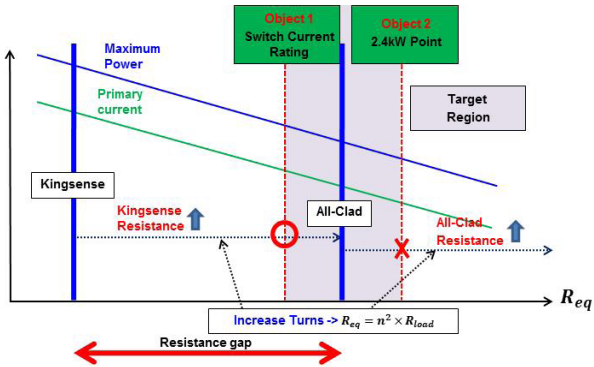


그림 3 정격전력 및 스위치 정격전류를 만족하는 저항범위

Fig. 3 Resistance range that meets rated power and switch rated current

세 번째, 설계 목적을 달성하는 그림 3의 Target Region에 용기의 저항 값을 위치시키기 위해 두 용기 간 저항격차를 줄인다. 그림 3과 같이 용기별 저항격차가 큰 경우 Target Region에 두 용기를 모두 위치시킬 수 없기 때문에 식 (3)을 이용하여 용기별 동작주파수를 변경함으로써 저항 값을 조절할 수 있다. 동작주파수를 변경하면서 전압이득을 유지하기 위해서는 해당용기를 가열할 때 릴레이를 이용하여 공진 커패시턴스 값을 변경해야한다.

$$Z_{coil+vessel} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3)$$

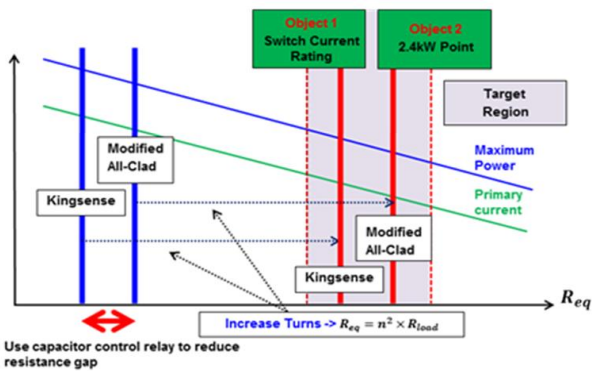


그림 4 동작주파수 및 턴수 조절에 의한 용기저항 변화

Fig. 4 Variation of container resistance by operating frequency and the number of turns

식 (3)을 이용하여 Target Region에 위치시킬 수 있는 저항

값의 동작주파수가 결정하고 식 (4)를 이용하여 설계할 전압이득값을 만족하는 공진 커패시턴스 값을 계산한다.

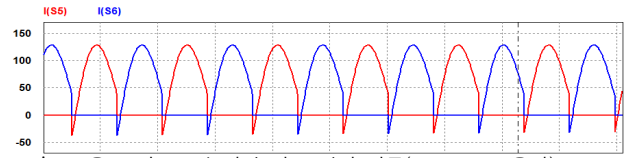
$$G_v = \frac{V_{output}}{V_{\in put}} = \frac{n}{21 + j \frac{\pi^2}{8} \times Q \times (\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s})} \quad (4)$$

$$\text{where } \omega_s = 2\pi f_s, \omega_r = 2\pi f_r, Q = \frac{n^2 \omega_r L_r}{R_L}$$

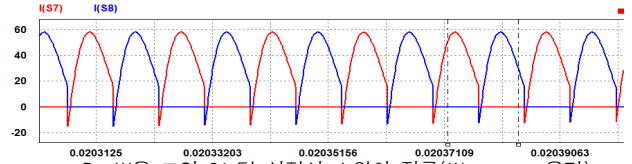
마지막으로, 그림 3의 Target Region에 두 용기의 저항 값이 모두 부합하는 코일 턴 수를 식 (1)을 이용하여 계산한다.

2.3 실험 결과

제안한 코일 턴 수 설계방법으로 24턴을 선정하였다. 표 2를 통해 기존의 16 턴의 코일 턴 수에서 King sense용기 가열시 스위치 정격을 초과하여 선진사 제품이 정격전력으로 가열이 불가능함을 알 수 있다. 하지만 제안한 설계방법으로 All Clad 용기 가열시 동작주파수 All Clad용기 가열시 정격전력을 만족면서 King sense용기 가열 시에도 정격전력 및 1차측 스위치 정격전류 40 A를 만족시켰다.



A. IH용 코일 16 턴 선정 시 스위치 전류(King-sense용기)



B. IH용 코일 24 턴 선정시 스위치 전류(King-sense용기)

그림 5. IH용 코일 턴 수에 따른 스위치 전류 비교

표 2. 코일 턴 수에 의한 전송전력 및 1차측 전류 비교

	All Clad		Kingsense	
코일턴수(tuns)	16	24	16	24
동작 주파수(kHz)	45	25	65	65
공진 주파수(kHz)	43	25	63	63
공진 커패시턴스(nF)	780	1809	780	
스위치 RMS 전류(A)	26.64	18.30	65.53	29.79
정송 전력(kW)	3.697	2.586	8.987	4.172

3. 결론

본 논문에서는 저항이 다른 IH 용기를 모두 정격전력으로 가열하고 저항이 낮은 용기 가열시 1차측에 높은 스위치 전류를 개선하는 컨버터의 공진 회로와 코일 턴 수 설계방법을 분석하고 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 논문을 바탕으로 전력손실 분석 등을 진행하면 실제 IH 응용분야에서 적절한 IH용 컨버터의 공진 회로와 코일 턴 수를 설계 및 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2017년도 LG전자의 지원을 받아 수행된 선형연구사업임(No. 2.170051.01).

참고 문헌

- [1] Umar Shami., University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan. "Design and Development of a efficient coil for a resonant high frequency inverter for induction heating"