

가변 출력 직렬공진 고주파 유도가열 시스템의 설계

이 종 호¹ 박 찬 원²
 서울강서기능대학 전기과¹ 강원대학교 전기전자정보통신 공학부²

The Design of Series Resonant High Frequency Induction Heating System for Variable Power

Jong-ho, Lee¹ Chan-won, Park²
 Seoul Kangseo Polytechnic College¹ Kangwon National University²

Abstract - 본 연구에서 제안한 가변 출력 직렬공진 고주파 유도가열시스템은 기존 공진회로 트랜스 1차에 여러 개의 탭 제작과 공진회로의 콘덴서를 직, 병렬로 연결하는 등의 간단한 설계방법으로 주파수와 출력을 가변 시켜 실험함으로써 유도가열 시스템 1대로 다양한 피가열부품 등에 적용시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

1. 서 론

산업의 고도화와 반도체 기술의 발달로 금속의 열처리를 위한 고주파 유도가열이 차지하는 비중과 중요성은 매우 높으며, 최근 관련 업계에서도 기술 개발에 의한 시장의 우위를 선점 하기 위해 부단한 노력을 기울이고 있다.

고주파 유도가열의 원리는 고주파 전류가 흐르는 코일에 위치한 피 가열체(도체)가 전자 유도작용으로 발생하는 와전류(Eddy Current)와 일부의 Hystereris의 열 손실에 의해서 급속히 가열되는 현상이다. 고주파 가열에 사용되는 주파수는 범위가 매우 넓기 때문에 표피효과(skin effect)로 인하여 주파수가 높아질수록 피 가열체의 내부보다 표면 가까운 부분만을 가열 할 수 있고, 반대로 낮으면 피 가열체 내부를 가열할 수 있는 것으로 알려졌다.[1]

고주파 출력을 부하에 고효율로 공급하기 위하여 부하와 공진 회로로 구성된 공진 부하회로를 취하는 것이 통례이다. 직렬 공진 부하회로는 낮은 임피던스에 적합하고 병렬 공진 부하회로는 높은 임피던스 인버터에 적합하다. 특히 직렬 공진 부하회로를 결합한 인버터는 snubber 회로를 생략할 수 있는 등의 고효율화를 기할 수 있는 장점으로 많이 채택되고 있다.[2] 고주파 유도 가열시스템은 현재 자동차, 공장 기계 등의 다양한 소재 및 부품을 제작하기 위하여 제작 판매되고 있지만 특정 피 가열체에 한정된 열처리 시스템에 불과하다. 이러한 단점을 보완하고자 가변 출력 직렬공진 고주파 유도가열 시스템을 제안 하고자 한다.

본 연구에서 제안한 가변 출력 직렬공진 고주파 유도가열시스템은 기존 공진회로 트랜스 1차에 여러 개의 탭 제작과 공진회로의 콘덴서를 직, 병렬로 연결하는 등의 간단한 설계방법으로 주파수와 출력을 가변 시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 이를 시스템에 적용하여 최저출력에서 부터 최대출력 200KW, 주파수 15KHz까지 실험한 결과 출력과 주파수가 안정되게 유지되었고, 본 시스템 1대로 다양한 피 가열부품 등에 적용시킬 수 있음을 확인하였다.

2.1 시스템의 구성

직렬공진 고주파 유도가열 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 정류부는 일반적인 다이오드 정류기를 사용하여 3상 교류를 직류로 변환하였다. 직류 출력전압은 단상 full-bridge 인버터를 통해 고주파 교류로 변환되어 직렬공진회로의 트랜스 1차에 인가되며 트랜스 2차에서는 인덕터(Working Coil)와 콘덴서의 용량에 의해 직렬공진 된 고주파 전류를 부하에 인가하면 와전류 등에 의한 주열 열이 발생 피 가열체가 가열된다. 제어회로는 위상제어회로를 이용 공진 부하회로의 전압과 전류 위상 차를 검출, 설정된 위상 차가 되도록 비교수정 함으로서 전압과 전류의 위상 차가 일정하게 유지되어 시스템이 안정된 동작을 하도록 제어한다.

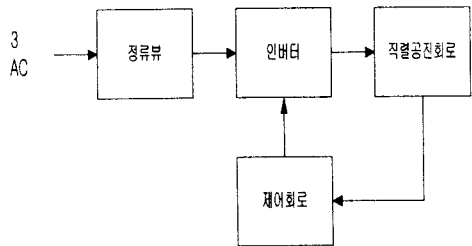
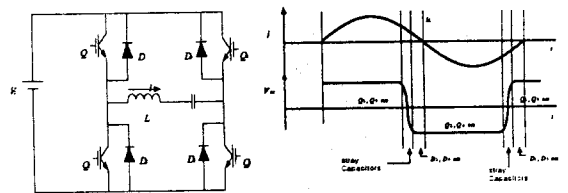


그림 1. 고주파 유도가열 시스템의 구성도

2.1.1 인버터의 동작 모드

직렬공진 고주파 유도가열 시스템의 인버터는 그림 2(a)와 같이 단상 full-bridge 인버터를 채택하였으며 $Q_1 \sim Q_4$, $D_1 \sim D_4$ 는 IGBT 스위칭소자와 역 병렬로 구성된 환류 다이오드이다.



(a) 단상 full-bridge 인버터와 직렬 공진회로

(b) 인버터의 전압, 전류 파형

그림 2. 직렬공진 고주파 유도가열 시스템 인버터 전압, 전류 파형

그림 2(b)는 6단계의 인버터동작 모드에서 발생된 전압이 직렬공진 회로로 구성된 인덕턴스 L과 C에 인가되었을 때 전압 및 전류의 파형으로 각 스위칭 소자들의 데드타임과 IGBT의 stray capacitor 충전 전압 등이 환류 다이오드를 통하여 방전하는 상태 등을 각 동작모드의 전압과 전류 상태로 나타낸 것이다.

2.2 제안된 가변 출력 시스템

제안된 시스템은 그림 3과 같이 기존 직렬공진 고주파 유도가열 시스템 출력 부분에 적용시켰다. C₂는 인덕터와 함께 직렬 공진 회로를 구성시키기 위한 콘덴서이다. 콘덴서 C₂와 인덕터에 의한 직렬 공진 주파수는 식 (1)로 표현할 수 있고 C₂ 대신 동일 용량 콘덴서 C 4개를 병렬 연결하면 식(2)와 같이 주파수가 가변 된다. 이 콘덴서들을 표 1과 같이 직·병렬로 조합하면 주파수가 가변 되므로 가열 부하에 따라 주파수를 가변 시킬 수 있다.

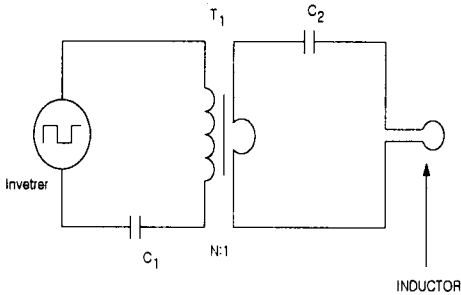


그림 3. 고주파 유도가열 직렬 공진회로

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C_2}} \text{-----(1)}$$

$$f' = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot 4C}} = \frac{1}{4\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{--(2)}$$

표 1. 공진 콘덴서 연결에 의한 주파수 변화

동일용량 콘덴서의 연결	공진 주파수
4개 병렬	f'
2개 병렬	$\sqrt{2} f'$
(2개병렬) 2군을 직렬	2f'
2개 직렬	$2\sqrt{2} f'$
4개 직렬	4f'

그림 3에서 출력을 가변 시키기 위하여 트랜스 T₁의 권수 비 N:1을 8:1 ~ 19:1까지 12단계의 탭을 제작 인버터의 고주파 교류를 인가하면 T₁ 2차 공진 콘덴서에 충전되는 전압 V_c에 의한 출력(Reactive power)이 식 (3)과 같이 결정된다.

$$P_{react} = C_2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot V_c^2 \text{-----(3)}$$

공진 콘덴서 C₂의 전압은 탭 변환에 의해 8V_c 부터

19V_c 까지 변화되므로 출력 P_{react}를 부하의 종류에 따라 증가 및 감소시킬 수 있다. 여기서 고찰해야 할 사항은 주파수를 감소시키려면 식(1), (2)에 의해 콘덴서 C₂의 용량은 증가시켜야 되기 때문에 콘덴서를 병렬 접속하여 용량을 증가시켜야 하고, 주파수를 증가시키려면 콘덴서를 직렬 접속하여 콘덴서 용량은 감소 시켜야 된다. 그러나 콘덴서의 용량 변화가 주파수뿐만 아니라 식 (3)에서와 같이 고주파 유도가열 시스템의 출력에도 변화를 주는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 공진 콘덴서 용량과 트랜스 탭의 변화에 대한 용량의 변화를 식 (1), (2), (3)에 의해 계산 된 것을 표 2에 제시함으로써 콘덴서와 트랜스 탭의 변화가 출력을 1배에서 11.28배까지 가변시킬 수 있음을 확인하였다.

표 2. 트랜스 탭과 공진 콘덴서 접속에 의한 출력변화

트랜스 탭 (1차: 2차)	C ₂ 콘덴서의 연결	
	4개의 콘덴서 병렬	(2개병렬) 2군을 직렬
8 : 1	P _{R8} = P _R	2 P _R
9 : 1	1.26 P _R	2.5 P _R
10 : 1	1.56 P _R	3.12 P _R
11 : 1	1.89 P _R	3.78 P _R
12 : 1	2.25 P _R	4.5 P _R
13 : 1	2.64 P _R	5.28 P _R
14 : 1	3.06 P _R	6.125 P _R
15 : 1	3.51 P _R	7.03 P _R
16 : 1	4 P _R	8 P _R
17 : 1	4.5 P _R	9.03 P _R
18 : 1	5.06 P _R	10.12 P _R
19 : 1	5.64 P _R	11.28 P _R

3. 실험 및 고찰

본 논문의 실험을 위하여 제작 된 가변 출력 직렬공진 유도 가열시스템의 인버터 사양은 직류 전원전압 520V, 주파수 15KHz, 최대출력 200KW의 유도가열 부하를 목표로 트랜스 탭과 공진용 콘덴서를 가변하여 실험하였다.

인버터의 주 회로는 IGBT를 사용 단상 full-bridge로 구성하였고, 가열 공진회로에 그림 3의 트랜스 권수비를 8:1~19:1까지 탭을 제작하여 결합하였다. 트랜스 1차의 콘덴서 C₁은 트랜스 1차에 직류전압 성분이 인가되는 것을 저지하기 위하여 사용하였고 실험은 저 출력보다는 고 출력 위주로 실시하였다.

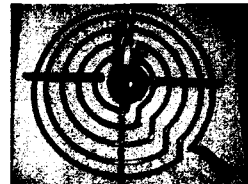


그림 4. 인덕터의 사진

그림 4는 공진회로의 인덕터(Working coil)이다. 구리 관으로 제작된 대칭형 구조로 냉각수가 흐르도록 하였다. 이것은 가열 부하에 수백[A] 이상의 전류가 흐르면 전력손실에 의해 발생하는 코일의 열을 제거시키기 위한

배려이다. 그림 5는 인버터회로의 IGBT 게이트에 인가되는 전압파형으로 Dead time을 고려한 신호를 150KHz 까지 발생시켜 측정한 파형이다.

그림 6은 고주파 유도가열 장치의 무 부하상태에서의 전압과 전류 파형이다. 무 부하시 인버터의 전류는 단자 트랜스 T_1 과 콘덴서 C_1 에서 소량으로 소모되는 전류로서 삼각파 형태로 나타나 있다.

그림 7은 가열 부하를 인가하였을 경우 공진 콘덴서 C_2 의 공진 파형이고, 그림 8과 그림 9는 400[A], 800[A] 부하시의 인버터의 전압, 전류 파형으로 전류의 파형이 부하가 증가됨에 따라 정현적으로 변화되었고 전압과 전류의 위상 차가 설정 값에 추종하므로 역률 조정과 시스템이 장시간 정상적인 동작이 수행됨을 확인 할 수 있었다.

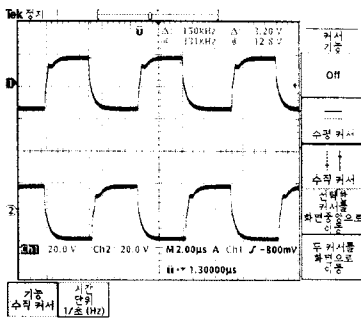


그림 5. 인버터 게이트의 전압파형

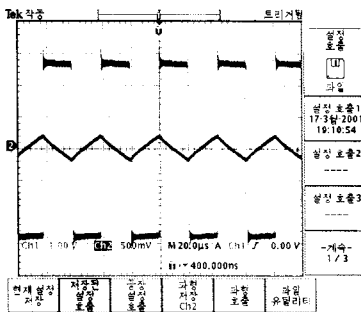


그림 6. 무부하시 인버터의 전압, 전류 파형

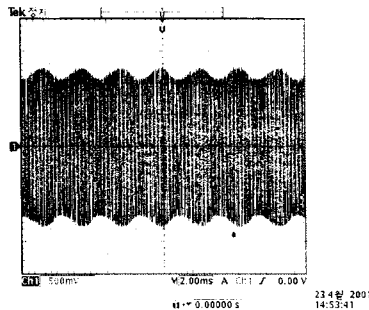


그림 7. 공진 콘덴서 C_2 의 공진 파형

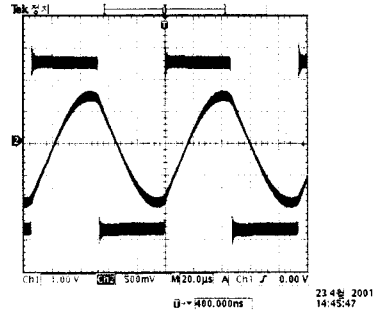


그림 8. 400A 부하시 전압, 전류파형

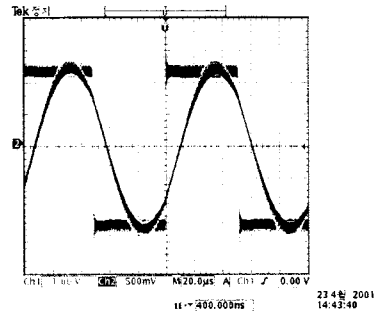


그림 9. 800[A]부하 전압, 전류파형

3. 결 론

본 연구에서 제안한 가변 출력 직렬공진 고주파 유도 가열시스템은 기존 직렬공진 유도가열 시스템 공진회로 트랜스 1차에 여러 개의 탭 제작과 공진회로의 콘덴서를 직, 병렬로 연결하는 등의 간단한 설계방법으로 주파수와 출력을 가변시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 이를 시스템에 적용하여 최저출력에서부터 최대출력 200KW, 주파수 15KHz로 실험한 결과 출력과 주파수가 안정되게 유지되었고, 본 시스템 1대로 다양한 피 가열부품 등에 적용시킬 수 있음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] P.S. Sympton, Induction Heating Hand Book, McGRAW-Hill INC, New York, pp.92~112, 1972
- [2] S.W.H.DE HANN, at al., "Novel Operation and control modes for Series-Resonant Converters". IEEE Trans, IE-32, No.2, 1985
- [3] Ricahard Farrington, Milan M. Jovanovic, F. C. Lee, "Analysis of Reactive Power in Resonant Converter", PESC 92' Vol.1, pp197-205,1992
- [4] Laggate. D., Kerman. R. J., "Pulse Based Dead Time Compensater for PWM Voltage Inverters", IEEE IECON Conf. Rec., Vol. 1, pp. 474-481, 1995