

새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터

The New Active Voltage Clamp ZVS-PWM Resonant High-frequency Inverter

안 용 위* · 김 홍 신** · 문 상 필*** · 우 경 일§ · 박 한 석†

(Yong-Wie Ahn · Hong-Shin Kim · Sang-Pil Mun · Kyung-Il Woo · Han-Seok Park)

Abstract - In this paper, a ZVS-PWM high-frequency inverter with a PWM control function is applied to commercial system 220[Vrms], and a resonator type ZVS-PWM high-frequency inverter circuit with a fixed-two methods were proposed. The parameters of the transformer model equivalent circuit of a copier fixing device, which is an essential element in the parameter optimization of the proposed circuit, are obtained by using a high-frequency amplifier and its frequency characteristics are described. The proposed method compared to the existing single-ended ZVS-PFM high frequency inverter can suppress the voltage and current peak value of the power semiconductor switching device and reduce the switching loss. The efficiency of the proposed method itself is 98[%] at rated power output. Also, the efficiency of 96[%] can be obtained even at low output, so that the proposed high frequency inverter is very efficient inverter. The total efficiency from the commercial AC input to the inverter output is 93[%] at rated, which is considered efficient for use in copying machines. In addition, the diode bridge loss accounts for the largest portion of the overall system efficiency distribution. On the other hand, the nonparallel filter has a very low loss.

Key Words : ZVS-PWM high-frequency inverter, Fixed-two methods, High efficiency, Partial resonance, PWM control characteristics

1. 서 론

최근에는 소프트 스위칭 고주파 전력 전자 기술 중 현재 가전·민생 기기 응용을 비롯한 업무 민생 응용으로 고주파 전력 반도체 장치용 고주파 소프트 스위칭 전력 변환 기술이 도입되고 있다. 그 중에서도 전자 밥솥, 전자 플라이어, 국수 제조 장치, 전자 온수기, 전기 구이기 등의 유도 가열용 인버터와 마그네트론 구동용 인버터 제어 방식 컨버터에 의한 전자레인지 및 조명용 전자 안정기의 점등 장치, 전동 칫솔이나 전기면도기, 비접촉 전력 공급 시스템, 가정용 고주파 절연 링크 태양광 발전 시스템, RF 인버터에 의한 무전극 램프 시스템, 오존 발생용 인버터, 고주파 인버터 링크 UPS 등의 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다[1-4].

일반적으로 전자 유도 요리 등에 적용되어지는 1석형 ZVS-PWM 고주파 인버터 시스템은 저비용이면서 주파수 제어로 전력을 제어 할 수 있으나 파워 반도체 장치의 내압이 높아져 실용에 건널 수 없을 뿐만 아니라 멀티 버너 방식으로는 제어 방식이 주파수 제어이기 때문에 주파수 차이

에 의한 잡음이 발생하며, 영전압 스위칭 영역이 좁아지는 등의 문제점이 발생한다[5-9].

본 논문에서는 상용 계통 220[Vrms]에 적용한 영전압 소프트 스위칭 전압 공진형 고주파 인버터로 PWM 제어 기능을 가지는 부분 공진형 고주파 인버터를 채택한 복사기 정착형 유도 가열 소프트 스위칭 부분 공진형 ZVS-PWM 고주파 인버터인 새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터 회로 방식을 제안하여 그 회로의 동작 원리와 특징에 대해 서술하였다. 그리고 본 논문에서는 이러한 새로운 회로 토폴로지에 대한 제어 변수 회로 파라미터 부하 매개 변수를 도입하여 유도 가열 시스템을 자속 모델로 나타낼 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션 분석을 실시하여 회로 설계 전 단계에서 필요한 PWM 제어 특성, 전압과 전류의 피크 특성, ZVS 조건과 회로 매개 변수 및 제어 변수의 관계 등을 서술하였다. 이러한 모든 사항은 실험의 결과를 통해 입증하고 그 타당성과 실용성을 증명하고자 한다.

2. 제안한 회로 구성과 동작원리

그림 1은 기존에 가전 민생 분야에서 많이 이용되고 있는 방식인 기존의 1석형 ZVS-PFM 인버터의 회로를 나타낸 것이다. 이 방식은 회로 부품 수를 줄여 저비용과 공간 절약하기 위하여 유도 가열은 물론 상용 200[V]계의 소용량 인버터로 적합하다. 그러나, 이 방식은 인버터의 동작 주파수를 가변하게 함으로써 전력 조절을 하는 방식으로 유도 가열과 같이 부하단에 흐르는 전류의 주파수에 따라 전류 관통거리가 변화되어 부하에 있어서 맞지 않는 경우가 많으며, 반도체 스위칭 장치에 인가되는 전압의 피크 스트레스가 매우 높아지는 단점

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

E-mail : phanseok@pknu.ac.kr

* Hanryo Electric Safety Management CO.,Ltd, Korea

** Korea Water Resources Corporation, Korea

*** Dept. of Electrical Engineering, Masan University, Korea

§ Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

접수일자 : 2017년 10월 18일

최종완료 : 2017년 11월 22일

이 있다.

일반적으로 부하는 다양하지만 본 논문에서는 기본적으로 유도 가열 부하를 선정하여 변압기 모델(결합계수 $k(=M/\sqrt{L_1 L_2})$, 부하 매개 변수 $\tau(=L_2/R_2)$)로 표시하였다. 즉, 워크 코일 L_1 과 피가열물체($L_2 + R_2$)인 정착 물리는 전기 회로인 변압기 모델로 나타내었다.

기존의 1석형 ZVS-PWM 고주파 인버터 시스템은 단상 60[Hz], 200[V]에 연결된 다이오드 브리지 정류 회로와 비평활 필터인 고역통과 커패시터 C_2, C_3 와 고역통과 인덕터 L_2 , 노이즈 필터 등을 갖춘 전원부와 전자속 발생용 가열 코일 L_1 과 피가열물체 공진 커패시터 C_1 , 스위칭 전원 장치 Q_1 으로 갖춰진 고주파 인버터부로 구성되어져있다.

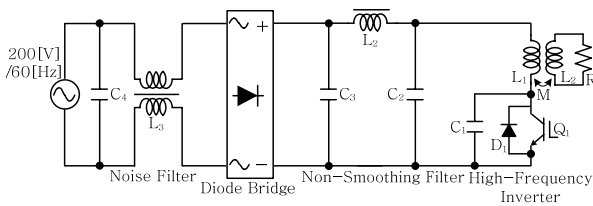


그림 1 기존의 1석형 ZVS-PWM 고주파 인버터 시스템
Fig. 1 Conventional one-staged ZVS-PWM high frequency inverter system

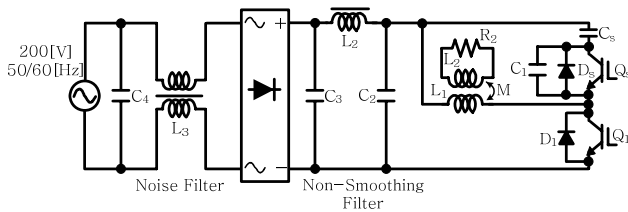


그림 2 제안한 새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터
Fig. 2 The proposed new active voltage clamp ZVS-PWM resonant high-frequency inverter

그림 2는 본 논문에서 제안한 일정한 주파수에서 가변 전력 제어 기능을 가진 새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터를 나타낸 것이다. 제안한 고주파 인버터는 영전압 소프트 스위칭 동작이 가능하면서 저비용, 소형화, 전력 반도체 스위칭 소자에 걸리는 전압 피크 스트레스를 경감할 수 있다. 그림 2에서 제안한 고주파 인버터는 직류 전압원 E_d , 유도 가열 부하계($L_1+L_2+M+R_2$), 주 스위치 Q_1 , 보조 스위치 Q_s , 제1공진 커패시터 C_1 , 제2공진 커패시터 C_s 로 구성되어져 있다.

그림 3는 제안한 새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터의 각 모드별 동작 등가회로를 나타낸 것이며, 이때의 각 부의 동작 파형을 그림 4와 같다.

이상의 동작은 주기적으로 반복되며, 제안한 회로 방식의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- ① 제2공진 커패시터 C_s 를 이용함으로써 주 스위치 S_1 에 걸리는 전압 피크 스트레스를 기존의 1석형 ZVS-PFM 방식보다 줄였다.

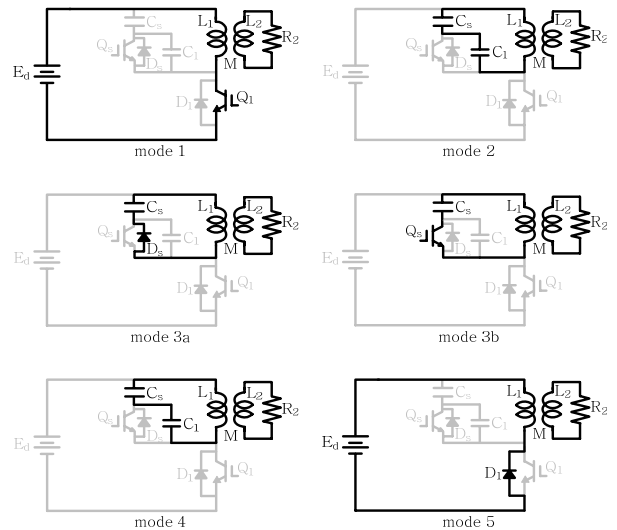


그림 3 각 모드별 동작 등가회로
Fig. 3 Operation equivalent circuit for each mode

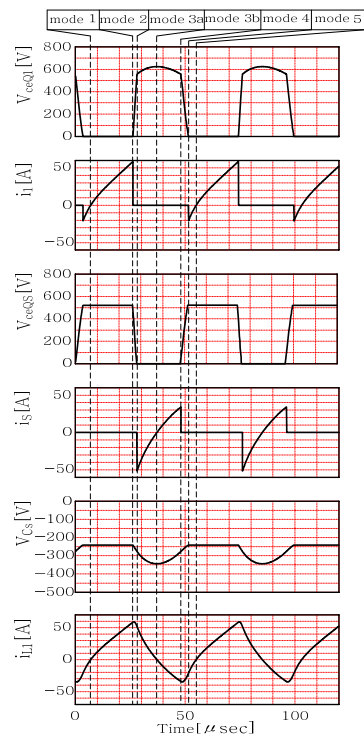


그림 4 각 부의 동작 파형
Fig. 4 The operation waveform of each part

- ② 비대칭 PWM 제어함으로써 일정한 주파수에서 전력을 가변하였다.
- ③ ZVS 동작에 의해서 스위칭 손실과 EMI 노이즈를 저감하였다.
- ④ 주 스위치에서의 dv/dt는 공진 커패시터 C_s 와 C_1 의 매개 변수에 따라 결정되며, 보조 스위치에서의 dv/dt는 공진 커패시터 C_1 의 매개 변수에 결정되는 것을 확인하였다.
- ⑤ 기존의 1석형 ZVS-PFM 방식보다 회로 부품 수를 줄여 저비용과 소형화가 가능하였다.

3. 실험 결과 및 검토

그림 5은 본 논문에서 제안한 액티브 전압 클램프 방식을 이용한 ZVS-PWM 고주파 인버터의 실험 시스템을 나타낸 것이다. 제안한 고주파 인버터의 실험 시스템은 단상 200[V] 계의 다이오드 정류 컨버터, 고주파 전류 성분 제거용 필터 회로($L_2 + C_3$), 액티브 전압 클램프 방식의 인버터, 유도 가열 워크 코일 & 피가열물체(정착 물리)를 갖춰진 부하 회로로 이루어져있다. 그리고 스위치(Q_1, Q_s), 역도통 다이오드(D_1, D_s), 가열 코일 L_1 , 고주파 인버터의 고주파 스위칭 동작에 따라 발생하는 고주파 전류 억제용 인덕터(L_2), 고주파 전류 성분을 환류시키는 환류용 커패시터(C_2, C_3), 제1공진 커패시터(C_1), 전압 클램프를 실현하는 제2공진 커패시터(C_s)로 구성된다. 표 1은 제안한 고주파 인버터의 실험 시스템에 사용된 각 매개 변수를 나타낸 것이다.

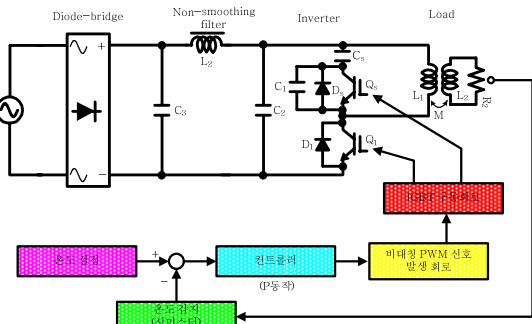


그림 5 제안한 ZVS-PWM 고주파 인버터의 실험 시스템

Fig. 5 Experimental system of the proposed ZVS-PWM high frequency inverter

표 1 실험에 사용된 회로정수

Table 1 Circuit parameter using in experiment

매개변수	값
Power supply voltage V_s	200[V]
Operating frequency f_0	21[kHz]
Work coil L_1	40[μ H] ~ 100[μ H]
The first resonant capacitor C_1	0.1[μ F] ~ 0.4[μ F]
The second resonant capacitor C_s	1.0[μ F] ~ 5.0[μ F]
Load parameter τ	6.0[μ sec]
Coupling coefficient k	0.65
High frequency current suppressing inductor L_2	250[μ H]
The first reflux capacitor C_2	2.0[μ F]
The second reflux capacitor C_3	4.4[μ F]
Peak value of the voltage across the switch V_{max}	700[V]
Peak value of the current flowing through the switch I_{max}	70[A]
Rated power input P_{IN-max}	1,200[W]
Range of power variable	200[W] ~ 1,200[W]

그림 6는 스위치 Q_1 의 시비율(Duty- Q_1)을 0.18로 했을 경우에 각 부의 실험 파형을 나타낸 것이며, 그림 7는 스위치 Q_1 의 시비율(Duty- Q_1)을 0.5로 했을 경우에 각 부의 실험 파형을 나타낸 것이다.

사진 1는 실험에 사용된 고주파 인버터의 외관을 나타낸 것이다. 그리고 사진 2은 실험에 사용된 워크 코일 L_1 의 외관과 구성요소를 나타낸 것이다. 그림 6는 스위치 Q_1 의 시비율(Duty- Q_1)을 0.18로 했을 경우에 각 부의 실험 파형을 나타낸 것이며, 그림 7는 스위치 Q_1 의 시비율(Duty- Q_1)을 0.5로 했을 경우에 각 부의 실험 파형을 나타낸 것이다.

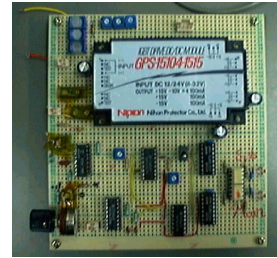


사진 1 비대칭 PWM 신호 발생 회로의 외관

Photo 1 Appearance of asymmetric PWM signal generating circuit

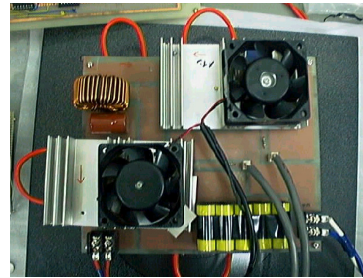


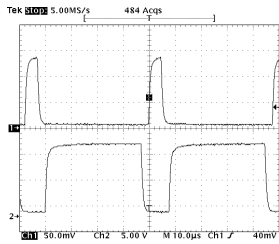
사진 2 실험에 사용된 고주파 인버터의 외관

Photo 2 Appearance of high frequency inverter used in experiment

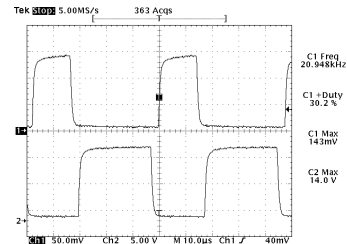
그림 7에서 실험 파형에서 알 수 있듯이 스위치 Q_1 의 시비율을 변화했을 경우에 주 스위치 Q_1 에 잔존 전압이 남아 스위치가 턴-온되며, 스위치의 기생 커패시터의 전하를 단락시켜 턴-온 순간에 단락 전류가 흐르게 된다. 그리고 ZVS 실험이 가능하기 위해서는 공진 커패시터의 값이 작거나 공진 초기 전류의 값이 크며, 다이오드 브릿지를 통해 비평형 필터를 사용하고 있기 때문에 역률이 거의 1이 된다. 또한, 주 스위치에 비해 보조 스위치 쪽이 항상 약 100[V] 피크 스트레스가 낮기 때문에, 내압이 작으며, 공진 초기의 전류값은 전력을 작게 할수록 감소한다.

그림 8는 가로축을 시비율(Duty Factor)로, 세로축을 입력 전력으로 한 PWM 제어 특성을 나타낸 것이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 시비율을 변화시키면 입력 전력을 크게 가변하며, 시비율(Duty Factor)을 0.4로 일정하게하면 PFM가 된다. 그때의 ZVS 영역이 그림 8과 같으며, 시뮬레이션 결과와 거의 일치하고 있다.

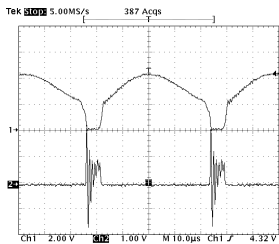
그림 9은 온도 제어를 실시한 결과를 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이, 실온에서 180[$^{\circ}$ C]가 될 때까지의 시간인 24[sec] 이후의 오버 슈트도 없다. 그리고 시작 후 1분 경과 후에, 복사기 본체의 복사 버튼을 눌러 실제로 정착 물리에 종이를 통하게 한 결과, 급격히 온도가 내려간다. 이에 따라, 입력 전력이 증가하고 온도를 유지하고 있는 것을 알 수 있다.



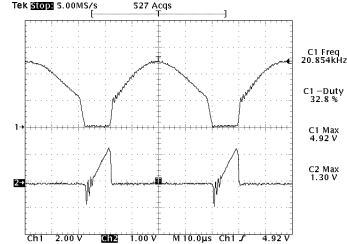
(상 : 주 스위치 Q_1 (5[V/div]), 하 : 보조 스위치 Q_s (5[V/div])
 (a) Gate Signal Experiment Waveform of Switch



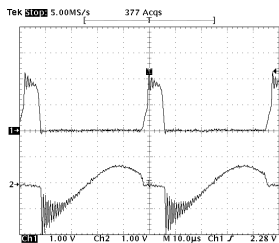
(상 : 주 스위치 Q_1 (5[V/div]), 하 : 보조 스위치 Q_s (5[V/div])
 (a) Gate Signal Experiment Waveform of Switch



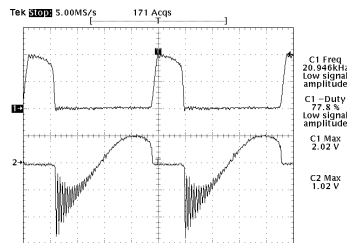
(상 : 주 스위치의 전압 V_{Q_1} (200[V/div]), 하 : 주 스위치의 전류 I_{Q_1} (20[A/div])
 (b) Voltage and current test waveform of main switch



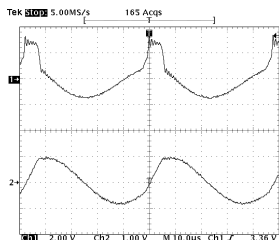
(상 : 주 스위치의 전압 V_{Q_1} (200[V/div]), 하 : 주 스위치의 전류 I_{Q_1} (20[A/div])
 (b) Voltage and current test waveform of main switch



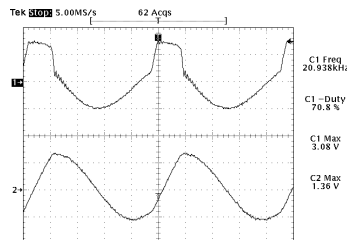
(상 : 보조 스위치의 전압 V_{Q_s} (100[V/div]), 하 : 보조 스위치의 전류 I_{Q_s} (20[A/div])
 (c) Voltage and current test waveform of auxiliary switch



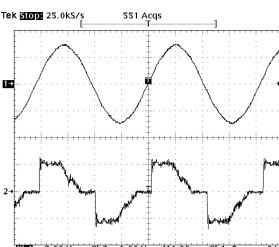
(상 : 보조 스위치의 전압 V_{Q_s} (100[V/div]), 하 : 보조 스위치의 전류 I_{Q_s} (20[A/div])
 (c) Voltage and current test waveform of auxiliary switch



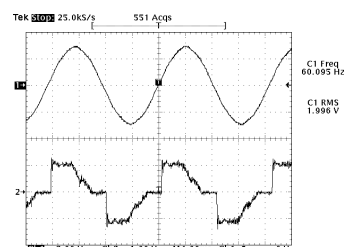
(상 : 워크 코일의 전압 V_{L_1} (200[V/div]), 하 : 워크 코일의 전류 I_{L_1} (20[A/div])
 (d) Voltage and current test waveform of work coil



(상 : 워크 코일의 전압 V_{L_1} (200[V/div]), 하 : 워크 코일의 전류 I_{L_1} (20[A/div])
 (d) Voltage and current test waveform of work coil



(상 : 입력전압 V_{in} (200[V/div]), 하 : 입력전류 I_{in} (1[A/div])
 (e) Experimental waveform of input voltage and current



(상 : 입력전압 V_{in} (200[V/div]), 하 : 입력전류 I_{in} (1[A/div])
 (e) Experimental waveform of input voltage and current

그림 6 각 부의 실험 파형(시비율(Duty- Q_1)=0.18)

Fig. 6 The each part of the experimental waveform (Duty- Q_1 =0.18)

그림 7 각 부의 실험 파형(시비율(Duty- Q_1)=0.5)

Fig. 7 The each part of the experimental waveform (Duty- Q_1 =0.5)

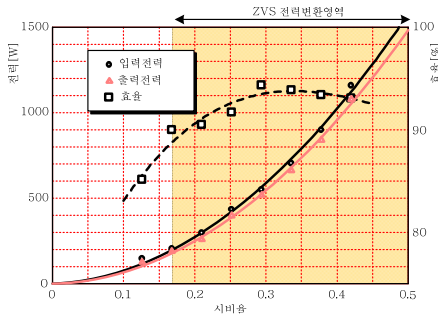


그림 8 PWM 제어 특성
Fig. 8 PWM control characteristics

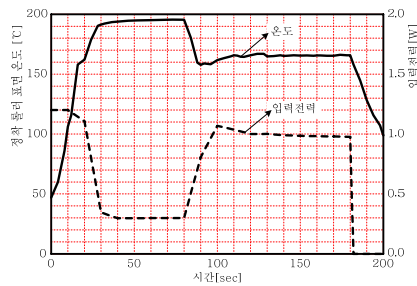


그림 9 온도 제어 특성
Fig. 9 Temperature Control Characteristics

4. 결 론

본 논문은 복사기 정착용 유도 가열계로 제안한 새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터 시스템에서 얻어진 결과를 정리하여 서술하면 다음과 같다.

(1) 기존의 1석형 싱글 엔드 ZVS-PFM 고주파 인버터에 비해 제안한 새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터는 전력 반도체 스위칭 장치의 전압과 전류 피크값을 억제 할 수 있어 스위칭 손실이 저감되었다.

(2) 제안한 새로운 액티브 전압 클램프 ZVS-PWM 공진 고주파 인버터 자체의 효율은 정격 전력 출력시 98[%]의 높은 효율을 얻을 수 있다.

(3) 낮은 출력시에도 96[%]의 효율을 얻을 수 있어 제안한 고주파 인버터가 매우 고효율 인버터라 할 수 있다. 그리고 상용 교류 입력에서 인버터의 출력까지의 종합 효율은 정격시 93[%]이므로 복사기에 사용하기에는 효율적이라 판단된다. 또한, 시스템 전체의 효율 분포에서 보면 다이오드 브릿지의 손실이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이에 비해 비평활 필터는 매우 손실이 적은 것을 알 수 있다.

이러한 결과를 통하여 계통 연계 제어의 성능을 높이고 소형·고효율화를 이루었다.

References

[1] J. G. Cho, C. Y. Jeong, "Zero Voltage and Zero Current Switching Full Bridge PWM Converter Using Secondary Active Clamp," *IEEE Trans. on*

Power Electronics, vol. 13, no. 4, 1998

[2] S. H. Lee, S. K. Lim, S. G. Song, "Design of New Current Full-Bridge Resonant Inverter for Induction Heating System," *Journal of the Korean institute of illuminating and electrical installation engineers*, vol. 26, no. 7, pp. 59-69, 2012.

[3] D. C. Shin, H. M. Kwon, K. H. Kim, Y. J. Kim, "A Study on the Development of Superheater Using High-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 119-125, 2004.

[4] Y. J. KIM, K. H. KIM, D. C. SHIN, "Electromagnetic Indirect Induction Fluid Heating System using Series Resonant PWM Inverter and Its Performance Evaluations," *The Transactions of KIPE*, vol. 7, no. 1, pp. 48-53, 2002.

[5] J. S. Lee, "(A) design of high frequency parallel-resonant inverter for induction heating," *Department of Electrical Engineering, Graduate School of Industry, Pusan National University*, pp. 3-25, 2005.

[6] B. S. Lee, "A Study on Development of Power Supply for High Frequency Induction Heating," *Journal of Korea Society of Industrial Application*, vol. 5, no. 3, pp. 179-186, 2002.

[7] J. M. Ho, M. T. LEE, "A novel PWM inverter control circuitry for induction heating," *IEEE International Power Electronics Congress*, vol. 10, pp. 113-119, 1996.

[8] S. H. Park, "A study on the characteristics of electric superheater using induction heating," *Department of Electrical Engineering, The Graduate School Hoseo University*, pp. 5-25, 2012.

[9] S. Llorente, F. Monterde, J. M. Burdio, and J. Acero, "A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC*, vol. 2, pp. 1168-1174, March 2002.

저 자 소 개



안 용 위(安 容 位)

2014년 부경대 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2016년 동 대학원 전기공학과 (박사수료). 1999년 1월~현재 한려전기(주) 근무. 현 본 학회 정회원



김 홍 신(金 洪 伸)

2005년 경남대 전기공학과 졸업. 2007년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1996년~현재 한국수자원공사 재직. 현 본 학회 산업전기위원회 정회원



문 상 필(文 相 弼)

1997년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2010년 8월~현재 마산대학교 전기과 조교수. 2009년 7월 IEEE ISIE Bsst Paper Award 수상. 2010년 12월 한국조명전기설비학회 학술상 수상. 현 본 학회 산업전기위원회 편집위원 겸 정회원



우 경 일(禹 炘 一)

1969년 9월 6일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년~현재 부경대학교 전기공학과 교수



박 한 식(朴 瀚 錫)

1981년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1983년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(박사). 1986년 3월 ~현재 부경대학교 공과대학 전기공학과 교수. 현 본 학회 정회원