

FGS를 이용한 황전등 전원장치의 설계 및 구현

(The Design and Implementation of Inverter Power Supply with FGS for Sulfur Lamp)

정원근*

(Won-Geun Jeong)

요 약

본 논문에서는 퍼지 이득 조정기를 이용한 황전등 전원장치를 제안하고, 회로를 설계하고 제작을 통해 성능을 확인하였다. 직렬 공진 하프 브리지 인버터를 기본으로 하여 전원변동 및 출력 보상을 위한 PFM(Pulse Frequency Modulation), 영전압 스위칭, 소프트 스위칭, 소프트 스타트를 적용하고 퍼지 이득 조정 알고리즘을 통해 역률과 효율을 개선하여 마그네트론의 수명 연장 및 안정된 출력을 얻을 수 있도록 하였고, 기존의 고정 출력에서 900~1250[W] 연속 가변 출력이 가능하게 하였다. 제작된 전원장치는 전원 전압의 변동에 대하여 상용 전원 220V±15[%]에서 안정적인 출력 특성과 광효율 97[lm/W], 역률 96[%]로서 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

This paper suggested the sulfur lamp power supply using Fuzzy Gain Scheduling(FGS), which was designed and confirmed the performance through manufacturing. it was based on Series Resonant Half Bridge Inverter(SRHBI), so that was applied Pulse Frequency Modulation(PFM), Zero Voltage Switching(ZVS), soft switching and soft start for input power variation and output power compensation. In order to get the lengthened life time of magnetron and stabilized output of power, power factor and efficiency were improved by fuzzy gain algorithm. It also made it possible to get not the existing fixed output power but continuous variable output power(900~1250[W]). The manufactured power supply showed good results in input power 220[V]±15[%] with stabilized output of power, luminous efficiency 97[lm/W] and power factor 96[%].

Key Words : Sulfur lamp, FGS, Series resonant half bridge inverter, PFM, ZVS

1. 서 론

오늘날 화석연료의 고갈에 따른 에너지 문제를 해

결하기 위해 각국에서는 대체 에너지의 개발은 물론 고효율 에너지 저장장치의 개발과 에너지 변환장치를 소형화, 경량화 시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.

1995년대에 출현한 초고주파 방전에 의한 무전극 황전등은 조명 기술 분야에 새로운 획을 긋는 사건으로 많은 기대를 주었다. 그러나 주변 기기의 문제점으로 상용화가 지연되고 있다. 전력용 반도체 제조기술의 급속한 발전으로 고전압, 대전류의 고속

* 주저자 : 경상대학교 공학연구원 연구원
Tel : 055-759-2522, Fax : 055-759-2523

E-mail : twinjj@empal.com
접수일자 : 2005년 1월 26일
1차심사 : 2005년 1월 31일
심사완료 : 2005년 2월 14일

스위칭이 가능하게 되었으며, 특히 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 등장은 중 전력 고속 스위칭 분야의 성능 개선에 많은 도움을 주고 있다. 이러한 전력용 반도체 소자의 발전과 함께 스위칭 손실을 줄이기 위해 ZVS(Zero Voltage Switching), ZCS(Zero Current Switching), ZVT(Zero Voltage Transition), ZCT(Zero Current Transition) 등의 저손실 스위칭 기법과 출력 제어 방식의 일종인 PFM(Pulse Frequency Modulation), PWM(Pulse Width Modulation) 등을 적용한 회로들이 연구되고 있다. 현재 개발되어 있는 광원 중 가장 햇빛에 가까우면서, 광효율 및 수명 등에서 가장 우수한 광원은 황전등(sulfur lamp)이라고 불리는 마이크로파 무전극 방전등이다[1]. 기존의 황전등용 전원장치는 상용 주파수를 사용하는 성층 철심형 고압 변압기(High Voltage Transformer : HVT)와 큰 용량의 고압 커패시터(High Voltage Capacitor : HVC)를 사용한다. 따라서 승압트랜스포머나 배전압용의 고압 커패시터를 대형으로 하기 때문에 고중량, 구동 전원의 신뢰성 부족, 점등 시간의 연장, 저전력 밀도와 함께 연속 가변 출력이 불가능과 저효율로 운전되는 등의 단점을 지닌다[1-3]. 본 논문에서는 이러한 기존의 전원장치를 효율 및 성능과 중량, 부피 등에서 우수한 인버터형으로 제안하였다. 제안된 전원장치는 고출력에 적합한 인버터 회로방식을 비교 검토하여 SRHBI(Series Resonant Half Bridge Inverter)의 방식이 성능과 효율에서 가장 유리한 것으로 분석되어, 이 인버터를 기본으로 하여 전원변동 및 출력 보상을 위한 퍼지 이득 조정 알고리즘과 영전압 스위칭을 통해 역률과 효율을 개선하고, 마그네트론의 수명 연장 및 안정된 출력을 얻을 수 있도록 하였다 [4-5]. 기존의 전원장치는 고정 출력이었으나, 본 논문에서 제안한 전원장치는 연속 가변 출력으로 사용자가 원하는 밝기로 제어할 수 있게 하였다.

2. 마그네트론

2.1 마그네트론의 특성

마그네트론은 2450[MHz]의 microwave energy를

만드는 다이오드 타입의 전자관이다. 마그네트론은 그림 1에 나타낸 것과 같이 양극, 필라멘트/음극, 영구자석 등으로 구성된다. 그림과 같이 원통형 2극관의 양극 측에 공진기(공진 공간)를 두고 축 방향으로 장 자계를 인가하면, 음극에서 방출된 전자의 운동은 양극방향으로 가속됨과 동시에 자계에 의해 원주 방향으로 휘어지게 된다. 이때 전자는 원주방향으로 변조되며 집균과 공진기에 의한 여진을 되풀이하여 발전에 이른다. 그림 2에 마그네트론 양극 전류에 대한 전압, 평균출력전력 및 필라멘트 전압 특성들을 나타내었다. 통상 마그네트론의 컷오프 전압은 3~5[kV]에 달한다. 따라서 마이크로파의 발전을 위하여 컷오프 전압 이상의 전압을 인가하여야 하므로 마그네트론용 전원은 고압 발생이 가능하고 전력제어가 용이해야 한다. 한편 음극의 전자방출을 위해서는 음극 필라멘트의 가열이 요구된다[6].

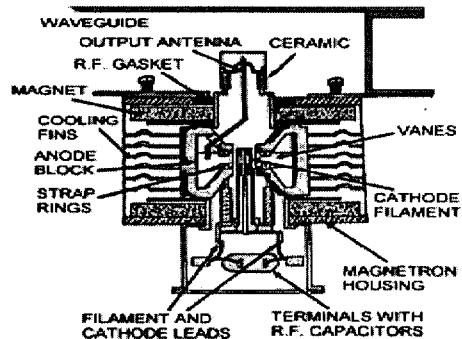


그림 1. 마그네트론의 내부 구조
Fig. 1. Internal construction of magnetron

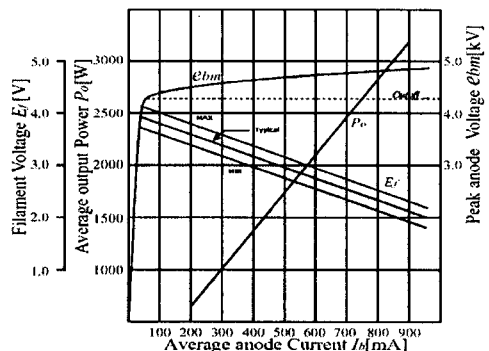


그림 2. 마그네트론의 양극 전류에 대한 전압 특성
Fig. 2. Cut-off voltage vs. anode current characteristics of magnetron

FGS를 이용한 황전등 전원장치의 설계 및 구현

따라서 필라멘트 가열을 위한 교류 3~5[V]와 3~5[kV]의 양극 전압을 동시에 공급하여야 한다. 그림 2에서 마그네트론의 출력은 양극 전류에 의해 결정됨을 알 수 있다. 필라멘트/음극에 인가되는 전압을 제어하여 양극 전류를 제어할 수 있다. 즉 필라멘트/음극에 인가되는 전압을 제어하여 마그네트론의 출력을 제어한다.

2.2 마그네트론의 등가회로

마그네트론의 음극에 컷오프 전압이상의 고전압을 인가하여 전자의 방출에 의한 전류가 흐르게 될 때까지 마그네트론은 고저항부하로 취급되는 한편, 발진 후에는 컷오프 전압을 가지며 한 방향의 전류가 흐르는 부하저항(R_o)이 된다. 따라서 마그네트론의 전류의 방향을 나타낸 다이오드(D) 클램프 전압을 표시한 제너다이오드(D_z)와 저항(R_1)로 등가화 할 수 있다.

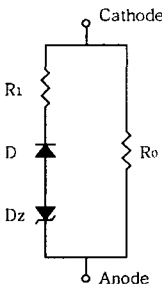


그림 3. 마그네트론 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of magnetron

필라멘트는 저항과 인덕터로 등가화 하였다. 마그네트론의 전기적 등가회로를 그림 3에 나타내었다.

3. 시스템 구성

황전등 전원장치는 마그네트론을 구동하는 인버터 전원장치로 구성된다. 마그네트론은 부하의 크기 및 종류에 따라 다양한 비선형 출력을 나타내므로 본 논문에서와 같이 고출력 및 출력을 가변 하는 경우 비선형이 더욱 심하게 나타난다. 기존의 비례, 미분, 적분 제어 방법으로 제어할 경우 원하는 출력에

가깝게 제어하기 어렵다. 본 논문에서는 이러한 비선형 출력 변동의 단점을 줄이기 위해 퍼지 제어를 제안한다. 본 논문에서 제안한 퍼지 이득 조정기를 이용한 마그네트론 구동 인버터 시스템은 가변 출력 제어 방식으로 효율 및 역률 개선을 위해 소프트 스타팅 기법과 PFM, ZVS, SRHBI를 제안한다 [7-8]. 기존의 철심형 마그네트론 구동용 전원장치의 단점인 입력 전원 변동에 따른 구동 전원의 신뢰성 부족을 해결하고, 마그네트론의 구동 전원을 안정화 시켜 수명연장과 함께 퍼지 이득 조정 제어를 적용하여 출력의 변동에 따른 램프의 밝기의 변동을 없애고, 초기 점등 시간을 단축시키고 출력을 가변 하여 원하는 밝기로 운전할 수 있는 인버터형 전원장치로 설계하였다.

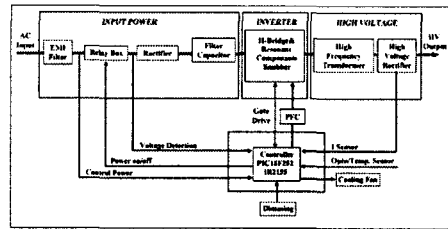


그림 4. FGS를 적용한 황전등 전원장치 구성도
Fig. 4. Block diagram of Inverter Power Supply with FGS for Sulfur Lamp

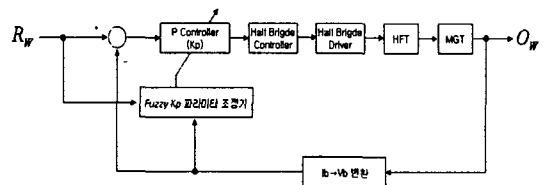


그림 5. FGS 제어기 구성도
Fig. 5. Block diagram of FGS controller

그림 4에서 퍼지이득조정기를 적용한 황전등 전원장치의 구성도를 보여준다. 퍼지 제어기의 장점은 적절한 규칙설정에 의해 플랜트를 구동할 수 있고, 기존의 제어기와 사용할 때 그 제어기를 수정, 또는 보완할 필요가 없다는 것이다. 따라서 원하는 응답 특성에 근사시킴으로써 보다 정밀한 제어특성을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 초고주파 발진 소자로 마그네트론을 사용한다. 마그네트론은 부하특성상 비선형 구조를 가지므로 이러한 퍼지 제어기의 장점을

사용하여 P 제어기와 결합한 퍼지 이득 조정기를 설계하였다.

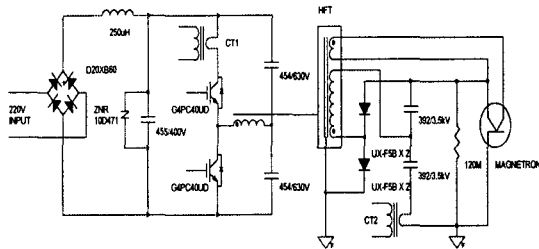


그림 6. 직렬 공진 하프 브리지 인버터 회로
Fig. 6. Series resonant half bridge inverter circuit

설계순서는 제어구조를 결정하고, 결정된 제어구조에 대해 입출력 공간의 퍼지분할과 거기에 따른 소속 함수의 할당, 제어 규칙의 설계, 퍼지화 (fuzzification), 추론(inferencing), 비퍼지화 (defuzzification)하여 K_p 를 얻는다[9]. 그림 5는 제안된 퍼지 이득 조정기의 구성도이다. 기존의 P 제어기에는 두개의 입력(설정 전력 R_w 과 피드백 양극 전류 I_b 의 전압 변화량)과 1개의 출력(출력 전력 O_w)을 가지고 있으며, 퍼지 이득 조정기에는 설정 전력과 피드백 양극전류를 입력으로 사용하여 P 제어기의 파라미터 K_p 를 조정하여 설정 전력에 대하여 항상 일정한 출력전력을 내도록 하였다.

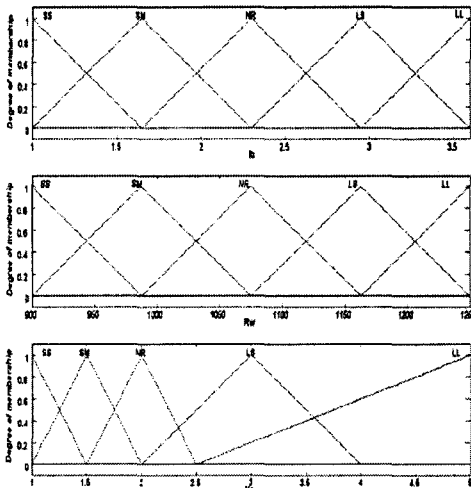


그림 7. I_b , R_w , K_p 의 소속함수
Fig. 7. Membership function for I_b , R_w , K_p

4. 퍼지제어기 설계

그림 7은 입력 R_w , 양극전류 I_b , P 제어기의 파라미터 출력 K_p 의 퍼지 소속 함수를 나타낸 것이다. 이와 같이 입력과 출력 소속 함수는 5개의 삼각형 형태를 사용하였으며, 5개의 소속 함수는 각각 SS, SM, NR, LS, LL로 표현하였다.

표 1. K_p 에 대한 퍼지 제어 규칙표
Table 1. Fuzz tuning rules for K_p

$R_w \backslash I_b$	SS	SM	NR	LS	LL
SS	LL	LS	NR	LS	LS
SM	LS	LS	NR	NR	LS
NR	NR	NR	NR	NR	NR
LS	SM	SM	NR	NR	SM
LL	SS	SM	NR	SM	SM

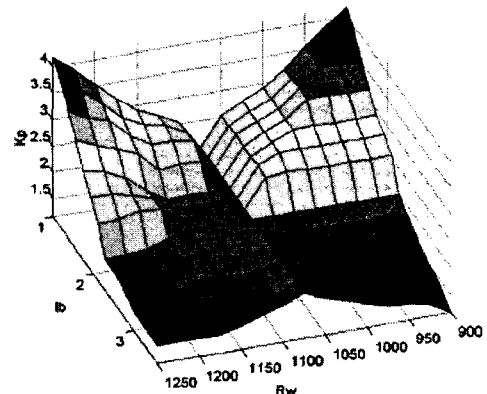


그림 8. 퍼지 제어 규칙의 3차원 표현
Fig. 8. A three-dimensional plot of fuzzy tuning rules

표 1에 있는 i -번째 제어규칙 R_i 는 다음의 식(1)로 표현된다.

$$R_i : \text{If } R_w \text{ is } A_i \text{ and } I_b \text{ is } B_i \text{ then } K_p \text{ is } C_i \quad (1)$$

추론 방법은 일반적으로 많이 사용하는 Mamdani의 MAX-MIN법을 사용하였다. 식(2)에서 입력이 ($R_w = r_w^0, I_b = i_b^0$) 일 때 i -번째 제어규칙 R_i 의 적합도 ω_i 는 다음 식으로 계산된다.

FGS를 이용한 광전등 전원장치의 설계 및 구현

$$\omega_i = \mu_{A_i}(r_w^0) \wedge \mu_{B_i}(\Delta i_b^0) \quad (2)$$

i-번째 제어규칙 Ri에 의한 퍼지 추론 결과 Ci'은 다음과 같다.

$$\mu_{C_i}(k_p) = \omega_i \wedge \mu_{C_i}(k_p) \quad (3)$$

비퍼지화는 가장 많이 사용되는 무게 중심법 (Center of Gravity : COG)을 사용하였다. 식(3)에 의해 구한 Ci'을 COG 방법으로 비퍼지화한 추론 결과 K_{P_i} 는 다음과 같이 계산된다.

$$K_{P_i} = COG(C_i') \quad (4)$$

표 1에 있는 25개의 제어규칙에 의한 비퍼지화된 추론결과 K_{P_i} 는 다음 식과 같이 구한다.

$$K_P = \frac{\sum_{i=1}^{25} \omega_i K_{P_i}}{\sum_{i=1}^{25} \omega_i} \quad (5)$$

그림 9에서 설정전력 $R_w=1000$, 양극전류 $I_b=1.4$ 에서의 추론결과를 보여준다.

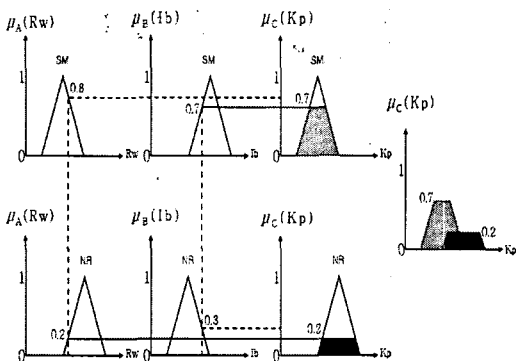


그림 9. $R_w=1000$, $I_b=1.4$ 일 때의 추론결과
Fig. 9. Inference for $R_w=1000$ and $I_b=1.4$

5. 실험결과

본 논문에서 제안한 퍼지 이득 조정기를 사용한

인버터의 설정전력에 대한 출력전력을 그림 10에 나타내었다. 그림에서와 같이 퍼지 이득 조정 제어기를 적용한 인버터가 설정전력에 대하여 거의 일정한 광을 출력하는 것을 알 수 있다. 그림 11은 제안한 FGS를 적용한 인버터와 기존 고정주파수 인버터 방식 및 철심형 방식에 대해 입력전압 220[V]±15[%], 출력 1250[W]의 조건에서 전기적 성능 시험결과를 나타내었다. 제안된 FGS를 사용한 인버터가 그림에서와 같이 전원변동에 따라 출력이 매우 안정적인 결과를 나타냈으며, 정격전압에서 최대의 역률을 나타내었다. 입력전압이 -10[%]이하의 전압에서는 전력을 충분히 보상하지 못하였다.

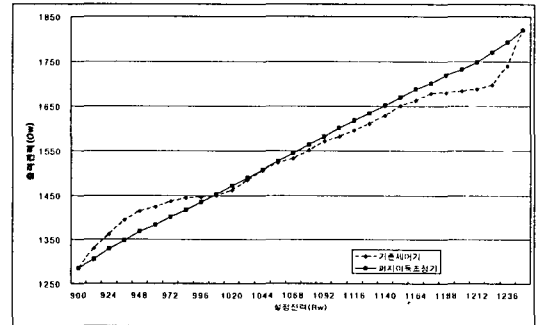


그림 10. FGS를 적용한 설정전력에 대한 출력전력
Fig. 10. The output power according to the setting power

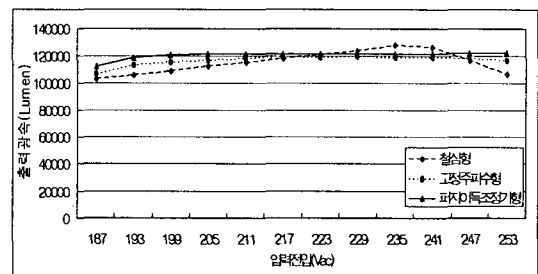


그림 11. 입력전압 변동에 따른 출력광속
Fig. 11. The output lumens according to the input voltage variation

설정전력 1000[W]로 조정된 후 설계한 인버터의 실험 결과 파형을 그림 12, 그림 13, 그림 14에 나타내었다. 그림 12에서 양극 전류가 약 500[mA], 양극 전압이 약 3.8[kV]로 일정하게 조절되며 그림 13에서 양극 전류의 변화에 따른 PFM을 확인할 수 있었

으며, 그림 14에서는 HFT의 출력 파형으로 에너지 전달이 잘 이루어짐을 확인 할 수 있다.

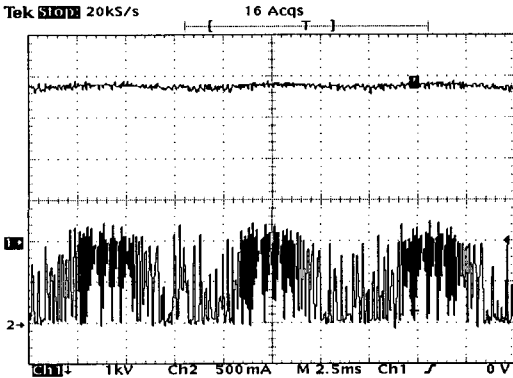


그림 12. 마그네트론의 양극 전압 및 양극 전류
Fig. 12. Waveforms of magnetron ebm/ibm

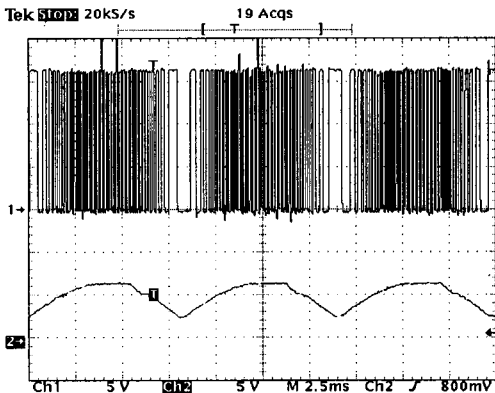


그림 13. 양극 전류에 따른 PFM
Fig. 13. PFM according to anode current

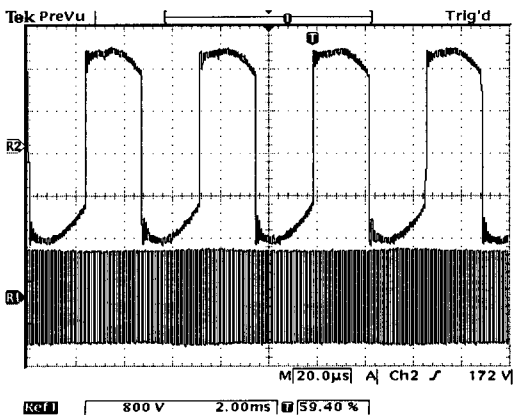


그림 14. HFT의 출력파형
Fig. 14. The output power of HFT

그림 15와 그림 16은 구현된 황전등 전원장치로서 디지털 파트인 MCU보드와 아날로그 파트인 인버터 보드로 고전압과 저전압으로 구분하여 제작하였다. 그림 15에서 MCU 보드로 사용된 마이크로컨트롤러는 마이크로칩 사의 PIC18F252 RISC CPU로서 32KB의 플래쉬 프로그램 메모리와 1.5KB의 데이터 메모리로 10MIPS의 동작 속도를 낸다. 그림 16에는 구현된 인버터 보드로서 소형, 경량의 HFT와 커패시터를 장착하여 소형화 및 경량화를 실현하였다.

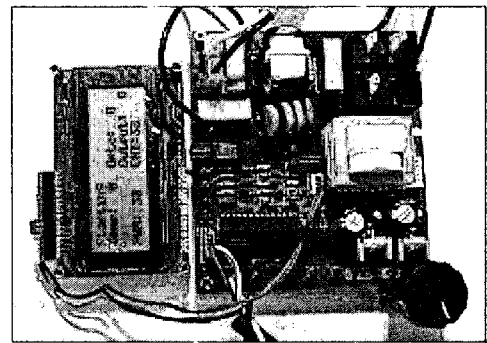


그림 15. 구현된 MCU 보드
Fig. 15. Implementation of MCU Board

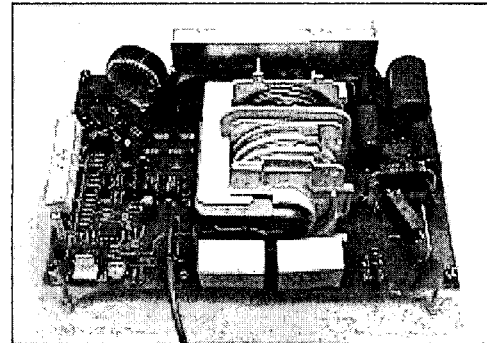


그림 16. 구현된 인버터 보드
Fig. 16. Implementation of Inverter Board

6. 결 론

본 논문에서 제안한 전원장치는 페라이트 코어를 사용한 소형, 경량의 고주파 변압기와 5nF 이하의 적은 용량을 가지는 고압 커패시터를 사용하여 기존의 전원장치(7.6kg)와 비교하여 약 1/3(2.2kg)의 경량화를 달성하였고, 기존의 고정 출력에서 900~

FGS를 이용한 왕전등 전원장치의 설계 및 구현

1250[W] 연속 가변 출력이 가능하게 하였다. 제작된 전원장치는 전원 전압의 변동에 대하여 상용 전원 220V±15[%]에 대하여 안정적인 출력 특성을 나타내고 있음을 확인하였고, 광효율 97[lm/W], 역률 96[%]로서 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

References

- [1] 정봉만, 한수빈, 정학근, 신 조명기술, 한국에너지기술연구원, ECOT 2001, pp.1-7, 2001.
- [2] 황명근, 이종찬, 박대희, "무전극 램프의 기술동향과 전망", 한국조명설비학회논문집, pp23-26, 2001.
- [3] Donald, A. M., Tuner, B. P., Dolan, J. T., Kirkpatrick, D. A. and Leng, Y., "High frequency inductive lamp and power oscillator", U.S. Patent: 6, 137, 237, 1999.
- [4] H. Ishiwatari, M. Nakaoka, D. Bessho, K. Ysai, H. Oori, "A Novel Soft-switched DC-DC Converter using ZVS-PWM Control-based High-Frequency Transformer Resonant Inverter For Magnetron Drive", Technical Report of IEICE, FE96-19 pp15-22, 1996.
- [5] M. Yasumasa, W. Masaki, T. Yasuo, S. Katsunori, "Inverter Power Supply for a Magnetron", Technical Report of IEICE, FE95-19, pp17-22, 1995.
- [6] Stephen C. Harsany, Principles of Microwave Technology, Prentice-Hall, pp119-137, 1997.
- [7] Y. Deguchi, S. Moisseev, M. Nakaoka, I. Hirota, H. Yamashita, H. Omori and H. Terai, "New Circuit Topology of Single-Ended-Soft-Switching PWM High Frequency Inverter and Its Performance Evaluations", ICPE2001, pp247-250, 2001.
- [8] T. Miyuchi, I. H. Hirota, H. Omori, H. Terai, Mamun Abdullah Al and M. Nakaoka, "Constant Frequency Adjustable Power Active Voltage Clamped Soft Switching High Frequency Inverter using The 4th-Generation Trench-Gate IGBTs", ICPE, pp236-241, 2001.
- [9] 채석, 오영석, 퍼지이론과 제어, 청문각, pp 207-290, 1995.

◇ 저자소개 ◇

정원근 (鄭元根)

1971년 6월 1일생. 1997년 진주산업대학교 전자공학과 졸업(학사). 2001년 경상대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2004년 경상대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 2000년 3월~현재 경상대학교 공학연구원 연구원. 2002년 2월~현재 남해전문대학 겸임전임강사. 에스엔티 개발실장.