

DBI 구조를 이용한 35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 설계

(Design of Electronic Ballast for 35[W] Ceramic Metal Halide Lamp by DBI Structure)

박종연* · 최왕섭**

(Chong-Yun Park · Wang-Seop Choe)

Abstract

Ceramic metal halide lamps have been widely used due to long lifetime, high luminous efficiency and good colour rendering. 35[W] ceramic metal halide lamps has very different characteristics between ignition state and steady state. The developed electronic ballast is satisfied to both ignition state and steady state characteristics by using a micro-controller. The proposed electronic ballast is consists of EMI filter, Full-wave rectifier, Active PFC, DBI(Dual Buck Inverter), Igniter and control circuit. It enables to supply both low-frequency rectangular wave voltage and current to the lamp by using DBI(Dual Bcuk Inverter) structure.

Key Words : Ceramic Metal Halide Lamp, Micro-Controller, DBI(Dual Buck Inverter), Control Circuit

1. 서 론

메탈 할라이드 램프는 다른 램프와 비교하여 수명, 광효율, 연색성 등이 좋아 지속적인 개발이 이루어지고 있다. 그 중 세라믹 재질의 방전관을 갖고 있는 메탈 할라이드 램프는 석영 재질의 방전관을 갖는 메탈 할라이드 램프보다 더 좋은 특성을 갖는다[1-2].

세라믹 재질의 방전관을 갖는 세라믹 메탈 할라이드 램프는 기존의 메탈 할라이드 램프와 비교하여 동일

한 전력에서 높은 광 효율, 높은 연색성, 긴 수명 및 광속 유지 등의 장점들이 있기 때문에 최근 도로조명뿐만 아니라 백화점이나 대형 할인 매장 등 여러 분야에서 사용되고 있다. 세라믹 메탈할라이드 램프는 석영보다 내열성 및 내 halide성이 뛰어난 투과성 Alumina ceramic을 아크튜브에 이용하여 램프의 특성을 향상시켜 우수한 색온도 및 연색성 유지특성을 가질 수 있게 하였다[10]. 하지만 세라믹 메탈 할라이드 램프는 기존의 메탈 할라이드 램프 보다 더 높은 점등 전압을 요구하고 있고 정상 상태에서 발생하는 음향 공명 현상으로 인해 안정기 개발에 많은 어려움이 있다. 정상 상태에서 발생하는 음향 공명 현상은 빛의 플리커링, 방전관의 arc 불안정을 불러오며 현상이 심할 경우에는 램프가 파손될 가능성이 있다[3-4].

또한 35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프의 경우 다

* 주저자 : 강원대학교 전기전자전공 교수, 공학박사

** 교신저자 : 강원대학교 전기전자전공 석사과정

Tel : 033-250-6292, Fax : 033-241-3775

E-mail : cwswh@naver.com

접수일자 : 2010년 5월 18일

1차심사 : 2010년 5월 25일

심사완료 : 2010년 6월 18일

른 메탈 할라이드 램프들과 달리 점등 시의 과도 구간과 정상 상태에서의 전류 특성이 크게 차이를 보이고 있다[5]. 이러한 특성으로 인해 35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프의 경우 점등 시와 정상 상태에서 조금 다르게 전자식 안정기를 제어할 필요성이 있다. 따라서 본 논문에서는 세라믹 메탈 할라이드 램프의 구동을 위해 높은 전압을 발생 시키는 Igniter, 정상 상태에서 음향 공명 현상이 일어나지 않도록 하며 35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프의 과도 상태 및 정상 상태의 특성을 모두 고려하여 램프의 전력을 제어할 수 있도록 개발된 전자식 안정기에 대해 서술하고자 한다.

2. 전자식 안정기

2.1 35[W] CDM 램프의 특성

방전관이 세라믹으로 구성된 세라믹 메탈 할라이드 램프의 색온도는 4,000~4,300[K]이며 연색성은 92~96[Ra], 광효율은 90~95[lm/W]로 동작 특성이 우수한 것으로 알려져 있다[9].

표 1에는 PHILLIPS사의 35[W] CDM 램프의 광학적 특성을 나타내었다.

표 1. CDM 35[W] 램프의 특성
Table 1. Characteristic of CDM 35[W] Lamp

	35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프 (Master Colour CDM 35[W])
전력[W]	35
수명[H]	12,000
광속[lm]	3,300
색온도[K]	3,095
연색성[Ra]	81
광효율[lm/W]	94.3
정격전압[V]	88
정격전류[A]	0.5

그림 1은 CDM 35[W] 램프의 점등 특성을 나타낸다. 점등 초기 전압은 정상 상태 정격 전압의 20[%] 정도가 걸리며 전류는 정격 전류의 160[%] 이상이 흐르

게 된다. 과도 구간 동안 램프의 전압은 서서히 증가하고 전류는 서서히 감소하여 약 2분 정도 후에 정상 상태에 도달하게 된다.

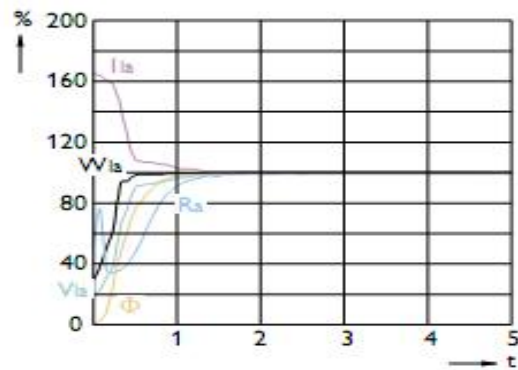


그림 1. CDM 35[W] 램프의 점등 특성
Fig. 1. Ignition characteristics of CDM 35[W] Lamp

과도 구간에서 정상 상태 전류의 1.6배 이상인 0.8[A] 이상이 공급될 수 있도록 인버터를 제어하여야 하고 정상 상태에서 0.5[A]가 공급될 수 있도록 해야 한다.

하지만 실제 측정 결과 점등 시 과도 상태에서 정상 상태 전류의 2배 이상인 1.2[A]의 전류를 공급해 주어야만 램프가 정상적으로 점등 된다. 그림 2는 램프 점등 시 전류 파형이다.

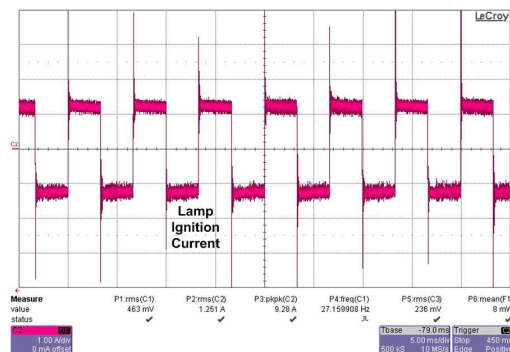


그림 2. 램프 점등 시 전류 파형
Fig. 2. Lamp current at ignition

2.2 전자식 안정기의 구조

개발된 전자식 안정기의 구조는 그림 3과 같다. 구

성은 EMI filter, Full-wave rectifier, Active PFC, DBI(Dual Buck Inverter), Igniter와 램프로 구성되어 있으며 제어 회로는 DBI(Dual Buck Inverter)의 스위칭 동작 제어 및 램프의 점등 상태를 판단하는 역할을 담당한다. EMI filter부터 Active PFC까지는 일반 전자식 안정기 구조와 같다. 따라서 본 논문에서는 DBI(Dual Buck Inverter), Igniter, 35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프의 점등 특성, 제어 회로, 램프 특성에 따른 제어 방법에 대해 설명한다.

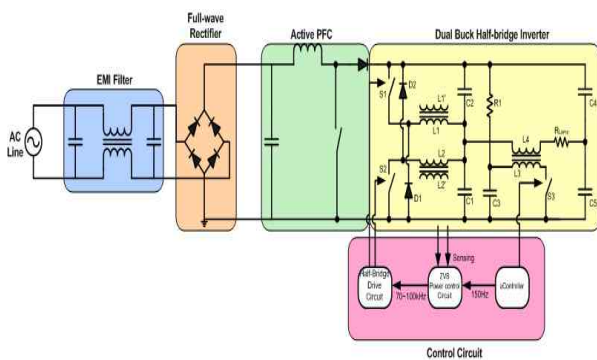


그림 3. 제안된 전자식 안정기 구조
Fig. 3. Proposed electronic ballast structure

2.3 Igniter

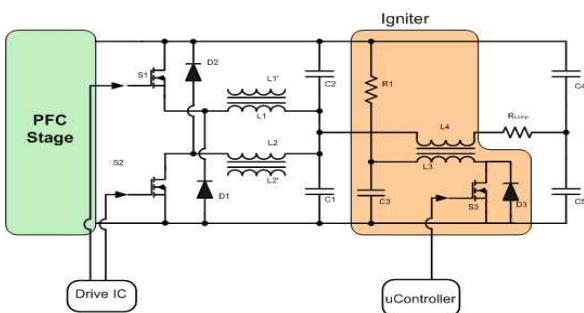


그림 4. Igniter와 DBI(Dual Buck Inverter) 구조
Fig. 4. Igniter and DBI(Dual Buck Inverter) structure

메탈 할라이드 램프는 고압 방전 램프의 일종으로 램프를 점등하기 위해서는 방전관의 형태에 따라 1~3[kV]의 고전압이 필요하다. 세라믹 튜브를 갖는 세라믹 메탈 할라이드 램프는 기존의 메탈 할라이드 램프

보다 더 높은 전압이 요구된다. 본 논문에서 사용한 세라믹 메탈 할라이드 램프인 CDM 35[W] 램프를 점등하기 위해서는 약 5[kV]의 전압이 필요하다. 따라서 별도의 Igniter를 이용해 램프에 고전압을 인가하게 된다[5].

회로에서 사용되고 있는 Igniter의 구조는 그림 4에 표시되어 있는 부분과 같다. 고전압의 발생 원리는 다음과 같다. 마이크로 컨트롤러에서 출력해 주는 펄스 신호는 3[ms] 주기에 100[us] 동안 S3을 On하도록 되어 있다. S3이 turn on 하게 되면 C5에 충전되어 있던 전하가 L3와 S3를 통해 순간적으로 방전하게 되어 L3에 높은 전압 V_{L3} 가 발생된다[6].

$$V_{L3} = L3 \frac{di}{dt} \quad (1)$$

이 때 L3와 C5의 공진 주파수를 갖는 damping 전압이 L3에 발생하게 되는데 이는 T1의 2차 측인 L4에 높은 전압이 전달된다. 이렇게 발생된 고전압은 램프 양단 전압으로 공급되어 방전관의 절연 파괴를 일으켜 아크를 형성하게 된다. R1은 C5가 방전 후 다시 충전되는 시간을 제어하는 저항으로 이그니션 펄스 발생 주기를 고려하여 결정해야 한다. 또 L4의 등가 임피던스는 정상상태인 150[Hz]의 주파수에서 램프의 등가저항보다 작도록 설계되어야 한다.

2.4 DBI(Dual Buck Inverter)

DBI(Dual Buck Inverter)의 구조는 그림 4와 같다 [7]. DBI(Dual Buck Inverter)는 Buck converter 2개로 inverter를 구성한 형태이다. S1과 S2의 스위칭 동작은 다음 그림 5와 같다.

S1과 S2의 스위칭 주파수는 150[Hz]이다. 이 때 150[Hz]의 반주기 동안 S1이 On되어 있을 경우 70~100[kHz]의 스위칭 동작을 반복하여 램프로 공급되는 전류를 제어하게 된다. S2가 On되어 있는 150[Hz]의 반주기 구간에서도 동일하게 70~100[kHz]의 스위칭 동작을 반복하게 된다. 이와 같이 70~100[kHz]의 스위칭을 통해 발생하는 전류 리플은 L1, L2, C1, C2의

LC 필터에 의해 제거되고 150[Hz] 성분의 평균값만 램프로 전달된다.

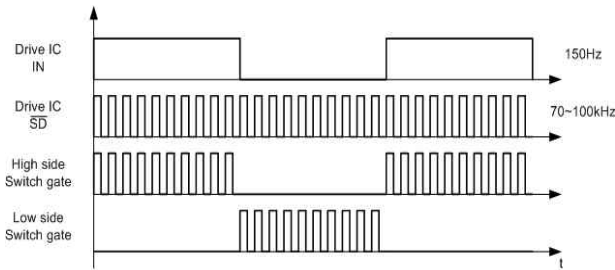


그림 5. DBI(Dual Buck Inverter) 스위칭 파형
Fig. 5. Switching wave of DBI(Dual Buck Inverter)

S1이 동작할 때 S2는 Off 상태이기 때문에 S1이 On 일 때 DBI(Dual Buck Inverter)는 그림 6과 같이 동작할 수 있다.

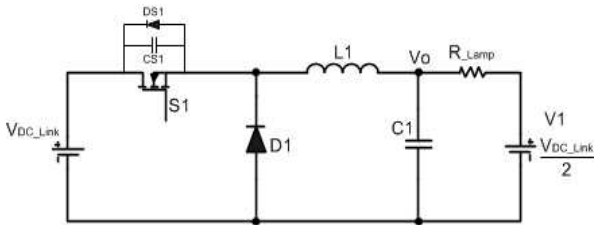


그림 6. DBI(Dual Buck Inverter) 동작회로
Fig. 6. DBI(Dual Buck Inverter) equivalent circuit

본 논문에서 사용된 전자식 안정기는 자체적으로 발생시키는 열을 최소화하기 위해 ZVS(Zero Voltage Switching)의 조건을 만족하도록 설계되었다[8]. 35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프를 위한 L1과 C1을 결정하기 위한 조건은 다음과 같다.

표 2. Dual Buck Inverter 설계 조건
Table 2. Design specification of Dual Buck Inverter

Dual Buck Inverter 설계 조건	값
f_s (Switching frequency)	90[kHz]
Duty	0.72
V_o (출력전압)	288[V]
I_o (출력전류)	0.5[A]
Δv_o (전압리플)	20[V]

duty는 램프 전압을 고려하여 Buck converter의 출력 전압에 대해 식 (2)를 이용해 결정하였다.

$$V_o = DV_{DC-Link} \quad (2)$$

Buck converter의 L에 흐르는 전류가 critical mode 일 때 L 전류의 평균치 I_{LB} 는 다음 식 (3)과 같다.

$$I_{LB} = I_o = \frac{D' V_o T_s}{2L1} \quad (3)$$

DBI(Dual Buck Inverter)가 ZVS(Zero Voltage Switching)을 하기 위해서는 L1의 전류가 음의 값을 갖는 구간이 존재해야 하므로 L1의 값은 식 (4)를 만족해야 한다.

$$L1 \leq \frac{D' V_o T_s}{2I_o} \quad (4)$$

Buck converter의 커패시터 C1의 설계 식은 (5)와 같다.

$$C1 = \frac{D' V_o T_s^2}{8L1 \Delta v_o} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이용하여 구한 L1과 C1의 값은 각각 890[uH], 69[nF]으로 실제 사용된 값은 L1은 600[uH], C1은 68[nF]이다. 그림 4의 L2와 C2는 각각 L1, C1과 같은 값을 갖는다.

2.4 제어회로

그림 7은 DBI(Dual Buck Inverter)의 스위치를 제어하는 기본 제어 회로이다[8].

스위치의 Turn On 시간을 결정하도록 전압을 센싱 받아 출력 된 V_{ZCD} 는 V_{ref} 와 비교된 후 buffer를 통해 RS latch의 Set 단자에 입력되어 스위치를 Turn On 하게 된다. 그리고 스위치의 Turn Off 시간을 결정하도록 Buck converter의 L에 흐르는 전류를 Transformer를 통해 전압 $V_{Lsensing}$ 으로 센싱 받아 $V_{Lsensing}$ 을 전압 원으로 한 적분기의 출력을 V_{mult} 와 비

교하여 RS latch의 Reset 단자에 입력되어 스위치를 Turn Off 하게 된다. RS latch의 출력에 연결된 delay는 두 개의 입력을 모두 0으로 만들어 현재의 Q 값을 유지할 수 있게 해준다.

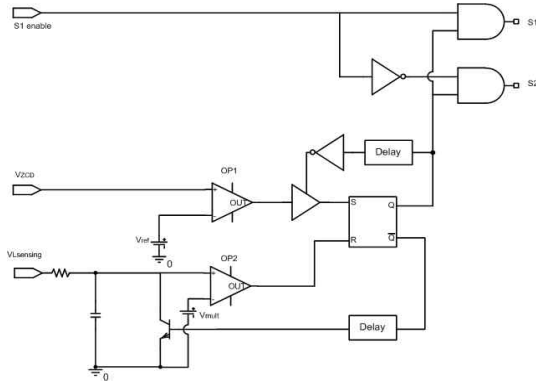


그림 7. 제어회로 블록 다이어그램
Fig. 7. Control circuit block diagram

3. 램프의 특성을 고려한 설계

3.1 인버터 스위칭 주파수의 결정

35[W] 세라믹 메탈 할라이드 램프의 경우 점등 시 전류와 정상 상태의 전류가 큰 차이를 갖는다. 이러한 특성으로 인해 램프의 점등 시와 점등 후의 인버터 스위칭주파수를 다르게 하여 안정기를 동작시켜야 한다.

DBI(Dual Buck Inverter)가 ZVS(Zero Voltage Switching)을 하기 위해서는 인버터의 L에 흐르는 전류 I_{LB} 가 음의 값을 갖는 구간이 있어야 하므로 초기 점등 시 스위칭 주파수는 다음 식 (6)과 (7)을 만족해야 한다.

$$I_{LBmax} = I_{LB} + V_o \frac{1-D}{2L1} T_s > 2I_{LB} \quad (6)$$

$$I_{LBmin} = I_{LB} - V_o \frac{1-D}{2L1} T_s < 0 \quad (7)$$

점등 시 인버터 L에 흐르는 전류 I_{LB} 는 1.2[A]이므로 위의 두 식 (6)과 (7)을 만족하는 스위칭 주파수 f_s 는 56[kHz]보다 작아야 한다. 따라서 초기에는 45[kHz]의 주파수로 인버터를 동작 시키고 램프의 점

등이 이루어지면 인버터를 90[kHz]의 주파수로 동작 시켜야 한다.

DBI(Dual Buck Inverter)의 스위칭 주파수 f_s 는 그림 7의 V_{mult} 에 따라서 조절할 수 있다. V_{mult} 는 V_{cs} 와 비교하는 전압이기 때문에 V_{cs} 의 전압을 이용하여 구할 수 있는데 이는 식 (8)과 같다.

$$V_{CS}(t) = \sqrt{\frac{L1}{L1}} V_{L1} (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (8)$$

V_{cs} 전압을 만드는 적분기의 R은 20[kΩ], Ct는 4.7[nF]을 사용하였다.

위의 식 (8)을 이용하여 V_{mult} 를 구하면 점등 시에는 1.2[V], 점등 후에는 0.5[V]로 구할 수 있다.

3.2 Ignition 판단 회로 및 Vmult 가변회로

V_{mult} 를 가변해 주기 위해서는 램프의 점등 상태를 알아야 하므로 램프의 Ignition 판단을 위한 회로를 그림 8과 같이 설계 하였다.

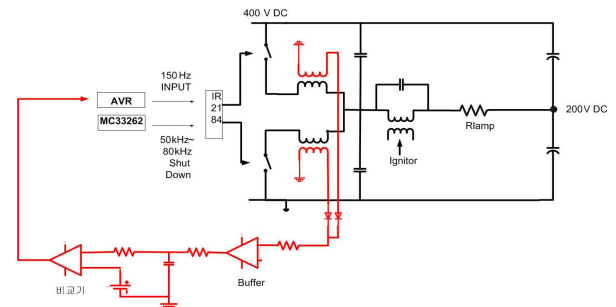


그림 8. 램프 점등 상태를 센싱하는 회로
Fig. 8. Lamp ignition state sensing circuit

램프가 점등되면 DBI(Dual Buck Inverter)의 L에 전류가 흐르게 되고 이 때 L 2차 측에 전압이 발생하게 된다. 이 전압을 RC 필터를 통해 DC 전압으로 만든 다음 1[V]의 reference 값을 갖는 비교기의 입력으로 가해준다. 비교기의 출력은 AVR로 입력된다. 즉 램프가 점등되어 비교기 입력에 1[V]보다 큰 전압이 인가되면 AVR에 0[V]가 입력되고 점등이 되지 않았을 경우 5[V]가 입력된다.

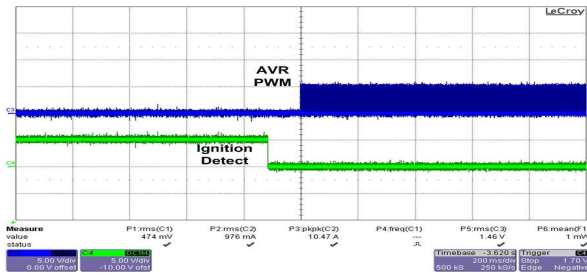


그림 9. 램프 점등 센싱과 PWM 파형
Fig. 9. Lamp ignition detecting and PWM waveform

그림 9에서 볼 수 있듯이 램프의 점등이 이루어진 것으로 판단되면 V_{mult} 를 가변해 주기 위해 AVR에서 PWM 신호를 출력하게 된다. PWM 신호를 이용하여 V_{mult} 를 가변해 주기 위한 회로는 다음 그림 10과 같다.

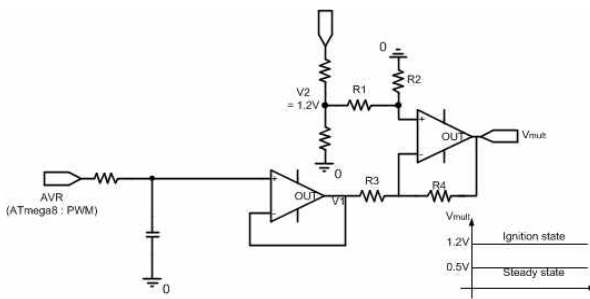


그림 10. PWM을 이용한 V_{mult} 가변회로
Fig. 10. V_{mult} variable circuit Using PWM

출력된 PWM 신호는 RC 필터를 통해 DC 값으로 바꾸고 이는 OP-Amp1의 buffer를 거쳐 가감산기로 이용된 OP-Amp2로 입력된다. 그림 10의 회로에서 입력 출력 관계식은 가상접지의 성립 하에 밀만 정리를 이용하여 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{V_2}{R_1} = \frac{V_1}{R_3} + \frac{V_{mult}}{R_4}$$

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

$$V_{mult} = V_2 - V_1 \quad (8)$$

(단 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$)

DC 전압분배에 의해 (+)단자로 초기에 1.2[A]가 램프에

공급될 수 있도록 1.2[V]를 입력한다. OP-Amp1에서 출력된 DC 전압은 OP-Amp2의 (-)단자로 인가되어 V_{mult} 전압을 0.5[V]로 만들어 램프의 전력을 제어하게 된다.

4. 실험결과

이상의 이론적 내용을 바탕으로 CDM 35[W] 램프의 정격에 맞게 전자식 안정기를 설계하였다. 그림 11은 정상 상태에서 램프의 전압 및 전류 파형을 P-SPICE를 이용하여 시뮬레이션 한 결과이다.

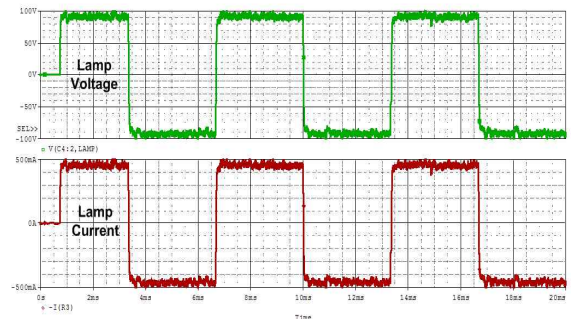


그림 11. 램프 전압 및 전류 시뮬레이션 파형
Fig. 11. Simulation waveform of Lamp voltage and current

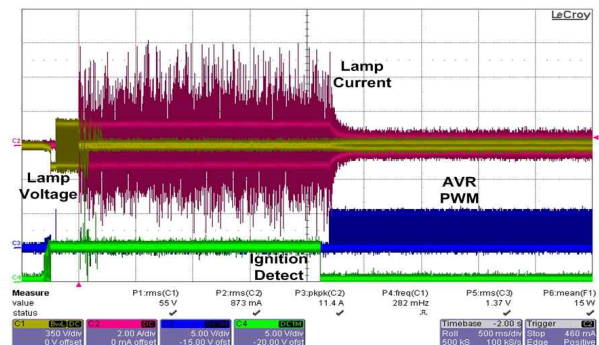


그림 12. 램프 점등 시 전압 및 전류 파형
Fig. 12. Lamp voltage and current at Lamp ignition

그림 12는 램프의 특성을 고려하여 점등시킬 때의 전압 및 전류의 파형이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에 1.2[A]의 전류를 흘려 점등시킨 후 일정 시간 동안 점등을 유지하기 위한 전류가 충분히 공급되면 램프

점등이 완전히 이루어졌다고 판단한다. 그 후 PWM 신호를 내주어 인버터 스위칭 주파수 f_s 를 가변함에 따라 램프에 공급되는 전류가 바뀌는 것을 볼 수 있다.

그림 13은 정상 상태의 램프 전압 및 전류의 파형이다. 이는 그림 11의 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

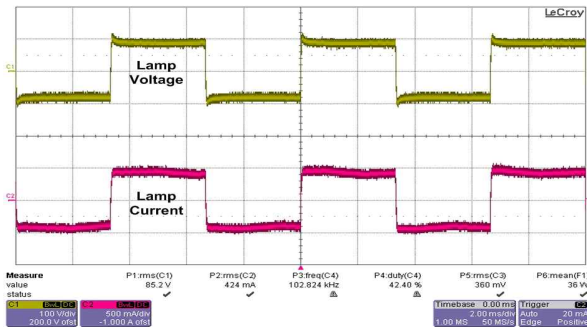


그림 13. 정상 상태의 램프 전압 및 전류
Fig. 13. Lamp voltage and current at Lamp steady state

5. 결 론

세라믹 메탈 할라이드 램프인 CDM 35[W]에 대한 전자식 안정기를 설계하였다. 전자식 안정기의 구조는 EMI filter, Full-wave rectifier, Active PFC, DBI(Dual Buck Inverter)로 구성되어 있다. 또 램프에 높은 점등 전압을 인가해 주기 위한 Igniter를 설계하였다.

DBI(Dual Buck Inverter) 구조를 적용함으로써 램프에는 저주파 구형파의 전압, 전류를 공급하여 음향 공명을 피하고 L은 고주파로 동작하여 사이즈를 줄일 수 있도록 하였다. 또한 ZVS(Zero Voltage Switching)의 과정을 통해 전자식 안정기의 능동 소자에서 발생하는 열을 줄임으로써 신뢰도를 향상시켰다.

마이크로컨트롤러를 이용하여 전자식 안정기를 제어함으로써 램프의 과도 상태 및 정상 상태의 특성을 모두 만족할 수 있도록 전자식 안정기를 설계하였다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.2010-102-03002-10).

References

- [1] J. R. Coaton and A. M. Marsden, Lamps And Lighting, London.UK : Arnold, pp.263-281, 1997.
- [2] W. M. Keeffe, "Recent progress in metal halide discharge - lamp research", Proc. Industry electro electronic. pt. A, vol. 127, No. 3, pp.181-189, April. 1980.
- [3] J. Garcia, J. Cardesin, J. Ribas, A. J. Calleja, E. L. Corominas, M. Rico-Secades and J. M. Alonso, "Using high frequency current square waveforms to avoid acoustic resonances in low wattage metal halide lamps", IEEE OESC'04, pp.2799-2904, 2004.
- [4] Jorge Garcia-Garcia, Jesus Cardesin, Javier Ribas, Antonio J. Calleja, Manuel Rico -Secades, Jose M. Alonso, "Minimization of Acoustic Resonances in HID Lamps: Analysis and Comparison of Power Harmonics Content in High Frequency Non-Resonant Inverters", IEEE Transaction on Power electronics. Vol. 20, No. 6, pp.1467-1479, November. 2005.
- [5] PHILLIPS, "Lamps & Gear (High Intensity Discharge Lamps)".
- [6] 신동석, "Dual-Buck 하프브리지에 의한 세라믹 MHD 램프용 전자식 안정기에 관한 연구", 강원대학교, 석사 학위 논문, 2009.
- [7] Zhuang Zuo, Dianguo Xu, Xiangjun Zhang, Hankui Liu, "Design of a Novel Low-Frequency Square-Wave Digital Electronic Ballast for HD Lamps", Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007, pp.3112-3116, June 2007.
- [8] 박종연, 신동석, 임기승, 최현희, "ZVS을 이용한 DB하프 브리지 인버터 구현 방법", 대한전기학회지, Vol. 58, No. 4, pp.756-762, April 2009.
- [9] PHILLIPS, "Original thinking in Lamps & gear Catalogue", March 2004.
- [10] 노재엽, 황명근, 신상욱, 이세현, 이진우 "150W급 세라믹아크튜브에 관한 연구", 한국조명전기설비학회 2008 춘계학술대회 논문집, pp.121-125, 2009, 05.

◇ 저자소개 ◇



박종연(朴鐘演)

1951년 2월 23일생. 1973년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 경북대 대학원 졸업(석사). 1984년 경북대 대학원 졸업(박사). 1977~1984년 울산공대 조교수, 부교수. 1984~현재 강원대 전기전자 정보통신공학부 교수.



최왕섭(崔旺燮)

1987년 10월 4일생. 2010년 강원대학교 전기전자공학부 전기전자 전공 졸업. 2010년~현재 동대학원 전기전자공학과 석사과정.