

HID 램프 디지털 안정기의 제작

(Implementation of a Digital Ballast for HID Lamps)

이 치 환

www.pwm.pe.kr 위덕대학교 정보통신공학부
(Chi-Hwan Lee, Uiduk Univ., Electronic Eng.)

Abstract

This paper presents a microprocessor controlled digital ballast for HID lamps, which gives intelligent features such as a precise power control, optimum ignition voltage and detection of end of life. Average current mode PFC is employed for reducing EMI and a universal input. Direct spread spectrum is done by applying 1 kHz triangular wave for removing acoustic resonance. This frequency modulation of 1 kHz gives also low EMI level and no ripple on lamp current. The microprocessor controls the voltage of DC-bus, the voltage of ignition pulses, the power of output and the bandwidth of spread spectrum. A 250W digital ballast is implemented with an efficiency of 93 % and a maximum EMI level of 55 dB μ V.

1. 개 요

HID 램프의 코일식 안정기는 효율이 좋은 전자식 안정기로 대체되고 있으며 코일식 안정기에 비해 많은 이점을 제공한다. 전자식 안정기는 낮은 안정기 손실과 경량화, 플리커 제거, 고역율, 낮은 전류 THD 등을 제공하지만 코일식 안정기에 비해 많은 전자파 잡음 방출과 내구성 등이 문제로 부각된다.

HID 램프는 점등, warm-up, 정상출력 등의 상태에 따라 전기적 특성이 변화하며, 사용시간에 따라 정격전압도 상승하는 비선형 시변 특성을 가진다. 그리고 초기 점등을 위한 고전압 펄스의 발생과 인가방법에 따라 램프 수명에 직접적 영향을 미치는 것으로 연구되어 있다. 이러한 램프특성에 대해 아날로그 회로로 구현된 전자식 안정기의 제어기능은 제한된다.

현재, 마이크로프로세서는 저 가격, 고성능 제어를 구현 가능케 하며 인텔리전트 형광등 안정기에 채용되고 있다. 아날로그 전자식 안정기는 HID 램프의 한정된 조건의 점등과 출력 제어기능 만을 가지며, 수명에 따른 램프 전압 상승에 대한 대처와 다양한 warm-up 패턴, 램프 상태를 고려한 점등방법 등의 구현은 곤란하다. 또한 컴퓨터 네트워크 통신에 의한 원격제어에도 어려움을 가진다.

HID 램프에서, 고압나트륨(HPS) 램프는 공명현상이 일어나지 않는 주파수 대역이 넓게 분포되어 있으나, 메탈할라이드(MH) 램프는 공명현상이 심각하게 나타나며, 낮은 주파수의 구형과 또는 스펙트럼 확산법으로 해결하고 있다. 구형과 구동에 비해 스펙트럼 확산은 half

bridge 인버터로 구성되므로 회로의 단순화가 얻어진다. 스펙트럼 확산법은 램프 전류의 맥동을 유발하며 이것은 광출력의 맥동으로 나타나므로 이에 대한 대처가 필요하다. 최근 시도되는 HID 램프의 dimming은 50~100% 광출력이며 램프전류 제어로 행하여진다. 램프의 수명과 관련하여 dimming시 정확한 출력제어가 요구된다.

본 연구에서는 마이크로프로세서를 채용한 250W 메탈할라이드 램프 디지털 안정기를 설계, 제작한다. 디지털안정기는 PFC, half-bridge LCC 공진 인버터, 8-bit 마이크로프로세서 ATmega16 및 회로구동용 flyback 전원부로 구성된다. 입력회로의 손실 및 EMI를 최소화하기 위해 PFC 제어는 평균 전류 모드로 동작시키며 유니버설 입력 80~270V를 허용한다. LCC 공진 인버터는 점등 고전압 발생과 출력제어를 동시에 수행하며 램프 전류-전압이 검출되고 마이크로프로세서에서 감시된다. 마이크로프로세서는 입력전압을 감시하며, 적절한 PFC의 출력전압을 결정하고, 스펙트럼 확산법의 확산대역을 제어한다. 또한 램프상태에 따른 최적제어와 보호기능 등이 수행된다. 이상상태에서도 계속적 감시를 위한 마이크로프로세서 구동용 전원을 독립적으로 설치하며 외부 네트워크 연결을 위한 RS-232 포트를 가진다.

디지털 안정기의 안정성을 위해 PFC와 공진 인버터 전류제어는 아날로그 제어기를 사용하고 C로 소프트웨어를 개발하였다. 제작된 디지털 안정기는 수명연장을 위한 최소의 고전압 펄스 방출과 단락, 단선 등에 대한 인텔리전트 기능이 확보되었고, 안정기 효율 93%, 역율 0.99, EMI 기준 CISPR 22 class B를 만족시킨다.

2. 디지털 안정기 설계

마이크로프로세서를 채용한 디지털 안정기의 구성은 그림 1과 같다. 교류 입력은 유니버설 전압 범위 80~270V이며 EMI 저감을 위해 2단의 라인 필터를 사용한다. PFC와 LCC 공진인버터는 마이크로프로세서를 제어되며 입력전압 60V에서 동작하는 flyback 전원부를 가진다. PFC 제어는 LT1249로 행하며 LCC 공진인버터는 gate 드라이브와 CD4046 VCO를 포함한다.

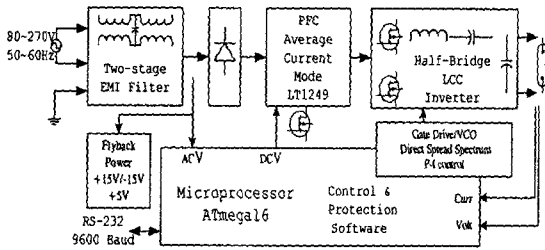


그림 1. 디지털 안정기 구성
Fig. 1. Configuration of the digital ballast

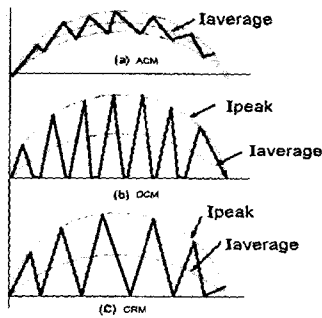


그림 2. Boost PFC 동작 모드
Fig. 2. Modes of boost PFC
a) average current mode (ACM)
b) discontinuous conduction mode (DCM)
c) critical conduction mode (CRM)

일반적인 boost PFC는 그림 2와 같이 3가지 모드로 동작될 수 있다. 가장 많이 이용되는 CRM은 MOSFET 스위칭 손실을 줄일 수 있으나 ACM보다 매우 큰 피크 전류와 인덕터에서 많은 손실을 가진다. 또한 CRM은 스위칭 주파수의 큰 전류 맥동으로 인하여 수 100kHz 대역에서 많은 EMI를 발생시킨다. 500kHz 이하의 EMI 56 dB μ V 기준을 만족시키기 위해 디지털 안정기는 ACM을 채택한다.

Boost 출력단과 공진 인버터의 스위칭 전류는 전해콘덴서의 수명단축에 치명적으로 작용하며 안정기 수명을 결정하는 요소이다. 디지털 안정기는 그림 3과 같이 전

해콘덴서 C2와 직렬로 인덕터 L1을 삽입하여 고주파 전류는 필름콘덴서 C1이 담당하며 C2에는 낮은 주파수 성분의 전류가 흐르도록 한다. 스위칭 주파수 ω 에서 C1의 리액턴스에 비해 L1의 리액턴스를 크게 유지할 필요가 있으므로, $X_{L1} > 10 \cdot X_{C1}$ 으로 가정하면, L1은 다음과 같이 결정 될 수 있다.

$$L_1 > \frac{10}{\omega^2 C_1} \quad (1)$$

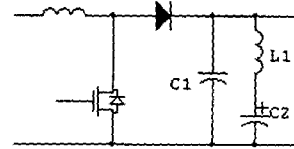


그림 3. 전해콘덴서 고주파 전류 필터
Fig. 3. Low pass filter for electrolytic capacitor

공진인버터는 점등에 필요한 고전압 발생과 램프 전류를 제어하기 위해 그림 4와 같이 LCC로 구성한다. PFC 출력전압 V_{dc} 는 공진인버터의 실효인가 전압 V_s 를 제공한다.

$$V_s = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \quad (2)$$

방전 개시 전의 공진 주파수 ω_s 는 다음과 같다.

$$\omega_s = 1/\sqrt{L_s \frac{C_s C_p}{C_s + C_p}} \quad (3)$$

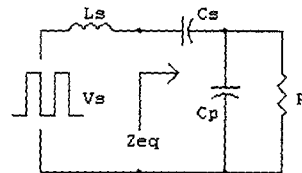


그림 4. LCC 공진인버터 등가회로
Fig. 4. Circuit of LCC resonant inverter

C_p 는 고전압 발생을 위한 보조 콘덴서이며, 점등된 램프는 등가저항 R로 표현 할 수 있으며, 등가 임피던스 Z_{eq} 는 등가저항 R_{eq} 와 등가리액턴스 C_{eq} 로 나타낼 수 있다.

$$Z_{eq} = R_{eq} + \frac{1}{j\omega_s C_{eq}} \quad (4)$$

$$R_{eq} = \frac{R}{\omega_s^2 R^2 C_p^2 + 1} \quad (5)$$

$$C_{eq} = \frac{kC_p(\omega_s^2 R^2 C_p^2 + 1)}{1 + (1+k)(\omega_s^2 R^2 C_p^2)} \quad (6)$$

여기서 $C_s = kC_p$ 이다. 이때의 공진 주파수 ω_0 는 다음으로 주어진다.

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_s C_{eq}} \quad (7)$$

공진인버터의 ZVS 동작을 위해 구동주파수는 ω_0 보다 높게 설정된다.

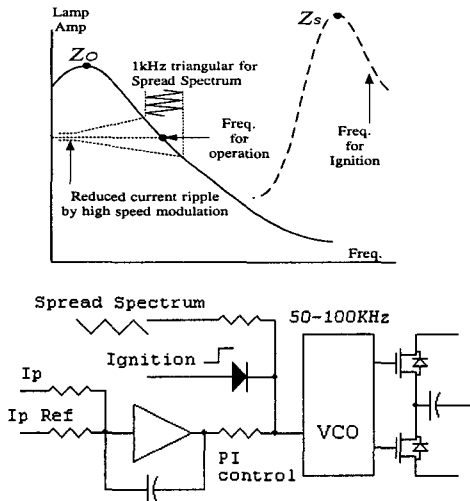


그림 5. 인버터 전류 제어기
Fig. 5. Current controller of the inverter

그림 5는 공진인버터의 주파수 제어특성과 제어기 구성을 나타낸다. 램프전류 I_p 를 제어하기 위한 PI제어기는 OP amp로 구현되고, 검출된 I_p 와 ATmega16에서 출력된 기준 전압으로 동작된다. 점등전압은 다이오드를 통해 인가되는 전압, 즉 VCO를 최대주파수 ω_s 로 동작하게 하여 발생시킨다. 음향공명 제거를 위한 스펙트럼 확산은 PI 제어기 출력과 함께 인가되는 삼각파 전압으로 일어난다. 공진인버터 구동 주파수 ω 를 중심으로, 선형적으로 변화하는 구동 주파수는 공진곡선 상에서 출력전류의 크기를 변화시킨다. 그러나 변조 주파수가 높은 경우, 공진회로 LC에 축적된 에너지의 영향으로 전류의 엔벨로프 변화가 감소되므로 디지털 안정기에서는 1kHz의 변조주파수를 선택하며 인가되는 삼각파의 크기는 마이크로프로세서에서 제어한다.

ATmega16에 접속되는 입출력은 그림 6과 같다. 10-bit AD를 통하여 입력 교류전압, 램프전압, 램프전류가 입력되며 PWM 출력을 이용하여 PI제어기의 I_p ref 전압을 생성한다. PFC와 공진인버터의 on/off, 점등

전압, 스펙트럼 확산에 이용되는 삼각파 등이 port B로 이루어진다. SPI 통신으로 디지털 가변저항을 제어하여 스펙트럼 확산 대역폭을 제어한다. 각 입력의 샘플링과 제어알고리즘은 입력되는 전원주파수 인터럽트에 의해 동기 운전된다.

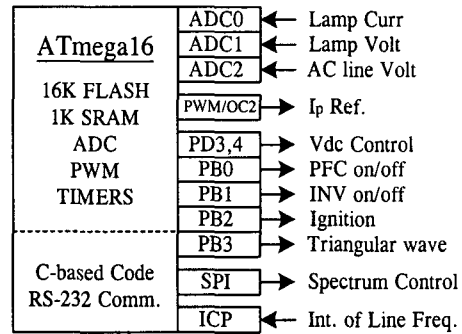


그림 6. 마이크로프로세서 I/O 구성
Fig. 6. I/O interface of ATmega16

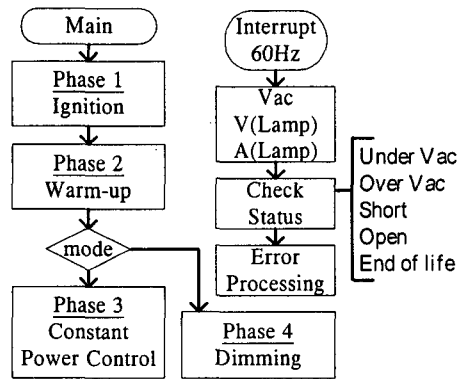


그림 7. 프로그램 구성
Fig. 7. Program flow chart

프로그램은 램프 구동을 위한 4개의 phase와 인터럽트 루틴으로 구성된다. Phase 1은 약 1~2 kV를 인가하는 초기 점등 구간으로 고전압은 20~70us 구간에서 인가한다. 방전 후 램프는 약 0.1초 정도의 불안정한 glow 방전 기간을 가지며 램프전압과 전류가 아크방전으로 안정화되면 phase 2로 전이된다. 점등 고전압은 1초 주기로 10회 인가하고 점등 실패 시 20초 주기로 최대 15번 인가한다.

Phase 2는 아크 방전이 개시된 후 정상 출력이 될 때까지 정전류 제어를 행한다. 일반적으로 정격전류 1.2배를 인가하지만 램프 전압에 따라 비선형 특성으로 프로그램하여 warm-up 시간을 줄일 수 있다. Mode에 따라 정격출력 제어 또는 출력을 감소시키는 dimming mode로 운전 가능하다.

입력되는 교류 전원으로부터 주기적인 60Hz 인터럽트를 생성하고 교류전압, 램프전압, 램프 전류를 측정한다. 램프의 전압과 전류로부터 단선, 단락, 수명말기 등의 오류를 검사하고 처리하는 작업을 수행한다. 디지털 안정기의 비정상 동작을 방지하기 위해 32ms 주기의 watchdog을 사용한다.

그림 8은 하드웨어 제어에 관련된 변수이며 전원 전압에 따라 PFC 출력 전압 V_{DC} 를 결정한다. PI 전류제어기에 인가하는 기준전압은 램프 전압으로부터 계산되고, 점등을 위한 고전압 펄스의 크기는 구동되는 시간에 비례하므로 점등 실패 횟수의 증가에 따라 시간을 증가시킨다. 램프 사용시간에 따라 점등 전압도 상승하며 수명말기 램프는 약 2kV 펄스에서 점등된다. 음향공명을 제거하는 스펙트럼 확산의 대역폭은 설정되는 변조도에 따라 디지털 가변저항으로 삼각파의 크기를 제어한다.

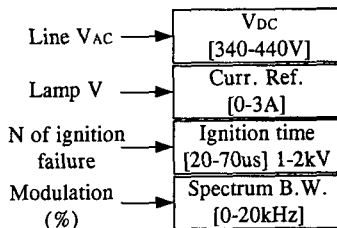


그림 8. 하드웨어 제어변수
Fig. 8. Variables for H/W control

3. 제 작

250W 메탈할라이드 램프를 구동하는 디지털 안정기를 제작하였다. Mosfet IRFP450을 사용하여 PFC 및 공진인버터를 구동하며, PFC 인덕터 700 μ H, 공진인덕터 250 μ H, gate 드라이브 IR21094를 사용하고 전해콘덴서는 100 μ F을 부착하였다. VCO는 CMOS 4046이며 OP amp TL084를 이용하여 아날로그 전압 및 전류 신호를 마이크로프로세서에 연결하였다. 그림 9는 제작된 디지털 안정기이며 그림 10에 입출력 파형을 보인다. 그림 10 b)는 교류 전압과 전류이며 전류는 필터링하지 않은 것으로 고주파 백동이 매우 작게 관측된다. PFC 인덕터에서 발생하는 철손이 매우 작게 되며 낮은 주파수대역의 EMI 발생도 동시에 저감된다. 그림 10 c)는 점등 전압인가 후 램프의 전압과 전류를 관측한 것이다. 점등 전압은 인가되는 시간에 따라 변화하며 최대 약 2kV 얻어진다. 그림 10 d)는 점등 후 약 0.1초 동안 불안정한 글로우 방전을 보인다. 글로우 방전 후 아크 방전으로 전이된다.

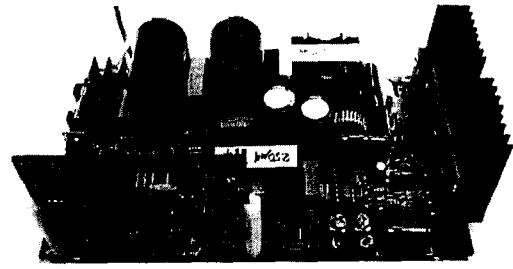
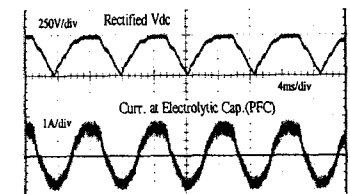
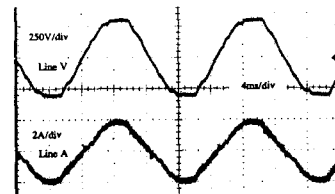


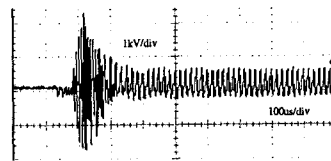
그림 9. 디지털 안정기
Fig. 9. Digital ballast



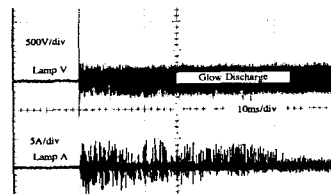
a)current at the electrolytic capacitor



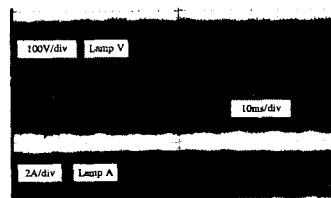
b)unfiltered line current



c)ignition voltage



d)ignition phase



e)FM modulated current

그림 10. 입력 및 출력 파형
Fig. 10. Input and output waveforms

그림 10 e)는 1kHz 삼각파로 $\pm 3\text{kHz}$ 대역으로 스펙트럼 확산된 전압, 전류 파형이다. 램프 전압과 전류는 동상이므로 동일한 모양을 유지한다. 1kHz 삼각파에 의한 엔벨로프 맥동은 무시할 수 있는 미소량으로 관측된다. 이것은 공진회로 LC에 저장된 에너지의 영향으로 엔벨로프 변화가 느리게 나타나기 때문이다. 그림 11 a)는 램프 전압의 파형과 스펙트럼을 이며 시간에 따라 주파수가 변화하므로 파형의 중첩을 볼 수 있다. 스펙트럼은 62.5kHz를 중심으로 약 6kHz 대역으로 확산되어 있다. 그림 11 b)는 전도성 EMI 잡음을 측정 한 것으로 CISPR 22 class B 제한을 만족시킨다. 낮은 EMI 방출은 CCM PFC와 삼각파에 의한 스펙트럼 확산에 기인한다. 그림 12는 코일식 안정기와 디지털 안정기의 점등 특성을 보인다. 초기 점등 후 코일식 안정기에 비해 디지털 안정기는 일정한 초기전류를 공급하므로 warm-up 시간이 줄어들게 됨을 알 수 있다.

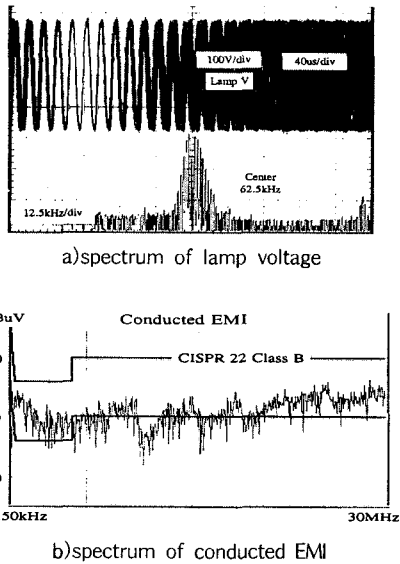


그림 11. 출력 스펙트럼 및 EMI 레벨

Fig. 11. Spectrums of lamp voltage and EMI

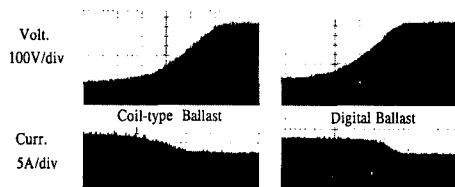


그림 12. 점등 특성

Fig. 12. Warm-up characteristics

4. 결 론

마이크로프로세서를 이용한 HID 램프용 디지털 안정기를 제작하였다. 비선형 시변 특성의 HID 램프를 디지털 안정기를 이용하여 최적 조건으로 구동 할 수 있었다. 입력전압 범위를 80~270V 유니버설로 설정하고 평균전류모드 PFC를 이용하여 전도성 EMI를 최소로 유지하였다. Half-bridge LCC 공진인버터는 PI 전류제어기로 구동되며, 음향공명 제거를 위해 1kHz 삼각파를 부가하여 스펙트럼을 확산시켰다. 고속 FM 변조로 인하여 램프 전류의 맥동이 제거되었고 EMI 발생도 감소시켰다. 점등제어와 램프의 단락, 단선, 수명말기 등의 판단이 가능한 인텔리전트 기능이 구현되었다. 250W 메탈할라이드 램프를 기준으로 제작된 디지털 안정기는 효율 93%, 역율 0.99 및 EMI 규격 CISPR 22 class B를 만족 시켰다.

참 고 문 헌

- [1] 이치환, "고압 나트륨등용 전자식 안정기의 설계", 대한전기학회 전력전자 학술발표회 논문집, vol. 20, No. 1, pp.99-102, 1998.
- [2] Chi-Hwan Lee and Seong-Hee Lee, "Control of resonant electronic ballast for HPS lamps", PCIM europe '99, pp.441-445, 1999.
- [3] 이치환, "고압 방전등의 고주파 점등 제어", 조명전기설비학회 학술대회'99, pp.114-118, 1999.
- [4] 이치환, "HID 램프용 전자식 안정기의 설계", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 13, No. 4, pp.14-20, Nov. 1999.
- [5] 이치환, "진폭변조에 의한 메탈할라이드 램프의 음향공명 감소", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 14, No. 5, pp.43-49, Sep. 2000.
- [6] 이치환, "400W 메탈 할라이드 램프의 전자식 안정기 구현", 조명전기설비학회 학술대회, pp.111-115, 2000.
- [7] Seong-Hee Lee and Chi-Hwan Lee, "Resonant-type electronic ballast for metal halide lamps", PCIM 2001, pp.62-69, 2001.
- [8] 이성희, 이치환, 권우현, "HID 램프용 공진형 전자식 안정기", 대한전기학회 논문지, Vol. 50B, No. 10, pp.530-535, 2001.
- [9] 이치환, 박선규, 이성희, 권우현, "HID 전자식 안정기의 고효율 설계", 조명전기설비학회 학술대회, pp.109-113, 2001.
- [10] 이성희, 이치환, 권우현, "HID 램프용 전자식 안정기의 효율 개선", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 16, No. 2, pp.9-17, Mar. 2002.
- [11] Seong-Hee Lee and Chi-Hwan Lee, "A novel power controller for an electronic ballast for HID lamps", PCIM 2003 europe, pp.579584, 2003
- [11] Stanislav Glozman and Shmuel Ben-Yaakov, "Dynamic interaction analysis of HF ballasts and fluorescent lamps based on envelope simulation", IEEE Trans. on IA, Vol. 37, No. 5, pp.1531-1536, 2001.