

전력선모뎀 및 조광제어 안정기를 이용한 400W Metal Halide Lamp의 조광제어 시스템 개발

Development of Dimming control system for 400W Metal Halide Lamp by Electronic Ballast and Power Line Modem

박 종 연* 최 왕 섭**
Park, Chong-Yeon Choi, Wang-Seop

Abstract

In this paper, we developed remote dimming control system of electronic ballast for 400W metal halide lamp. This ballast could limit ignition current and soft start-up technique by the inverter with LCsCp resonance tank. The dimming circuit can dim from 400W to 200W by varying of the inverter switching frequency. The PLM consists of coupling circuit, BPF(Band-Pass Filter), FSK(Frequency Shift Keying) Modem and μ -controller(Micro Controller). By coupling electronic ballast with PLM, the system that able to dimming the lamp through PLM is demonstrated by experimental results.

키워드 : LCsCp 공진탱크, 조광제어, 전력선통신모뎀
Keywords : LCsCp Resonance Tank, Dimming, Power Line Modem

1. 서론

MHL(Metal Halide Lamp)는 다른 광원에 비해 효율이 높다는 장점을 갖고 있지만, 높은 점등전압과 점등시간이 길어 주로 가로등 및 옥외 조명등으로 사용되어 왔다. 최근 MHL는 좋은 연색성과 긴 수명 때문에 백화점 및 대형매장의 전시용 조명등으로 사용되고 있다. 특히 메탈헬라이드용 전자식 안정기가 개발되면서 크기와 무게가 작아지고, 플리커링과 험 잡음이 제거되었으며, 역률, 광출력과 THD(Total Harmonic Distortion)가 개선되었다[1][2].

MHL의 구동을 위해 여러 가지의 구조들 중 LCC의 공진 인버터는 큰 전압이득과 낮은 입력전류의 특성을 갖고 있으며 인버터의 스위칭 주파수 제어에 의해 조광제어가 가능하다[3]. 또한 최근 녹색성장 사업과 더불어 에너지 절약에 대한 정부 차원에서의 관심이 높아지고 있어 조명기구들의 조광제어를 통한 소비전력의 감소가 필요한 상황이다. 그리고 감성조명 측면에서도 조광제어가 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 가로등이나 보안등에서 상황에 맞게 조광제어를 할 수 있도록 전력선 통신을 이용한 조광제어 시스템을 구축하고[4] 램프의 Dimming을 안정적으로 할 수 있는 400W MHL용 전자식 안정기를 개발하려 한다.

* 강원대학교 전기전자공학과 교수, 공학박사,
교신저자

** 강원대학교 전기전자공학과 4학년

2. Electronic Ballast

2.1 전자식 안정기의 구조

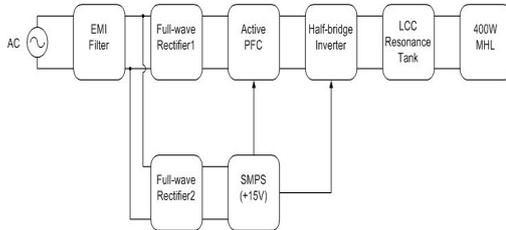


그림 1 Half-Bridge 구조 전자식 안정기 블록도

전자식 안정기의 구조는 그림2과 같다. Active PFC와 Half-Bridge Inverter, LCC 공진탱크회로를 통해 램프에 고주파정현파가 공급된다.

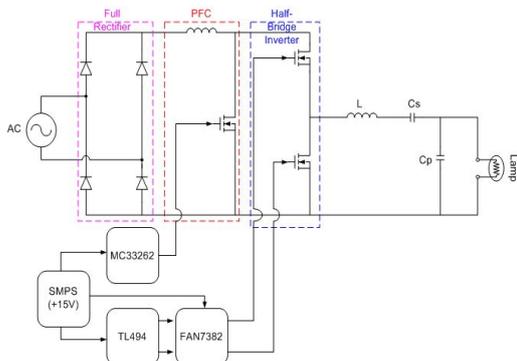


그림 2 전자식 안정기의 구조

Active PFC는 역률을 높이고 400Vdc의 전압을 인버터에 공급하는 역할을 한다.

인버터는 스위칭을 통해 램프에 필요한 정현파의 전압 및 전류를 공급하는 역할을 한다. 램프의 출력 전력은 인버터의 스위칭 주파수를 제어함으로써 조절할 수 있다. 인버터의 구동은 PWM IC와 Drive IC를 사용하여 구동하였다. 스위칭 주파수의 조절은 PWM IC의 출력을 제어하여 가변되도록 하였다.

2.2 Half-Bridge Inverter

LCsCp 공진형 인버터는 그림3과 같이 모델링 할 수 있다.

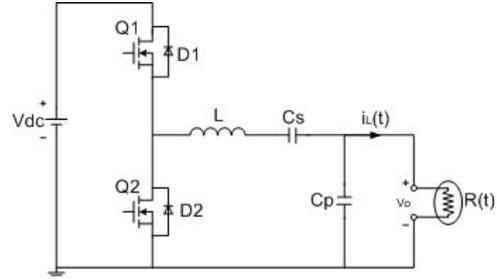


그림 3 LCC 공진탱크를 갖는 인버터 구조

아크가 형성되기 전 램프는 무한대의 저항으로 증가 할 수 있다. 인버터 드라이브 IC에 전원 (+15V)이 인가되면 Inverter 스위칭 주파수는 230kHz에서 정상상태 주파수인 55kHz까지 서서히 낮아지게 된다. 점등 전 램프의 등가저항은 무한대이므로 인버터 스위칭 주파수가 낮아짐에 따라 램프 양단에 LCsCp에 의해 큰 전압이 발생된다. 스위칭 주파수가 약 200kHz일 때 램프가 이그니션을 함으로써 초기 램프 인입전류의 양을 제한할 수 있어 안정기의 신뢰성을 높일 수 있다.

램프가 점등될 때 고주파수에서 점등되기 때문에 L의 임피던스 값($j2\pi fL$)이 크게 나타나 램프의 인입전류를 제한할 수 있다. 이러한 인입전류의 제한으로 인해 램프의 점등을 그림4와 같이 soft start-up 할 수 있다.

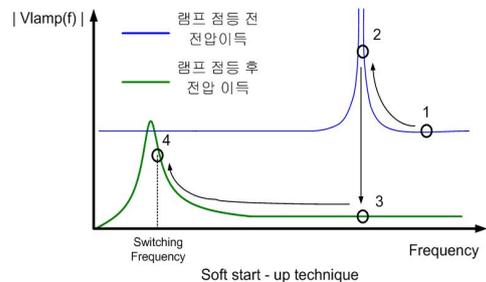


그림 4 Soft Start-up Technique

점등 전 램프는 무한대의 임피던스로 높은 Q값을 갖는 공진 커브를 형성하게 된다. 인버터 드라이브 IC에 전원이 인가되면 1지점에서부터 주파수가 서서히 낮아진다. 이로 인해 높은 전압이 형성되어 2지점에서 램프가 점등 되고, 이 때 램프의 임피던스는 유한한 값을 갖게 되어 결국 3과 같은 특성을 보이는 공진 커브를 갖게 된다. 인버터 스위칭 주파수는 정상상태 동작 주파수인 4가 될 때까지 계속 낮아진다.

2.3 LCsCp 공진회로 설계

LCsCp 공진탱크를 갖는 Half-Bridge Inverter에서 LCsCp의 설계는 다음과 같은 단계로 이루어진다. 램프의 정상상태에서 순수 저항을 갖는 것으로 가정할 수 있는데 이는 램프의 특성에 의해 관전압 및 전력을 이용하여 구할 수 있다. 400W에 130V의 관전압을 갖는 램프를 42.25Ω의 저항으로 가정하였다.

2.3.1 램프에 대한 전력식

램프의 정상상태는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R(t) = \frac{v^2(t)}{p(t)} \quad (1)$$

그림3에서 램프의 입력전류를 $i_L(t)$ 로 표현하였는데 이 전류는 점등 후 정상상태까지 주파수에 따라 변화하므로 주파수에 대한 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$i_L(\omega) = \frac{V_i}{(R(t) + \frac{R(t)C_p}{C_s} - \omega^2 R(t)LC_p) + j(\omega L - \frac{1}{\omega C_s})} \quad (2)$$

램프에 공급되는 전력은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Lamp} = |i_L(\omega)|^2 R(t) \quad (3)$$

위의 식(3)에 램프 등가저항 식(1)과 입력전류 식(2)를 식(3)에 대입하여 전력을 구하면 다음의 식(4)와 같다.

$$P_{Lamp} = \frac{V_i^2 R(t)}{(R(t) + R(t)\frac{C_p}{C_s} - R(t)\frac{C_p}{C_s}(\frac{\omega}{\omega_o})^2 + Z_0^2(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega})^2} \quad (4)$$

식(4)에서 R_{Lamp} , V_i , ω_o , ω 를 상수로 놓고 C_p , C_s 를 변수로 두어 400W의 출력을 갖는 LCsCp의 값을 설계한다.

위의 변수들은 다음과 같다.

- R_{Lamp} : 램프 등가저항 값
- V_i : 인버터 입력 전압
- ω_o : 정상상태의 인버터 스위칭 주파수
- ω : 구동되는 인버터 스위칭 주파수

설계된 L, Cs, Cp의 값은 다음과 같다.

- L : 200uH
- Cs : 94nF
- Cp : 2.8nF

2.4 Dimming 회로 설계

현 구조의 안정기에서는 PWM IC를 이용하여 인버터의 스위칭 주파수를 가변하는 방법으로 조광제어를 할 수 있다. 조광제어 범위는 램프 출력 400W부터 200W까지 실현하였다.

400W 출력을 내는 주파수 55kHz부터 200W 출력을 내는 주파수인 78kHz까지 주파수를 변화시켜 램프를 Dimming하였다. 인버터의 스위칭 주파수 변경은 PWM IC인 TL494의 RT단에 흐르는 전류의 양을 조절함으로써 실현하였다[5].

Dimming을 위한 조건은 표1과 같이 결정하였다.

표 1 램프 전력에 따른 스위칭 주파수

램프 전력[W]	스위칭 주파수 [kHz]	PWM Duty	램프전력 조절[%]
398	54.8	0.20	100%
358	57.7	0.28	90%
314	60.8	0.36	80%
282	64.9	0.44	70%
242	70.3	0.52	60%
200	77.8	0.60	50%

표1을 바탕으로 Dimming 회로의 입력 PWM신호의 Duty와 램프의 전력에 대해 시뮬레이션을 통해 확인해 보았다.

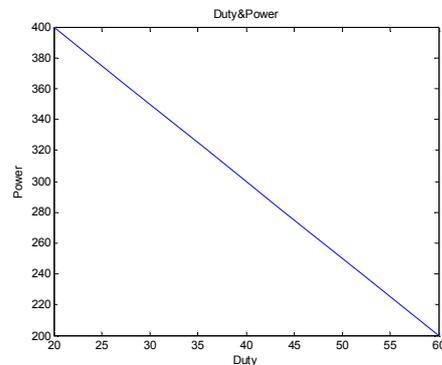


그림 5 PWM Duty에 따른 램프전력

PWM 신호의 duty에 따라 램프의 전력이 선형적으로 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 이것을 통해 PWM 신호의 duty가변에 의한 램프 전력의 제어가 타당하다는 것을 알 수 있다. Dimming 회로를 그림6과 같이 설계하였다.

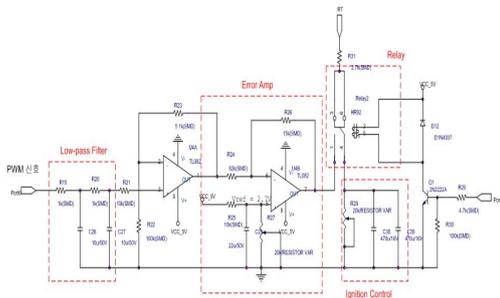


그림 6 램프의 조도 제어를 위한 회로

회로의 구성은 Low-pass Filter, Amplifier, Error Amp로 되어있다. 입력 PWM 신호는 Low-pass Filter를 거쳐 DC전압으로 만들어 진다. 이 전압은 Amplifier에서 한번 증폭이 되고 Error Amp의 입력으로 들어가게 된다. Error Amp에서 출력 된 DC전압은 TL494 IC의 RT단자와 연결된다. 입력 PWM 신호의 duty에 의해 달라지는 출력 DC전압에 의해 TL494 IC의 RT단으로 흐르는 전류의 양을 제어하여 인버터 스위칭 주파수를 가변함으로써 램프를 Dimming할 수 있게 된다. Relay는 초기에 램프의 이그니션을 위한 Ignition Control 회로가 동작하게 하고 램프가 정상상태에 도달하게 되면 Dimming 회로가 동작하도록 하는 스위치의 역할을 한다.

그림6의 회로를 밑만의 정리를 이용하여 입·출력 관계식을 정리하면 식(5)와 같다.

$$v_o = \left(1 + \frac{R26}{R24}\right)v_{ref} - \frac{R26}{R24}v_{o1} \quad (5)$$

$$= \left(1 + \frac{R26}{R24}\right)v_{ref} - \frac{R26}{R24} \left(1 + \frac{R23}{R22}\right)v_{in}$$

여기서 v_{ref} 는 Error Amp의 기준전압으로 일정한 DC전압이기 때문에 입력전압 v_{in} 에 따라 출력 전압이 달라진다는 것을 알 수 있다.

3. Power Line Communication

3.1 FSK Modem System

ST사의 FSK(Frequency Shift Keying) 방식으로 변조되는 ST7540 Modem IC를 사용하여 PLC Modem 회로를 다음과 설계하였다.

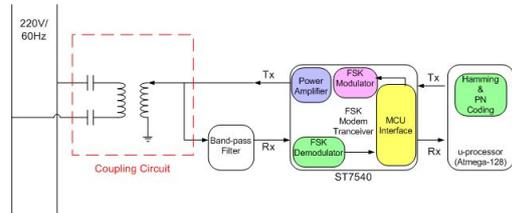


그림 7 FSK Modem 구조

220V/60Hz의 전력선을 이용해 Modem 회로로 신호를 전달하기 위해 트랜스포머를 이용하여 Coupling 회로를 구성하였다. Coupling 회로를 트랜스포머로 구성함으로써 전력선과 모뎀을 절연하였다. 전력선으로 수신된 신호는 Band-pass Filter를 통해 필터링 한 후 신호만 Modem IC로 전송하게 된다. 이 신호는 Modem IC에서 복조되어 디지털신호로 바뀌게 되고 Modem IC의 Clock과 동기 되어 MCU로 전달된다. MCU에서는 Hamming & PN Coding 된 신호를 Decoding하여 실질적인 Data를 얻는다. 이와 반대로 MCU에서 신호를 송신할 때는 Data를 Hamming & PN Coding을 하여서 Modem IC의 Clock과 동기 되어 Modem으로 전송한다. 이 신호는 Modem IC에서 FSK되고 내부에 있는 Power Op-Amp에서 증폭되어 전력선으로 전송하게 된다. 전력선에 나타나는 노이즈는 3가지 잡음 배경 잡음(Background Noise), 협대역 잡음(Narrowband Noise), 임펄스성 잡음(Impulsive Noise)의 합성으로 나타난다.[6] Coupling 회로와 Band-pass Filter를 통하여 노이즈를 차단하지만 신뢰성이 높은 통신시스템을 구현하는데 한계가 있다. 이로 인해 노이즈에 대한 영향을 감소시키고자 데이터에 PN Coding과 에러 정정 코드인 (7,4)Hamming Coding을 적용하였다.

3.2 PLC를 이용한 조광제어 시스템

PLC를 이용한 전자식 안경기의 조광제어 시스템을 그림8과 같이 구성하였다.

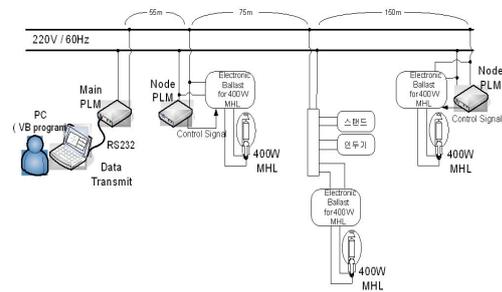


그림 8 PLC를 이용한 조광제어 시스템

Main Modem은 관리자가 중앙에서 제어할 수 있도록 시스템을 구축하였으며 컴퓨터를 이용해서 Modem으로 RS232통신을 이용하여 Data를 전송하도록 구성하였다. 부하는 메탈할라이드 램프 400W를 사용하였으며 Ballast는 본 논문에서 제시한 구조의 전자식 안정기를 사용하였다. PLC를 이용한 전자식 안정기의 제어는 On/Off 제어는 물론 램프 Dimming 제어도 하고 있다.

3.3 패킷 전송 에러율 측정

400W 메탈할라이드 램프용 전자식 안정기는 주로 가로등이나 운동경기장, 골프장 등에 사용되고 있다. 따라서 20~30m 간격으로 설치되어 있는 가로등에 적용할 목적으로 FSK Modem의 성능을 확인 해 보기 위해 다음과 같은 실험 환경을 구성하였다.

그림7 같이 Node Modem에 연결된 400W용 전자식 안정기 2개와 Modem과 연결되지 않은 전자식 안정기 1개로 구성되었다. 프로그램을 통한 제어 신호는 On, Dimming, Off 신호의 순서로 시행하였다.

실험 조건은 다음과 같다.

- 그림8과 같이 구성하여 실험
- 측정 장소는 강원대 공대1호관 307호
- 측정 시간은 오후 3시
- 전력선은 CV cable을 사용
- Main과 Node 1은 55m
Main과 Node 2는 280m
- 1초마다 송신, FSK 1packet = 4byte로 구성

부하	FSK (Error bits / Transmission bits)
400W MHL (전자식 안정기) Node1	0 / 100,000
400W MHL (전자식 안정기) Node2	12 / 100,000

표 2 Node 별 Error Bits

측정 결과 총 100,000회의 전송 중 12회의 에러가 발생하였다. 이 중 280m 거리에 있는 Node2에서 에러가 발생한 것을 볼 수 있다.

4. 실험결과

램프 출력 400W 부터 200W 까지 Dimming 실험을 한 결과는 다음과 같다. Dimming control 회로의 입력 PWM 신호의 duty는 0.2~0.6 까지 가변하였다.

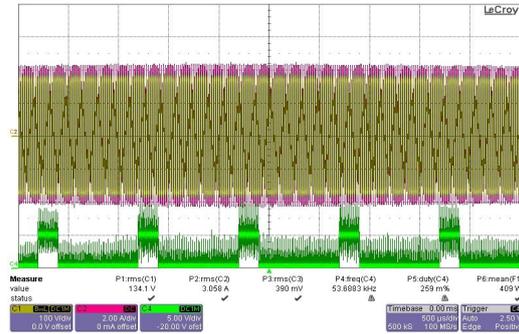


그림 9 램프 100% 출력 (PWM Duty 0.2)

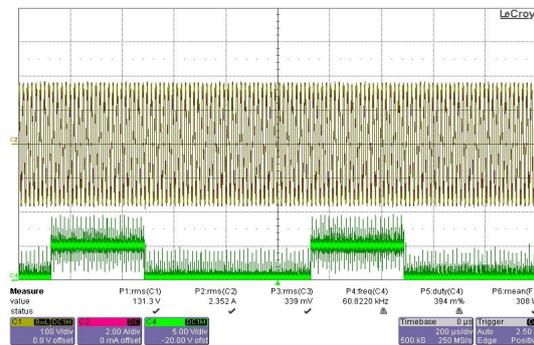


그림 10 램프 75% 출력 (PWM Duty 0.4)

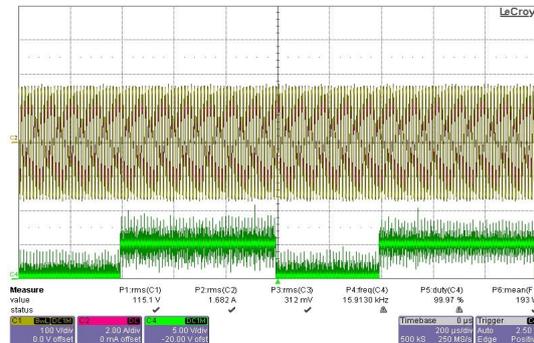


그림 11 램프 50% 출력 (PWM Duty 0.6)

위의 실험결과 파형에서 볼 수 있듯이 Dimming 회로의 PWM Duty가 변화함에 따라 램프의 전력이 변화하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 안정기에서는 조광제어가 가능한 400W MHL용 전자식 안정기의 LCsCp의 값을 설계하였다. 또 에너지 절약을 위해 램프의 조도를 조절하기 위한

Dimming control 회로를 설계하여 400W MHL용 전자식 안정기에 적용하였다. 그리고 PLM과 전자식 안정기를 결합하여 시스템을 구성하였다. 이를 전력선통신을 이용해 시스템의 중앙제어가 가능토록 하였다. 이 시스템을 향후 각종 램프의 조도제어를 위해 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Hans Juergen Faehnrich, Erhard Rasch, "Electronic Ballasts for Metal Halide Lamps", *Journal of the Illuminating Engineering Society* 131-140, summer 1988.
- [2] S. T. Chen, L. L. Lee, "Optimized Design of The Electronic Ballast for Metal Halide Lamps", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE*, Vol 2, pp.991~996.
- [3] Fabio Toshiaki Wakabayashi, Carlos Alberto Canesin, "An Improved Design Procedure for LCC Resonant Filter of Dimmable Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps, Based on Lamp Model" *IEEE Transac.*, on Power Electronics, vol. 20, No. 5, pp. 1186-1196, Sep. 2005.
- [4] 박종연, 최원호, 임기승, 최현희. "가로등 제어를 위한 전력선 통신 프로토콜 설계", *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, CD pp.1994~1995, July 2007.
- [5] TEXASINSTRUMENT, SLVA001D Application note, 2003.
- [6] 정광현, 박종연, "전력선 통신을 이용한 MH 램프의 조광제어 시스템에 관한 연구", *대한전자공학회 전자공학회지* 논문, Vol.45, No.2, pp.83~91. 2008.