

논문 2017-54-4-14

DSP를 이용한 비용 절감형 메탈할라이드 램프용 전자식 안정기

(The Cost-effective Eletronic ballast for Metal halide Lamp using DSP)

한 상 수*

(Sang-Soo Han[Ⓢ])

요 약

고 휘도 방전 램프는 높은 광 효율이 요구되는 다양한 조명 환경에 많이 사용된다. 특히 메탈할라이드 램프용 조명 램프의 경우 램프 안정기의 크기는 매우 중요한 요소이며 작으면 작을수록 좋다. 메탈할라이드 램프용 전자식 안정기는 전자식 안정기에 비하여 에너지 효율과 크기 그리고 조명기의 무게 등의 측면에서 성능이 우수하다. 본 논문에서는 DSP를 이용하여 고 효율, 소형 및 경량화가 가능하고 비용이 절감되고 역률이 높은 전자식 안정기를 제시하였다. 제시한 전자식 안정기는 다이오드 정류기와 역률 보상 제어 부스트 컨버터 그리고 하프 브릿지 인버터로 구성하였고 역률 보상 알고리즘과 안정기 제어 알고리즘은 TI사의 TMS320LF2406 CPU를 사용하여 구현하였고 실험을 통해 제시한 안정기의 유용성과 타당성을 검증하였다.

Abstract

High-intensity-discharge lamps are widely utilized in outdoor and indoor lighting circumstances that need high luminance. In lighting applications for MHD lamps, the size of the lamp ballast circuit is an important factor and should be as small as possible. The electronic ballast for MHD lamps is superior to the electromagnetic(EM) ballast in that it saves energy, and has smaller volume and lighter weight. In this paper, highly efficient cost-effective and small sized electronic ballast for Metal Halide Lamp with high power factor using Digital Signal Processor are proposed. The proposed electronic ballast for MHD lamps combines a boost PFC converter with a half-bridge inverter, the algorithms of the power factor correction and ballast control were implemented using the TI's TMS320LF2406 CPU. Experimental results validate the ballast is also useful and reasonably suggested.

Keywords : cost-effective electronic ballast, half-bridge inverter, boost PFC converter, Digital Signal Processor, MHD lamp

I. 서 론

고휘도 방전 램프는 수명이 길고 광 효율 및 휘도가 높으며 연색성이 좋아 쇼핑 물이나 빌딩, 공원, 체육시설과 같은 실내·외 조명에 많이 사용되고 있다^[1-2]. 이러한 HID 램프는 부성 저항으로 인하여 초기 시동용

* 평생회원, 가천대학교 에너지IT학과
(Department of Energy and Information Technology,
Gachon University)

Ⓢ Corresponding Author (E-mail : sshan@gachon.ac.kr)

Received ; November 10, 2016 Revised ; February 12, 2017

Accepted ; March 9, 2017

고 전압 발생을 위한 안정기가 필요하다. HID 램프용 안정기에는 전자기식과 전자식이 있다. 전자식 안정기는 전자기식 안정기에 비하여 에너지 효율이 우수하고 작고 경량이다. 조명의 경우 안정기 회로의 크기는 매우 중요한 요소이며 작으면 작을수록 좋다^[1-2]. 형광램프나 HID 램프는 아크 방전을 이용하여 점등 되므로 점등 시의 전류를 제어하기 위한 임피던스 회로, 즉 안정기가 필요-하다. 기존의 안정기의 임피던스 회로로서 저항, 쇼크 코일, 콘덴서를 이용한다. 저항을 안정기로 이용할 경우 광 출력의 변화가 심하고 저항의 열손실도 많아서 거의 이용할 수 없다. 쇼크 코일을 이용할 경우

는 역률 개선형 콘덴서를 전원 측에 넣는다. 안정기의 임피던스 회로로 콘덴서를 이용하면 콘덴서에 흐르는 전류 파형의 변형이 커서 펄스 상태로 밖에 전류가 흐르지 않기 때문에 광 출력이 불안정하다. 메탈 할라이드 램프가 조명의 사용자 만족 및 에너지 절약의 차원에서 극히 유용함에도 불구하고 실내용 광원으로 사용되기 힘든 이유가 위에서 언급한 기존의 기술적 한계 때문이다^[1]. 이러한 기술적 한계를 극복하기 위하여 현재는 램프 구동을 위한 전자식 안정기를 각계에서 연구 개발 하고 있다^[2~4]. 최근, 유럽 표준 IEC 1000-3-2 등과 같은 고조파에 대한 각종 국제 규제의 강화로 고조파 저감과 역률 보상 회로에 대한 관심이 증대 되고 있다. 특히 다이오드 정류기를 입력 단으로 사용하는 전력 변환 시스템의 경우 입력 전류의 고조파 발생으로 인한 효율 감소등 고조파에 의한 많은 문제가 발생한다. 따라서 저-중급(Low-Middle Power Range) 전력 변화 장치를 개발하는데 있어서는 단위 역률을 위한 역률 보상(PFC)회로의 채용이 보편화 되어 가고 있다^[5~7]. 본 논문에서는 DSP를 이용하여 고효율, 소형 및 경량화가 가능하고 개발 기간 단축 및 비용절감이 가능한 전자식 안정기를 구현하였다. 역률 보상 알고리즘과 안정기 제어 알고리즘은 TI사의 TMS320LF2406 CPU를 사용하였다.

II. 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기

그림 1은 PFC 부스트 컨버터와 반 브릿지 인버터로 구성된 메탈할라이드 램프용 전자식 안정기를 나타낸다.

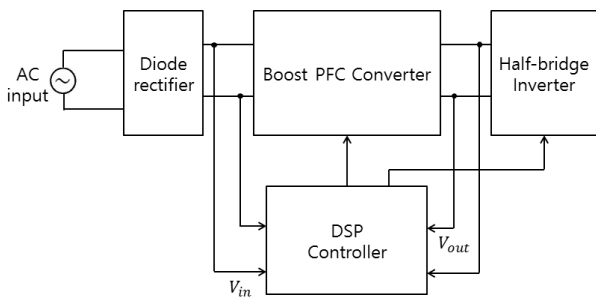


그림 1. MHD 램프용 전자식 안정기 블록도
Fig. 1. The block diagram of electronic ballast for MHD lamp.

1. 평균 전도형 PFC 승압형 컨버터

저항부하를 갖는 다이오드 정류기의 역률은 0.9 정도 이고 리액티브 부하의 경우는 그보다 작은 역률을 갖는다. 그림 2는 정류기의 입력 전압과 전류의 위상을 동 위상

으로 제어함으로써 입력 역률을 1로 제어하기 위한 평균 전도형 PFC 승압형 컨버터이다.

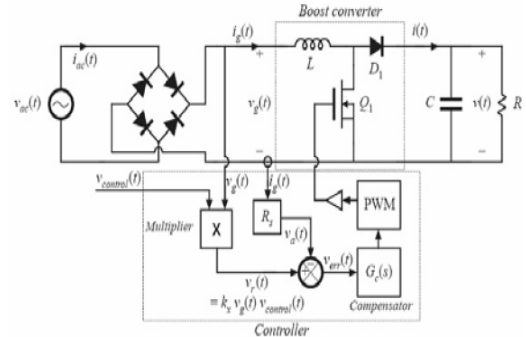


그림 2. 평균 전도형 PFC 승압형 컨버터
Fig. 2. Average conduction mode PFC boost converter.

입력 정류기의 전압을 제어하기 위한 $V_{control}(t)$ 를 다이오드 정류 전압과 곱한 기준 전압과 직류 링크 전류 $i_g(t)$ 를 저항 R_s 값으로 측정된 귀환 전압 $V_a(t)$ 를 서로 비교한 제어의 오차 전압에 따라 PWM 발생기에 의해 PWM파형을 발생한다. 만약 $V_{err} > 0$ 인 경우 PWM 펄스의 듀티 사이클을 50% 이상으로하고 $V_{err} = 0$ 이면 50%, $V_{err} < 0$ 이면 50% 이하로 스위칭 펄스를 발생시켜 부스트 컨버터의 스위치인 Q1을 on-off 시킨다. PFC 전류 제어방식에는 크게 임계 전도형과 평균 전도형이 많이 사용된다. 임계 전도형의 경우 출력이 클 경우 전류의 피크 값이 매우 커져 인덕터 L과 스위치 등에 대한 설계상의 어려움이 존재한다. 이러한 문제점은 평균 전도형 전류 제어 방식을 이용하여 개선할 수 있다. 그림 3은 임계 전도형 PFC 전류 제어 방식과 평균 전도형 PFC 전류 제어 방식의 전류 파형이다^[6].

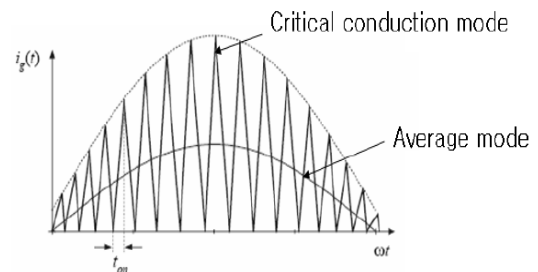


그림 3. PFC 회로의 제어에 따른 전류 파형
Fig. 3. The current waveform with control mode of PFC circuit.

2. 하프 브리지 직렬공진 인버터

그림 4는 전압형 하프 브리지 직렬공진 인버터의 구조이다.

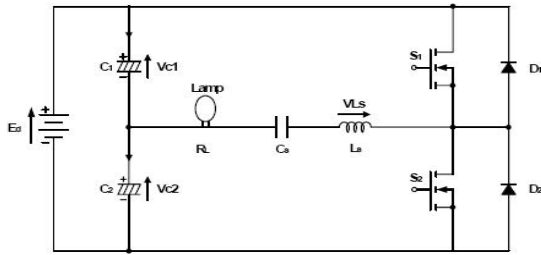


그림 4. 하프 브리지 직렬공진 인버터
Fig. 4. half-bridge series resonant inverter.

전자식 안정기는 방전 램프의 시동 시 시동에 필요한 큰 개방 회로 전압과 시동 후 정상상태 시 필요한 전압을 제공해야 한다. 직렬 공진 인버터는 부하 의존 특성으로 인해 전자식 안정기에 이용된다. 그림 5는 전자식 안정기의 직렬 공진 인버터 등가회로이다^[1~2].

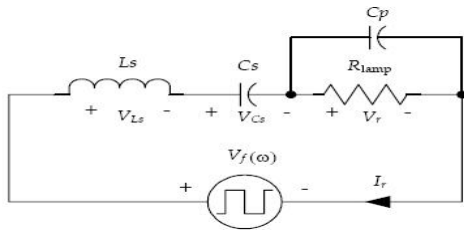


그림 5. 전자식 안정기의 직렬 공진 인버터 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of series resonant inverter of electronic ballast.

고주파로 구동되는 메탈할라이드 램프는 전압과 전류가 동상으로 나타나기 때문에 저항만으로 모델링 할 수 있다. 그리고 하프 브리지 인버터의 구형과 출력 V_f 는 식 (1)과 같다^[1].

$$V_f = \frac{2V_{DC}}{\pi}(\sin\omega t + 1/3\sin3\omega t + \dots) \quad (1)$$

식 (1)에서 공진회로에 영향을 주는 기본파의 실효값 V_o 는 식 (2)와 같다^[1].

$$V_o = \sqrt{2} \frac{V_{DC}}{\pi} \quad (2)$$

초기 시동 상태에서 공진회로는 램프의 저항 R_{Lamp} 는 매우 크고 시동을 위한 고전압 펄스를 발생시키기 위하여 $C_s \gg C_p$ 이다.

시동 후 직렬 공진 인버터는 정상상태로 동작하기 때문에 인버터의 구형과 출력은 식 (2)와 같은 기본파의 실효값 성분만 영향을 준다. 여기서 기본파 성분만 갖는 직렬 공진 인버터의 등가회로는 그림 6과 같다^[1,4].

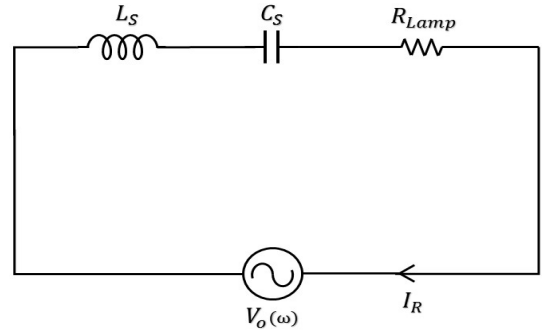


그림 6. 기본파 성분만 갖는 직렬 공진 인버터의 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit of series resonant inverter with only fundamental frequency voltage.

인버터 인가전압의 기본주파수 ω 에 대한 공진회로 부하에 흐르는 전류 I_r 의 실효치는 식 (3)과 같다^[1].

$$I_r = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_o \sqrt{\left(\frac{R_{Lamp}}{Z_o}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2}} \quad (3)$$

여기서, $Z_o = \sqrt{L_r/C_r}$, $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ 이다.

시동 시 최적 시동전류는 정격전류 I_n 의 1.2배가 요구되며 방전램프의 임피던스는 최소 저항 R_{min} 을 갖는다. 따라서 초기 시동 전류 I_2 는 초기 구동주파수 ω_2 에서 식 (4)를 만족해야한다^[1].

$$I_2 = 1.2I_n = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_o \sqrt{\left(\frac{R_{min}}{Z_o}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2}} \quad (4)$$

정상상태 램프저항은 R_{max} 이고 램프전류 I_1 은 식 (5)와 같고 구동주파수 ω_1 에서 정격전류 I_n 과 같다^[1].

$$I_1 = \frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_o \sqrt{\left(\frac{R_{max}}{Z_o}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2}} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서 부하의 변동을 인버터 구동주파수 변경으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 램프의 시동 시 램프저항은 R_{min} 로 작고 출력전류는 I_2 이므로 동작점은 높은 주파수 ω_2 에서 형성되고 정상상태 동작 시 램프저항은 R_{max} 로 커지고 출력전류는 I_1 이므로 동작점은 낮은 주파수 ω_1 에서 형성된다. 정상상태 시 구동주파수 ω_1 과 양호도 Q_1 은 식 (6)과 같다^[1].

$$\omega_1 = \omega_o \frac{Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + 4}}{2}$$

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2} V_{DC}}{\pi Z_o I_n}\right)^2 - \left(\frac{R_{max}}{Z_o}\right)^2} \quad (6)$$

램프 시동 시 구동주파수 ω_2 와 양호도 Q_2 는 식 (7)과 같다^[1].

$$\omega_2 = \frac{Q_2 + \sqrt{Q_2^2 + 4\omega_o^2}}{2}$$

$$Q_2 = \frac{\sqrt{2} V_{DC} \omega_o}{1.2\pi Z_o I_n} \quad (7)$$

III. 실험

그림 7은 DSP(TMS320LF2406)를 이용한 디지털 제어 시스템으로 역률 보상 회로와 전자식 안정기 회로를 구현한 메탈할라이드 전자식 안정기의 실제 구현모습이다. 표 1은 부스트 컨버터의 시스템 파라미터이다. 표 2는 입력 전압에 따른 역률이다. 입력이 커지면 역률이 약간 떨어지지만 전반적으로 역률은 94% 이상으로 제어됨을 알 수 있다. 그림 8은 시동 시 램프 시동 전압의 실제 측정된 파형을 보여준다. 점화 초기 램프 전압은 점차 커진 후 고 전압의 펄스가 인가됨을 알 수 있다. 그림 9는 시동 후 정상상태 시 램프 전압과 전류의 실제 측정 파형을 보여준다. 정상상태 시 전압과 전류의 변동 없이 일정한 전압과 전류가 공급되어 안정적으로 구동됨을 알 수 있다. 그림 10은 입력 전압에 대한 안정기 효율을 보여준다. 입력 전압이 250~300V로 증가함에 따라 안정기 효율이 94% 이상으로 향상됨을 알 수 있다. 여기서 효율은 입력전력에 대한 램프 출력의 비이다.

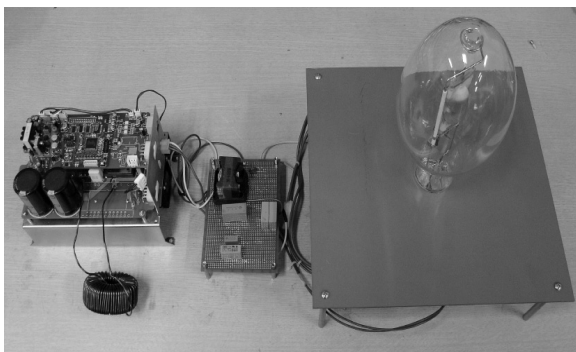


그림 7. DSP를 이용한 메탈할라이드 전자식 안정기 구현
Fig. 7. Implemented electronic ballast for MHD using DSP.

표 1. 시스템 파라미터 값

Table 1. System parameter values.

파라미터	값
입력 전압	110Vac
스위칭 주파수	32kHz
입력 인덕터	540uH
출력 커패시터	1640uF
출력 전압	300V

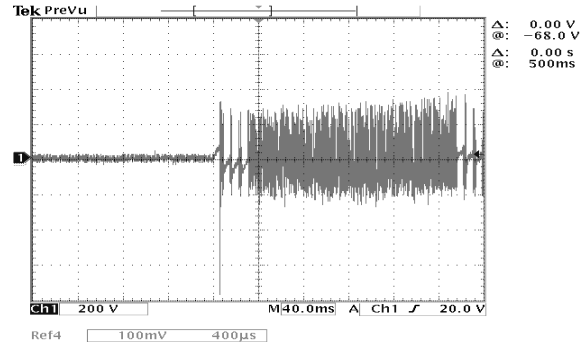


그림 8. 시동상태 시 측정된 시동전압(전압: 200V/div.)
Fig. 8. Measured start voltage waveform at start-up.

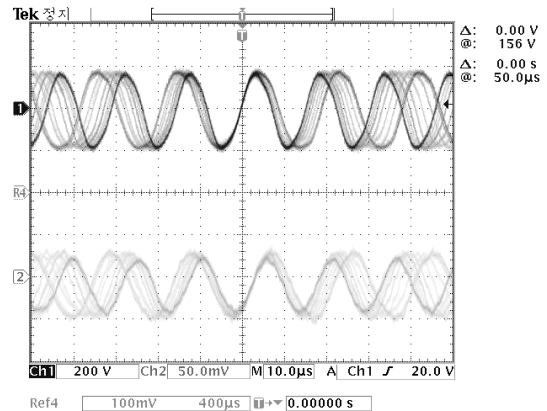


그림 9. 정상상태 시 측정된 출력 전압과 전류파형
(전압: 200V/div., 전류: 5A/div.)

Fig. 9. Measured waveform of the output voltage and current at the steady-state.

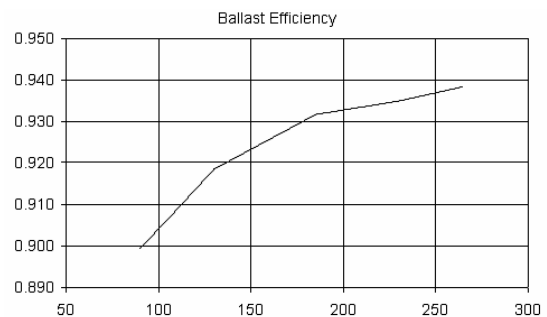


그림 10. 제시한 전자식 안정기의 효율

Fig. 10. Efficiency of the proposed electronic ballast.

표 2. 부스트 컨버터의 입력전압과 역률

Table2. Input voltage and power factor of the boost converter.

$V_{in(rms)}$ (V)	Power Factor
115	0.994
230	0.940

IV. 결 론

본 논문에서는 단일 CPU를 이용하여 역률 보상 회로와 전자식 안정기 시스템을 구현하였다. 기존의 시스템에서는 반도체 메이커에서 제조, 판매하는 전용의 Analog IC를 이용하여 역률 보상 회로와 전자식 안정기 회로를 각각 구현하는 경우가 대부분이었으나 본 논문의 시스템에서는 하나의 DSP(TMS320LF2406)를 이용한 디지털 제어 시스템으로 역률 보상 회로와 전자식 안정기 회로를 통합하여 구현함으로써 경량화 및 비용 절감이 가능하다. 또한 실험결과 제시한 전자식 안정기는 94% 이상의 고 역률과 고 효율을 가지고 안정적으로 동작됨을 알 수 있다.

REFERENCES

- [1] M. Sugiura, "Review of metal-halide discharge-lamp development 1980-1992," IEE Proceedings -A, Vol. 140, No. 6, Nov. 1993, pp. 443-449
- [2] B. Cook, "New developments and future trends in high-efficiency lighting," Engineering Science and Education Journal, Vol. 9, Oct. 2000, pp. 207-217
- [3] S. Ben-Yaakov, M. Gulko and A. Giter, "The simplest electronic ballast for HID lamps," in Proc. IEEE APEC'96, pp. 634-640
- [4] M. Shen, Z. Qian and F. Z. Peng, "A novel two-stage acoustic resonance free electronic ballast for HID lamps," Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 2002, pp. 1869-1874
- [5] C. S. Moo, S. Y. Tang, W. T. Tsai and H. L. Cheng, "Acceleration scenarios of metal halide lamps," IEEE. Trans. Plasma Science, vol. 36, no. 4, Aug. 2008, pp. 1907-1912
- [6] T. J. Liang, C. M. Huang and J. F. Chen, "Two-stage High Power-Factor Electronic Ballast for Metal-Halide Lamps," IEEE. Trans. Power Electron, vol. 24, no. 12, Dec. 2009, pp. 2959-2966
- [7] C. A. Chen and C. W. Ku, "A Novel Single-Stage Cost-Effective Electronic Ballst for HID Lamps with High Power Factor," 8th Int. Conf. on Power Elec.-ECCE Asia, May 2011, pp. 795-802

저 자 소 개



한 상 수(평생회원)

1985년 명지대학교 대학원 전자공학과 공학석사

1995년 홍익대학교 대학원 전자공학과 공학박사

1989년~현재 가천대학교 에너지 IT학과 교수

<주관심분야: 지능 및 퍼지제어, 전력전자제어, 로봇시스템제어, 임베디드하드웨어 설계>