

자동차 헤드라이트용 고압 방전등 안정기 시스템의 모델링 및 제어기 설계

論 文
49B-8-6

Modeling and Controller Design of an Automotive HID Lamp Ballast

李仁揆*·崔城振*·李圭燦*·趙普衡**
(In-Kyu Lee · Sung-Jin Choi · Kyu-Chan Lee · Bo-Hyung Cho)

Abstract - This paper presents design and analysis of an HID lamp ballast for a fast turn on characteristics and stable operation. It produces a high open circuit voltage for the ignition and it is controlled to supply effectively the power required to shorten the warm-up period after the breakdown. The lamp modeling by empirical data is presented. It is very effective in the designing of the control loop in the steady-state operating region. A stable operation of the lamp power regulation in the steady state is achieved, which is crucial for the long life time and constant light output. Stability analysis of the system is performed and the results are verified through various simulation results and the hardware experiments.

Key Words : High Intensity Discharge(HID) Lamp, Metal Halide Discharge(MHD) Lamp

1. 서 론

고압방전등은 기존의 할로겐 램프에 비해 밝기 및 광효율이 우수하고 수명이 긴 장점을 가지고 있다. 그러나 램프의 점등에 있어서 방전관 내부의 온도 및 압력이 광범위하게 변화하는 특성을 보인다. 초기 기동(cold start) 후 램프의 내부 온도 및 압력을 적정 수준으로 높여 정상상태에 이르는 데 상당히 긴 시간이 소요되는 단점을 가지는데, 보통의 방전등은 평균 2~6분 정도 소요된다. 또한 소등 후 재점등(hot start)할 경우, 내부의 높은 온도 및 압력으로 인하여 높은 점화(ignition)용 전압(25kV 정도)이 요구된다. 이를 피하기 위해서는 약 10분 이상의 냉각시간이 요구된다. 따라서 현재까지 고압 방전등은 점등 및 소등이 빈번하지 않은 옥외조명등과 같은 응용에 많이 사용되었다.

위와 같은 특성을 갖는 고압 방전등에는 램프 내부에 봉입되는 물질의 조성에 따라 수은 램프, 나트륨 램프 및 메탈 할라이드 램프(Metal Halide Discharge, MHD Lamp)등으로 분류되며, 이중 메탈할라이드 램프는 지향성 및 연색성이 좋아 고품질의 조명이 필요한 옥내등으로 사용되었고, 최근에는 고급 승용차를 중심으로 한 자동차 헤드라이트용 램프로 사용되기에 이르렀다. 이에 따라 자동차 헤드라이트로서의 기본 요구 성능인 빠른 점등 및 재점등 특성과 정상상태에서의 안정된 광출력 특성이 중요시되고 있으며, 이를 위한 안정기의 설계가 필요하게 되었다.

이와 같은 이유로 안정기는 점등시에 고압의 점화 펄스

(Philips D2S-35W의 경우 cold start시 2kV, hot start시 25kV), 점화 후 방전 상태의 전기를 위한 적절한 개방회로 전압 및 순시 전류 공급(take-over current)과 초기 점등시 빠른 점등을 위한 적절한 전력제어가 필요하다. 또한 정상 상태에서 긴 수명 및 안정된 광출력을 위해 램프에 공급되는 전력은 일정하여야 한다. 반면 램프의 양단 전압은 개별 품에 따라 편차가 심하고(정격전압 : $85 \pm 17V$) 램프 동작시간의 경과에 따라 상승하는 경향이 있어 램프 전력 제어 및 제어기 설계에 어려움을 더한다. 따라서 빠른 점등 특성과 안정된 동작 특성을 갖는 최적의 안정기를 설계하기 위해 다음 사항을 연구하여 그 방법을 제시하였다.

- 1) 점화시 개방회로 전압 및 순시 전류 공급(take-over current)회로 설계 및 과도 상태에서 점등시간 단축을 위한 전력 제어 방법.
- 2) 정상상태에서의 안정기 설계에 가용한 램프 및 안정기의 모델링.
- 3) 램프의 부하 특성을 고려한 제어기 설계 및 안정도 해석

2. 본 론

2.1 안정기 시스템 구성

2.1.1. MHD 램프 동작특성

1) 점등특성

방전등의 동작단계는 그림 1과 같이 방전이 시작되는 점화(breakdown)구간, 이온 충돌에 의한 글로우 방전(glow discharge)구간 및 열전자 방출에 의한 아크 방전(arc discharge)구간으로 크게 분류될 수 있다[1].

* 正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 1月 25日

最終完了 : 2000年 7月 5日

램프의 전극 양단에 내부의 기체 절연 상태를 깨는 초기 방전전압을 인가하면, 마침내 방전이 개시(breakdown)된다. 이때 충분한 전류를 공급하면 방전현상이 음극 전극의 전체 부분에 고르게 나타나고 은은한 빛을 띄는 글로우 방전 단계(glow discharge phase)에 들어간다. 이 구간에서의 램프 전극 양단의 전압은 전류의 변화에 무관한 상태가 한동안 유지된다. 이 구간에서의 양단 전압은 비교적 수백 volt 정도로 높고 전류는 낮은 구간이다. 글로우 상태의 전류(glow current)는 이온 충돌에 의한 전류가 주를 이룬다. 글로우 방전상태가 오래 지속되면 램프수명이 단축된다는 사실이 보고되고 있으며, 따라서 아크방전 단계로 빠른 이행이 필요하다[2]. 이에 대해 글로우 구간을 줄이기 위한 여러 가지 연구가 이루어져 왔다. 메탈할라이드램프의 경우 글로우 구간은 0.5초 이하로 매우 짧게 나타나고 있으며, 따라서 램프의 과도 상태 특성에서는 다음에 설명할 아크 방전 특성이 중요하다고 여겨진다.

이후 더욱 에너지가 공급되면 관내 이온화를 더욱 가속시키며, 음극을 가열시키기 시작한다. 음극의 온도가 어느 수준에 이르면, 음극은 열전자 방출 단계에 들어가며 비로소 밝은 빛을 띄는 아크 방전 단계(arc discharge phase)에 이른다. 이러한 아크 방전은 열전자 방출(thermionic emission)에 의한 방전으로써 밝은 빛을 내는 구간이며, 최종적으로 램프의 동작이 이루어지는 구간이다. 아크 방전 구간은 글로우 방전에 비해 전압은 낮아지고 전류는 커지는데, 메탈할라이드 램프의 경우, 글로우 방전에서 아크 방전으로의 천이 직후에 아크 전압은 순간적으로 15~40 volts 정도로 감소하며, 이후 온도 상승에 의해 내부 수은 증기압이 상승함에 따라 양단간 전압이 증가하고, 동작 전압까지 상승 후 수은이 완전히 증기화 되도록 설계된다. 정상상태에서는 증기화된 수은 양이온이 전류흐름의 주요 입자가 되는데, 이는 아크 방전시 수은 양이온의 평균 자유행정이 자유전자의 평균 자유행정 보다 길기 때문이다.

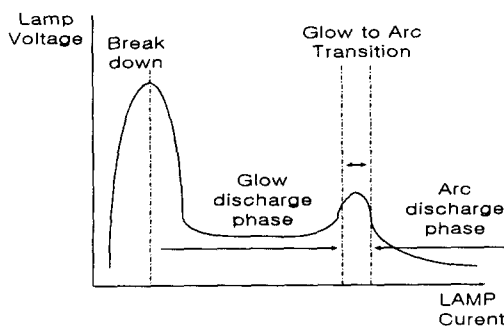


그림 1 방전 상태에 따른 램프의 전압,전류 관계
Fig. 1 Relation of lamp voltage and discharge current

2) 정상상태 동작특성

램프의 동작이 정상상태에 이르렀을 때, 가장 중요시되는 것은 음파적 공진(acoustic resonance)현상이다. 이 현상은 램프 동작시 램프 내부 기체의 압력 변화가 구동 전류 주파수로 인해 관내 벽에 대한 반사파와 정재파를 형성할 때 발생한다[3]. 정상상태에서 구동 회로에 가장 큰 영향을 주는

이 현상을 피하기 위한 대책으로 램프의 형상을 조정하는 방법 등 여러 가지 방법이 제안되었으나 구동회로 측면에서 보면 구동전류의 기본파 주파수와 밀접한 관련이 있다. 따라서 구동전류의 기본파 주파수 선택에 있어서 음파적 공진이 일어나는 주파수를 피하는 방법을 사용한다. 이중 가장 간단한 방법이 직류 구동이다. 그러나 직류 구동 시에는 램프의 양단 중 한쪽에서만 계속 전하를 방출하며, 지속적으로 사용 시 형광등의 흑화 현상과 같이 램프의 한쪽 면이 어둡게 되고, 방출하는 쪽이 소모되어 결국 램프의 수명을 단축하게 된다. 따라서 램프 구동은 교류전류가 이용되어야 한다. 소형 메탈할라이드 램프의 음파적 공진이 일어나는 주파수는 대략 20kHz~500kHz 정도로 알려져 있다. 따라서 이 영역을 피하기 위해서는 20kHz이하의 저주파 영역에서의 동작과 500kHz이상의 고주파영역에서의 동작으로 나눌 수 있다. 20kHz 이하에서 구동 시에는 가정주파수 대역이기 때문에 소음문제를 야기할 수 있다. 따라서 저주파 구동 시에는 수십~500Hz 정도의 아주 낮은 주파수를 사용할 수밖에 없다. 또한 500kHz 이상의 고주파구동도 최근 시도되고 있으나 이 경우 스위칭 손실의 증가를 억제하기 위한 soft switching 기법의 도입이 필요하다[4].

2.1.2 시스템 구성

자동차 헤드라이트에 메탈할라이드 램프를 적용하기 위해서는 짧은 초기 기동 시간이 매우 중요한데, ECE REG. NO.99에 의하면 cold start시 4초 이내에 정상상태 광출력의 80%에 도달 되도록 제한된다. 이것은 기동시 적절한 전력제어를 행함으로써 구현할 수 있다.

안정기의 시스템 구성도를 그림 2에 나타낸다. 자동차 축전지 전원 전압(12Vdc)으로부터 램프 전압(정상상태 약 85V)으로 승압시키기 위하여 플라이백 컨버터를 적용한다. 초기 점화시에 필요한 고압 발생기를 적용하며, 글로우 방전에서 아크 방전으로의 천이를 위해 순시 전류 공급 회로(Rch, Ct 및 Rdis)를 적용한다. 컨버터 출력에는 인버터가 연결되며, 이는 직류 구동에 의한 흑화 방지 및 음파적 공진 현상 방지를 위해 500Hz 구형파 전류로 램프를 구동한다.

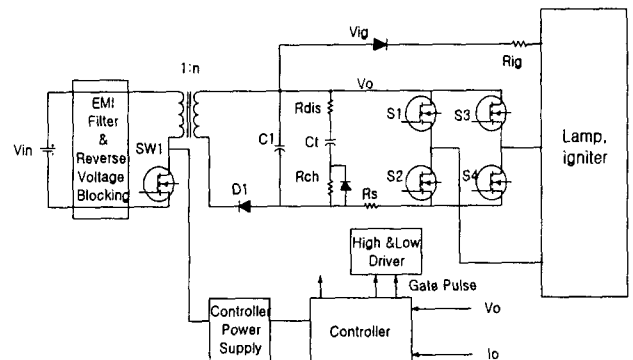


그림 2 MHD 시스템 구성도
Fig. 2 Automotive MHD lamp ballast system

2.1.3 안정기의 제어 메카니즘

점화 직후 순시 전류 공급 회로로부터 전류를 공급받은 램프는 글로우 방전상태에서 아크 방전상태로 천이된다. 이때 그림 3에 나타낸 바와 같이 램프에 적절한 양의 전력이 공급되면 램프는 warm-up 동작을 진행한다(구간 1). 이 동작구간에서 램프의 전압은 램프의 온도와 내부 압력에 의해 결정되는데, 서서히 증가되어 정상상태의 동작 전압에 도달한다. 램프 전압이 증가하는데 소요되는 시간은 과도상태에서 공급되는 전력에 의해 결정되며, 이에 따라 안정기로부터 최대 전력을 램프에 공급하는 것이 필요하다. 그림 4에 전류 기준치 발생기를 포함한 전압 제한 루프와 전류 제한 루프를 나타낸다.

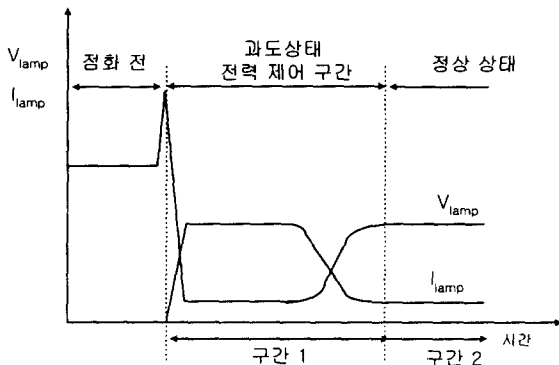


그림 3 cold start시 MHD 램프의 기동 특성
Fig. 3 Turn-on characteristics of MHD lamp(cold start)

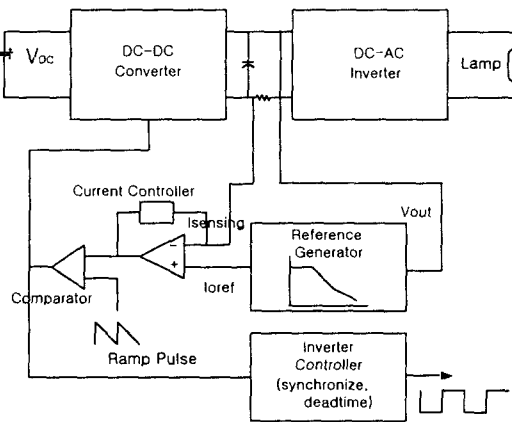


그림 4 안정기 시스템 제어기 구성
Fig. 4 Block diagram of ballast system controller

램프의 기동시간을 단축하기 위해 그림 5에 나타낸 램프 전압 대 램프 전류의 제어 특성을 이용하여 안정기는 과도상태에서는 최대 전력을, 정상상태에서는 정격 전력을 램프에 공급한다. 그림 3에 나타낸 것과 같이 warm-up 동작 기간 동안 램프의 전압은 낮게 떨어지므로 전류 기준치는 그림 5와 같이 높은 값으로 설정된다. 또한 검출된 출력 전류

는 오차 증폭기를 통해 전류 기준치와 비교되어 제어 전압을 생성한다. 이때 램프의 전압은 상승하며, 이에 따라 전류 기준치 발생기는 기준치의 크기를 감소시키는데, 이는 과도상태에서의 광출력의 overshoot 발생을 방지하기 위한 것이다.

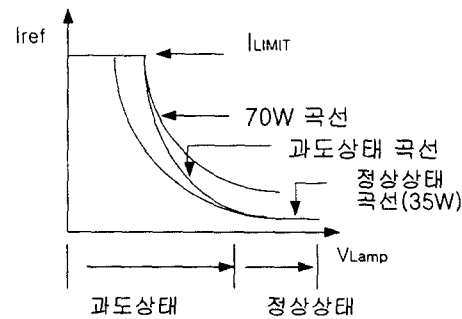


그림 5 기준전류 발생기의 동작 특성
Fig. 5 Characteristics of lamp current reference

2.2 램프 및 안정기 모델링

2.2.1 HID 램프의 주파수 영역 모델링

기존의 램프 모델들은 램프의 물리적 특성에 기초한 방식과 시간영역에서의 램프의 동작 특성에 기초한 방식들이 있는데, 이들은 안정기 시스템 설계에 대한 통찰력을 제공하기 어려운 점이 있다[6]~[12]. 램프의 복잡한 증분 소신호 임피던스 특성을 고려하고, 제어기의 설계 및 안정도 해석을 용이하게 하기 위하여 실험적 데이터를 이용한 주파수 영역에서 모델링을 행한다[13][14]. 램프의 증분 임피던스 특성을 그림 6에 나타내었다.

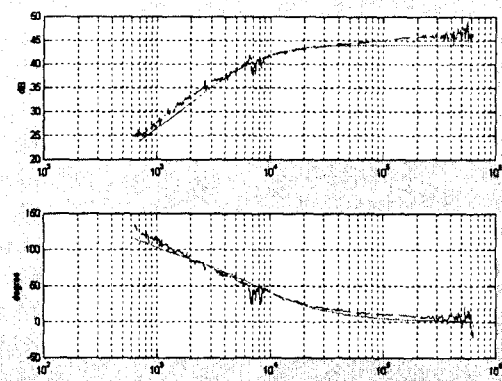


그림 6 MHD 램프 증분 임피던스 모델링
(점선:축정치, 실선:fitted곡선)
Fig. 6 Small-signal empirical data modeling of MHD lamp
(dot : measured, solid : fitted)

그림 6으로부터 얻은 데이터를 이용하여 복소 curve fitting 한 임피던스 특성은 식(1)과 같다.

$$Z_{LAMP}(s) = K \frac{1 + s/z}{1 + s/p} \quad (1)$$

$$K = -7.93, z = -372 \text{ rad/sec}, p = 8.08 \text{ krad/sec}$$

그림 6으로부터 소신호 증분 임피던스는 저주파에서 부성 저항 부하이고 고주파에서 저항 부하 특성을 보임을 알 수 있다.

2.2.2 안정기의 소신호 모델링

그림 7에 PWM 스위치 모델을 이용한 소신호 등가회로를 나타내었다[15]. 변압기 1차측의 회로는 2차측으로 반영되었으며, Rs는 출력전류 검출저항으로 사용된다. 출력전류 정보는 Rs로 검출된 후 오차증폭기로 입력되며, 출력전압 정보는 기준전류 발생기에 입력된다. 등가 회로에서 부하는 램프와 순시 전류 공급 회로 소자로 구성된다. 위의 등가회로의 블록도를 그림 8에 나타내었다. 블록도에서 안정기는 전류를 램프에 공급하고 램프로부터 전압을 되돌려 받는다. 따라서 안정기의 입력변수는 전원 전압과 부하 전압이 되며, 출력변수는 안정기 출력 전류가 된다.

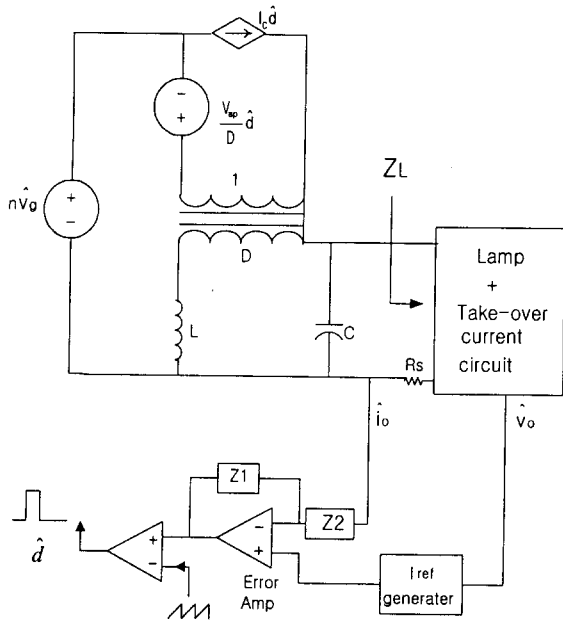


그림 7 안정기 시스템 소신호 등가회로
Fig. 7 Small-signal equivalent circuit of ballast

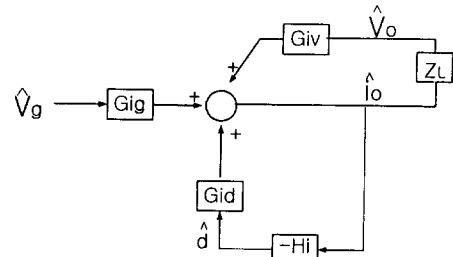


그림 8 안정기 시스템 블록도
Fig. 8 Block diagram of small-signal equivalent circuit

2.3 제어기 설계 및 안정도 해석

플라이백 컨버터는 제어-출력의 전달함수에 우반면 영점을 갖는 고유한 특성이 있으며, 이로 인해 제어 주파수 대역을 제한 받는다. 그림 9에 나타난 2극 1영점 보상기를 이용하여 컨버터의 공진 주파수와 우반면 영점 주파수 이하에서 보상기를 설계한다.

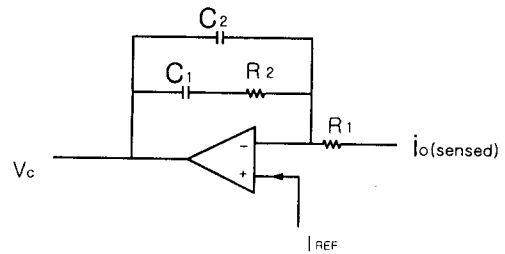


그림 9 2극 1영점 보상기
Fig. 9 Two pole one zero compensator

제어기 설계는 정상상태($V_{IN}=12V$, $P_{LAMP}=35W$ 및 $V_{LAMP}=85V$) 및 warm-up 구간중에서 최악 동작 상태인 $V_{IN}=8V$, $P_{LAMP,MAX}=105W$ 및 $V_{LAMP}=60V$ 에서 고려되었다. 정상상태에서 컨버터의 공진 주파수와 우반면 영점 주파수는 각각 34.4krad/sec 및 183krad/sec 이다. 정상상태에서 안정기의 제어 루프 이득은 아래의 식(2)와 같이 주어진다[16].

$$T = G_{id} \cdot H_i \quad (2)$$

$$G_{id} = \frac{\hat{i}_o}{\hat{d}} \Big|_{\hat{v}_g=0} = \frac{nV_g}{R_s D^2} \left(\frac{1}{1 + Y_o Z_L} \right) \left(\frac{1 - \frac{L I_o}{D n V_g} s}{1 + \frac{L}{R_s D^2} s + \frac{LC}{D^2} s^2} \right)$$

$$\text{위에서 } Y_o = \frac{1}{R_s} \frac{1 + \frac{LC}{D^2} s^2}{1 + \frac{L}{R_s D^2} s + \frac{LC}{D^2} s^2}$$

위에서 G_{id} 는 제어-출력전류 전달함수이고, H_i 는 루프 보

상기 이득이다. 그림 10에 제어-출력전류 전달함수의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸다. 보상기의 설계치는 $R1=330k\Omega$, $R2=510k\Omega$, $C1=0.68nF$ 및 $C2=0.68nF$ 이다.

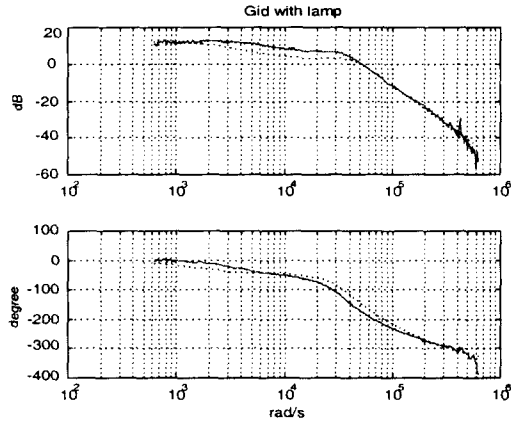


그림 10 제어-출력전류 전달함수
(점선:시뮬레이션, 실선:측정치)
Fig. 10 Duty ratio to output current transfer function (gid),
(dot : simulated , solid : measured)

2.4 실험 결과

35W MHD lamp를 사용한 자동차용 안정기를 실험 제작 하였다. 그림 2에 나타난 전원회로의 설계치는 $S1=IRF540 \times 2$; $L_{secondary}=640\mu H$; $C1=0.33\mu F$; $f_{sw}=180kHz$; $Duty=0.5$ 이다.

루프 이득 T의 시뮬레이션 결과를 그림 11에 나타내며, 이로부터 위상여유가 40° 이상으로 시스템이 안정됨을 알 수 있다. 또한 그림 12에 cold 램프 기동시의 램프 전압, 전류 및 광출력 특성을 나타낸다. 이로부터 제안된 전력제어에 의해 4초미만에 정상상태 광출력의 80%에 도달함을 알 수 있다.

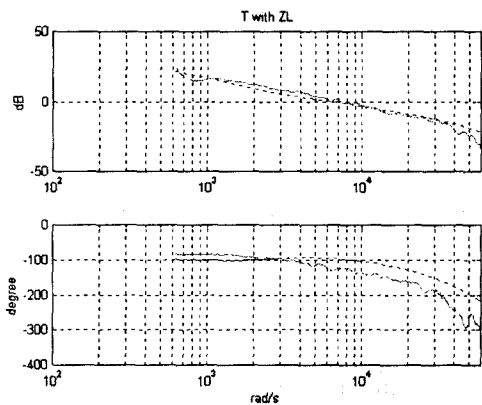


그림 11 페루프 이득 T
(점선:시뮬레이션, 실선:측정치)
Fig. 11 Closed loop gain
(dot : simulated , solid : measured)

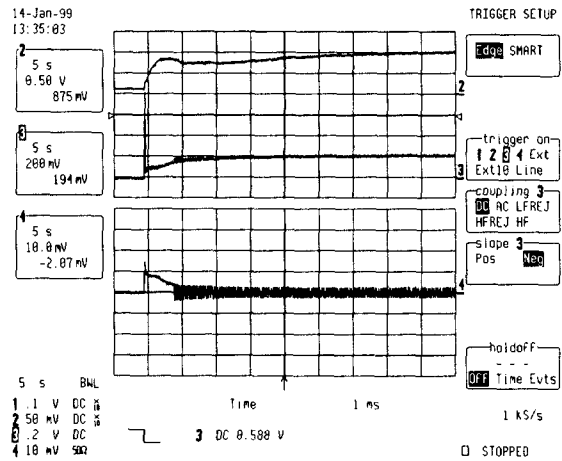


그림 12 Cold 램프 기동시의 램프 전압(CH3 100V/div), 전류 (CH4 1A/div) 및 광 출력(CH2) 특성
Fig. 12 Turn-on characteristics - lamp voltage(CH3 100V/div), current(CH4 1A/div) and light output(CH2)

3. 결 론

자동차 전조등에 응용할 수 메탈할라이드 고압 방전등의 안정기 시스템에 대한 모델링과 제어기 설계를 제시하였다. 시스템 모델링에서는 안정기 회로 모델링과 메탈할라이드 램프에 대한 모델링도 실시하였다. 램프 모델링은 램프의 주파수 영역에서 부하 임피던스로서의 램프의 증분 모델을 도출함으로써 안정기 설계 및 안정도 해석에 이용할 수 있게 하였다.

시스템 구성 및 제어기 설계에 있어서는 자동차 전조등으로서 요구되는 주요 사항, 즉 빠른 점등 특성과 안정된 광출력을 만족되도록 하였다. 이에는 축전지로부터 램프에 전력 공급을 위한 승압, 고압의 점화 펄스 전압 발생, 개방회로 전압 발생 및 순시 공급 전류 발생등이 포함되며, 특히 빠른 점등 특성을 얻기 위해 과도 상태 warm-up 시간을 단축할 수 있는 전력 제어를 제안하였다. 정상상태에서는 램프의 일정한 광출력을 얻기 위해 정전력 제어를 하였고, 램프 동작에 치명적인 acoustic resonance에 대비하였다. 또한 램프 모델링에서 도출된 램프 증분 임피던스 부하 모델을 이용하여 안정도 해석을 실시하였다.

도출된 램프 모델과 설계된 안정기 시스템의 성능 및 안정도를 평가하기 위해 시뮬레이션을 실시하였으며, 실제로 hardware를 제작하여 실험을 통해 검증하였다. 실험 결과 안정도는 약 40°의 위상 여유를 가지며, 점등 시간은 약 4초로 요구성능에 만족됨을 보여준다.

참 고 문 헌

[1] W. Elenbaas, Light Sources, Philips Technical Library, Macmillan Press Ltd., 1972
[2] J. F. Waymouth, " The Glow to Thermionic Arc

Transition," J. IES, Summer, 1987, pp.166-180

[3] H-J. Faehnrich and E. Rasch "Electronic Ballasts for Metal Halide Lamps", Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.131-140, Summer, 1989

[4] M. Gulko and S. Ben-Yaakov, "A MHz Electronic Ballast for Automotive-Type HID Lamps ", PESC-97, pp.39-45, June 1997

[5] E. Rasch and E. Statnic "Behavior of Metal Halide Lamps with Conventional and Electric Ballasts", Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.88-96, Summer, 1991

[6] P. H. Herrick, "Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps," IEEE Trans. IA, Vol.IA-16,No.5, Sep./Oct., 1980

[7] C. S. Moo, Y. C. Chuang, Y. H. Huang, H. N. Chen, "Modeling of Fluorescent Lamps for dimmable electronic ballasts," IEEE IAS Conf. Rec.,1996, pp.2231-2236

[8] T. F. Wu, J. C. Hung, T. H. Yu, "A PSpice Model for Fluorescent Lamps Operated at High Frequencies," IEEE APEC Conf. Rec.,1995,pp. 359-364

[9] U Mader, P. Horn, "A Dynamic Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps," IEEE IAS Conf. Rec.,1992,pp.1928-1934

[10] N. Sun, B. Hesterman, "PSpice High Frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model," IEEE APEC Conf. Rec.,1996, pp. 641-647

[11] V. J. Francis, "Fundamentals of Discharge Tube Circuits", John Wiley & Sons, Inc., New York,N.Y.,1948

[12] E. L. Laskowski "A Model of a Mercury Arc Lamp's Terminal V-I Behavior," IEEE Trans. IA, Vol. IA-17,No.4, Jul./Aug.,1981

[13] E. Deng, "Negative Incremental Impedance and Stability of Fluorescent Lamps", IEEE APEC97, pp. 1050-1056

[14] C. Sanathanan, "Transfer Function Synthesis as a Ratio of Two Polynomials", IEEE Trans. on Auto. Control, Jan. 1963, pp. 56-58

[15] V. Vorperian, "Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch Part 1: Continuous Conduction Mode" , IEEE Trans. Aerospace and Electronic systems, Vol. 26. No. 3, pp490-496, MAY 1990

[16] Bo H. Cho, Modeling and Analysis of Spacecraft Power Systems, Ph. D thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University,1985

저 자 소 개



이 인 규 (李仁揆)
 1966년 9월 3일생. 1990년 건국대 전자공학과 졸업. 1998년~현재 서울대 대학원 전기공학부 박사과정
 Tel : 880-1785, Fax : 878-1452
 E-mail : iklee@snu.ac.kr



이 규 찬 (李圭燦)
 1964년 6월 18일생. 1987년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~현재 효성중공업 기술연구소 책임연구원보. 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정
 Tel : 877-9141
 E-mail : lk@snu.ac.kr



최 성 진 (崔城振)
 1973년 2월 4일생. 1966년 서울대 공과대학 전기공학부 졸업. 1998년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 주 관심분야는 전력전자회로의 모델링 및 분석법
 Tel : 877-9141
 E-mail : zerotic@snu.ac.kr



조 보 형 (趙普衡)
 1952년 2월 11일생. Cal Tech(학사. 석사). Virginia Tech(공학박). 1980년~1982년 TRW 항공우주연구소. 1985년~1989년 Virginia Tech 조교수. 1989년~1995년 Virginia Tech 부교수. 1995년~현재 서울대 전기공학부 부교수
 Tel : 880-7260
 E-mail : bhcho@snu.ac.kr