

자동차 헤드라이트용 고압 방전등 안정기 시스템의 모델링 및 안정도 해석

이인규, 최성진, 이규찬, 조보형
서울대학교 전기공학부

Modeling and Stability Analysis of Automotive HID Lamp Ballast

In-Kyu Lee, Sung-Jin Choi, Kyu-Chan Lee, Bo. H. Cho
The School of Electrical Engineering
Seoul National University

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.

포에 공급되는 전력은 일정하여야 한다. 반면 램프의 양단 전압은 개별품에 따라 편차가 심하고(정격전압: $85 \pm 17V$) 램프 동작시간의 경과에 따라 상승하는 경향이 있어 램프 전력 제어 및 제어기 설계에 어려움을 더한다. 따라서 본 연구에서는 빠른 점등 특성과 안정된 동작 특성을 갖는 최적의 안정기를 설계하기 위한 요소로서 다음 사항에 중점을 둔다.

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

1.서론

자동차 헤드라이트 램프로써 효율성이 증대되고 있는 메탈할라이드 램프는 고효율, 긴수명, 우수한 지향성 및 밝기 특성을 갖는 HID(High Intensity Discharge) 램프이다. 그러나 메탈할라이드 램프는 기존의 할로젠 램프와 달리 점등 및 정상상태에서 매우 복잡한 특성을 지닌다. 점등시에는 고압의 점화 펄스(Philips D2S-35W의 경우 cold start시 2kV, hot start시 25kV)가 필요하며, 점화 후 방전 상태의 전이를 위해 적절한 개방회로 전압 및 순시 공급 전류(take-over current)가 요구된다. 초기 점등에 긴 시간이 요구되며, 빠른 점등을 위해서는 적절한 전력제어가 이루어져야 한다.

긴 수명 및 안정된 광출력을 위해 정상상태에서 램

2.안정기 시스템 구성

자동차 헤드라이트에 메탈할라이드 램프 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 1에 나타낸다. 자동차 축전지 전원 전압(12Vdc)으로부터 램프 전압(정상상태 약 85V)으로 승압 시키기 위하여 flyback 컨버터를 적용한다. 초기 점화시에 필요한 고압 발생기를 적용하며, take-over current 회로(Rch, Ct 및 Rdis)를 적용한다. 컨버터 출력에는 인버터가 연결되

며, 이는 직류 구동에 의한 흑화 방지 및 acoustic resonance 방지를 위해 400Hz 구형파 전류로 램프를 구동한다[1].

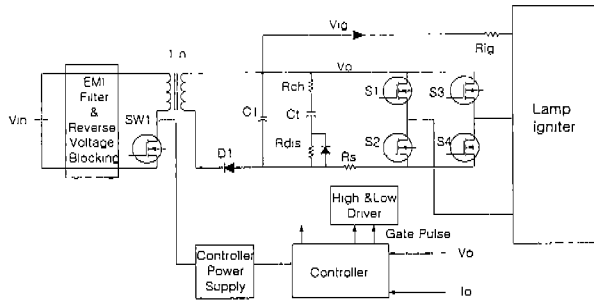


그림 1. MHD 시스템 구성도

초기 점등시 점등시간 단축과 정상상태에서의 정전력 제어를 위한 제어기 구성 및 이에 적용되는 기준 전류 특성을 그림 2에 나타낸다.

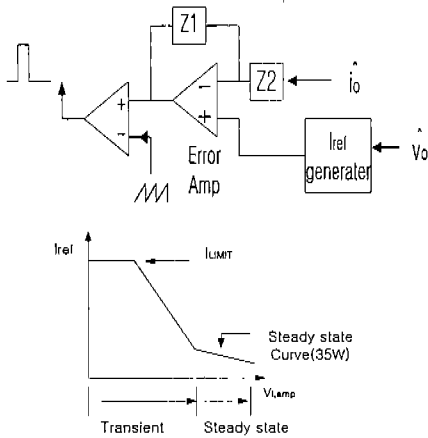


그림 2. 제어기 및 기준 전류 발생기의 입출력 특성

3. 램프 동작 특성 및 제어 메카니즘

점화 직후 take-over current 회로로부터 전류를 공급받은 램프는 glow 방전상태에서 arc 방전상태로 천이된다. 이때 램프에 적절한 양의 전력이 공급되면 램프는 warm-up 동작을 진행한다. 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 1에 전류 기준치 발생기를 포함한 전압 제환 루프와 전류 제환 루프를 나타낸다. 램프의 기동시간을 단축하기 위해 그림 2에 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 2와 같이 높은 값으로 설정된다. 또한 검출된 출력 전류는 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.

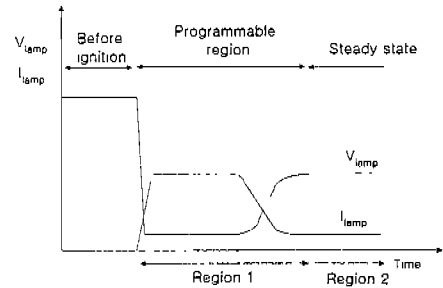


그림 3. cold start시 MHD 램프의 기동 특성

4. 정상상태 모델링

4-1 HID 램프의 주파수 영역 모델링

기존의 램프 모델들은 램프의 물리적 특성에 기초한 방식과 시간영역에서의 램프의 동작 특성에 기초한 방식들이 있는데, 이들은 안정기 사스럼 설계에 대한 통찰력을 제공하기 어려운 점이 있다[2]. 램프의 복잡한 증분 소신호 임피던스 특성을 고려하고, 제어기의 설계 및 안정도 해석을 용이하게 하기 위하여 실험적 데이터를 이용한 주파수 영역에서 모델링을 행한다 [3][4]. 램프의 소신호 특성을 그림 4에 나타내었다.

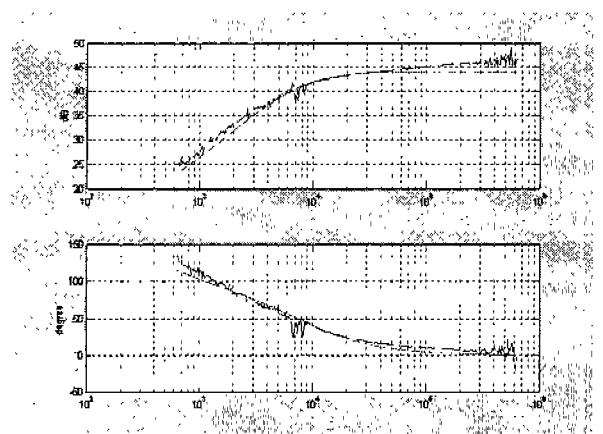


그림 4 MHD 램프 소신호 모델링 (점선:측정치, 실선:fitted곡선)

그림 4로부터 얻은 데이터를 이용하여 복소 curve fitting 한 임피던스 특성은 (1)과 같다.

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

$K = -7.93$, $z = -372 \text{ rad/sec}$, $p = 8.08 \text{ krad/sec}$
 주파수에 따른 임피던스의 궤적을 그려보면 그림 5와 같으며, 소신호 증분 임피던스는 저주파에서 부정저항부하이고 고주파에서 저항 부하 특성을 보인다.

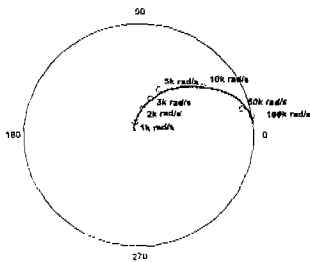


그림 5 램프 임피던스 궤적

4-2 안정기의 소신호 모델링

그림 6에 PWM 스위치 모델을 이용한 소신호 등가 회로를 나타내었다[4]. 트랜스포머 1차측의 회로는 2차측으로 반영되었으며, R_s 는 출력전류 검출저항으로 사용된다. 출력전류 정보는 R_s 를 검출된 후 오차증폭기로 입력되며 출력전압 정보는 기준전류 발생기에 입력된다. 등가 회로에서 부하는 램프와 take-over current 회로 소자로 구성된다. 위의 등가회로의 블록도를 그림 7에 나타내었다.

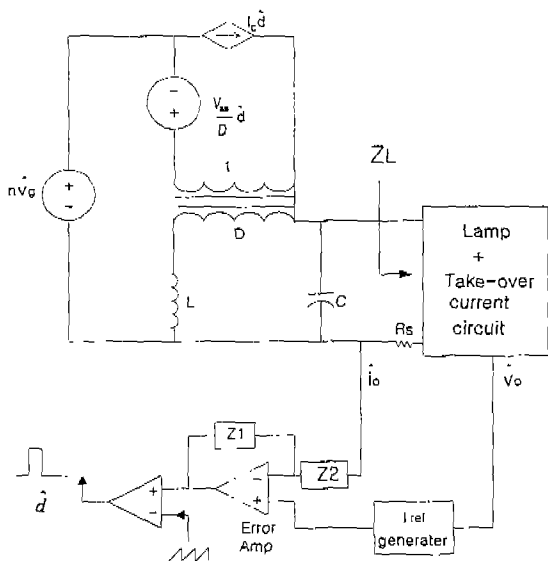


그림 6 안정기 시스템 소신호 등가회로

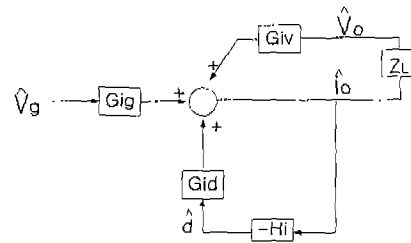


그림 7 안정기 시스템 블록도

블록도에서 안정기는 전류를 램프에 공급하고 램프로부터 전압을 되돌려 받는다. 따라서 안정기의 입력 변수는 전원 전압과 부하 전압이 되며, 출력 변수는 안정기 출력 전류가 된다.

5.제어기 설계 및 안정도 해석

Flyback 컨버터는 제어-출력의 전달함수에 우반면 영점을 갖는 고유한 특성이 있으며, 이로 인해 제어 주파수 대역을 제한 받는다. 그림 8에 나타낸 2극 1영점 보상기를 이용하여 컨버터의 공진 주파수와 우반면 영점 주파수 이하에서 보상기를 설계한다.

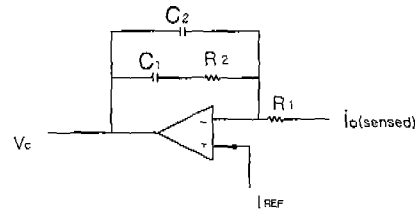


그림 8 2극 1영점 보상기

제어기 설계는 정상상태($V_{in}=12V$, $P_{LAMP}=35W$ 및 $V_{LAMP}=85V$) 및 warm-up 구간중에서 최악 동작 상태인 $V_{in}=8V$, $P_{LAMP}=105W$ 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 (2)와 같이 주어진다[6].

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

$$G_{id} = \left. \frac{i_o}{d} \right|_{v_g=0}$$

$$= \frac{nVg}{RsD^2} \left(\frac{1}{1 + Y_o Z_L} \right) \left(\frac{1 - \frac{LI_o}{DnVg}s}{1 + \frac{L}{RsD^2}s + \frac{LC}{D^2}s^2} \right)$$

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

위에서 G_{id} 는 제어-출력전류 전달함수이고, H_i 는 루프 보상기 이득이다. 그림 8에 Duty ratio-출력전류

전달함수의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸다.

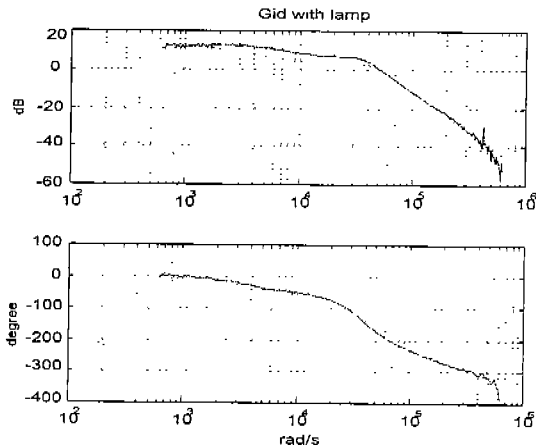


그림 9 Duty ratio-출력전류 전달함수
(점선:시뮬레이션, 실선:측정치)

보상기의 설계치는 $R1=330k\Omega$, $R2=510k\Omega$, $C1=0.68$ nF 및 $C2=0.68nF$ 이다. 루프 이득 T의 시뮬레이션 결과를 그림 10에 나타내며, 이로부터 위상여유가 40° 이상으로 시스템이 안정됨을 알 수 있다.

6. 실험 결과

35W MHD lamp를 사용한 자동차용 안정기를 실험 제작하였다. 그림1에 나타난 전원회로의 설계치는 $S1=IRF540 \times 2$; $L_{secondary}=640 \mu H$; $C1=0.33\mu F$; $f_{sw}=180kHz$; $Duty=0.5$ 이다.

그림 10에 페루프 이득 T를 나타내며, 그림 11에 cold 램프 기동시의 램프 전압, 전류 및 광출력 특성을 나타낸다. 이로부터 제안된 전력제어에 의해 4초 미만에 정상상태 광출력의 80%에 도달함을 알 수 있다.

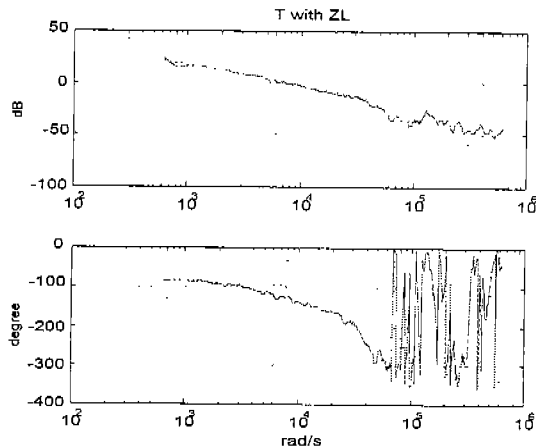


그림10 페루프 이득 T
(점선:시뮬레이션, 실선:측정치)

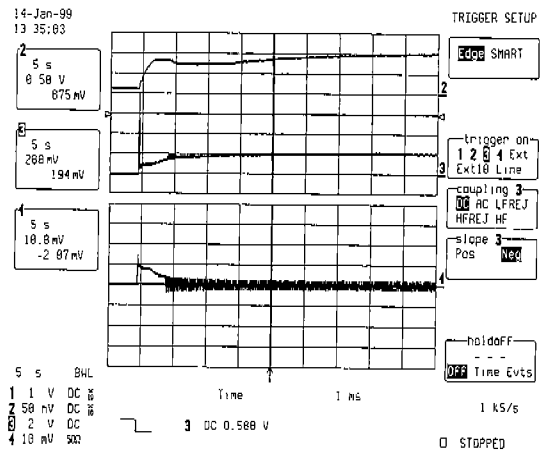


그림 11 cold 램프 기동시의 램프 전압(CH3 100V/div), 전류(CH4 1A/div) 및 광 출력(CH2) 특성

7. 결론

본 연구에서는 빠른 점등 특성과 안정된 동작특성을 갖는 HID 램프 안정기를 설계하고 분석하였다. 안정기는 초기 기동시 점화전 개방회로 전압을 발생하며, take-over 전류를 공급가능하고, warm-up 시간 단축을 위한 전력제어를 행한다. 램프의 모델링은 정상상태에서 제어기 설계에 유용하도록 실험적 데이터를 이용한 주파수 영역에서의 모델링을 하였다. 램프의 긴 수명과 안정된 광출력을 위하여 안정된 전력제어를 이룩하였다. 또한 여러 가지 시뮬레이션과 실험을 통해 안정도 해석 결과를 검증하였다.

참고문헌

- [1] H.J. Faehnrich and E. Rasch, "Electronic Ballasts For Metal Halide Lamps", Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.131-140, Summer,19882.
- [2] P.R.Herrick, "Mathematical Models for High-Intensity Discharge Lamps", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16, No.5, pp. 648-654, Sep./Oct.,1980
- [3] E.Deng, "Negative Incremental Impedance and Stability of Fluorescent Lamps", IEEE APEC97, pp. 1050-1056
- [4] C.Sanathanan, "Transfer Function Synthesis as a Ratio of Two Polynomials", IEEE Trans. on Auto. Control, Jan. 1963, pp. 56-58
- [5] 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
- [6] Bo H. Cho, "Modeling and Analysis of Spacecraft Power Systems", Ph. D thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University,1985
- [7] W. Eleabaas, "Light Sources", Philips Technical Library, Macmillan Press Ltd., 1972