

A Simplified Power Controller in Electronic Ballast of HID Lamp

이 성 희* · 김 태 원** · 박 태 준*** · 이 치 환†
 (Seung-Hee Lee · Tae-Won Kim · Tae-Jun Park · Chi-Hwan Lee)

Abstract - A simplified power control technique for electronic ballasts of HID lamps is proposed. This power calculator and controller consist of regular operational amplifiers with some passive elements and form simple add operation circuit. From a mathematical model of designed ballast with proposed power controller, the control performance and stability are analyzed by using Matlab and the results show that the stable starting characteristics and steady state characteristics of HID lamp are appropriately guaranteed. The experimental results of the prototype ballast coincide with the simulation results.

Key Words : Electronic ballast, HID lamp, Power controller, Adder

1. 서 론

소형화 및 고효율에 유리한 HID 램프용 전자식 안정기는 [1]-[5], 램프의 임피던스 변화 특성에 대한 대응과 전력 제어 성능 구현을 위해 공진회로가 채용되고 램프의 전력제어는 스위칭 주파수 제어가 적용된다[1][2]. HID 램프의 점등 초기 임피던스는 매우 낮으며 점등이 진행됨에 따라 임피던스가 점점 높아지는 특성을 가지므로[1]-[4], 점등 초기의 정격 전류 공급을 가능케 하기 위해서는 적절한 전력 제어가 이루어져야 한다[1]-[5]. 또한 사용 시간이 많이 경과한 노화 램프의 경우에는 평균 임피던스 이상으로 높아져 있으며 이 경우에는 보다 높은 전압을 공급할 수 있어야 한다[1]. 고주파 공진회로 채용 전자식 안정기에 의해 구동되는 HID 램프는 음향공명 발생 가능성도 가지는데, 음향 공명은 점등 아크의 불안정성, 색온도 변화, 광출력 변화 등을 유발시키므로, 전자식 안정기는 음향공명 발생 방지 대책을 강구해야 한다[1]-[5]. 이와 같이 성능과 기능을 가지는 전자식 안정기는 복잡한 구조가 될 수밖에 없고 신뢰성이 저하되고 가격이 높아지는 문제점을 가진다[5].

본 논문에서는 HID 램프용 전자식 안정기에 있어서 연산 증폭기만으로 구성되는 단순화 전력 제어기를 제안하고 시뮬레이션 결과 및 실험 결과를 통해 안정적인 동작 성능을 확인한다. 제안된 전력 제어기는 범용 연산증폭기와 몇 개의 수동 소자만 소요되며, 전력연산 및 제어는 가감산 회로로 통해 이루어지도록 구성되어 HID 램프의 안정적인 기동 특성이 구사된다. 시뮬레이션 및 실험

은 250W 메탈 할라이드 램프를 대상으로 행해졌으며, 두 결과가 일치하여 동작함을 확인한다.

2. 본 론

2.1 회로구성 및 해석

안정기가 HID 램프의 임피던스 변화에 대응되려면 안정기 내부의 제어기는 램프에 공급되는 전력을 제어하는 구조를 가져야 한다. 그림 1은 통상적으로 사용되는 공진형 인버터를 채용한 전자식 안정기의 블록도인데, 전압 및 전류를 감지하여 전력을 연산하여 제어하는 구조를 가진다[1]-[4]. HID 램프는 고주파 구동시 순수 저항 특성을 가지고 전류 제어에 의해서 전력제어 구현이 가능하다. 블록도에서 명령 값 P*는 인버터의 입력으로 전력제어기의 전력 지령값과 전압 및 전류 측정에 의해 계산되는 전력 제한값에 의해 계산된다. 공진형 인버터의 램프 전력 제어는 전력 명령값에 따른 스위칭 주파수 변화로 구사된다.

램프가 점등 후 일정 예열시간을 경과하여 정상상태에 도달하면 안정기는 램프에 정격 전력을 투입한다. 하지만 점등 직후의 램프 임피던스는 아주 낮다. 메탈 할라이드 램프의 경우에는 점등 초기 임피던스는 정상 임피던스의 20% 정도만 가지는 것으로 알려져 있다[1]-[4]. 만약 점등 초기에 정격 전력이 투입된다면 과전류가 흐르게 되고, 램프 또는 안정기의 파손을 유발하거나 램프의 사용 수명을 급격히 단축시키는 결과를 가져온다. 이러한 이유로 램프 안정기는 점등 초기에는 적절히 낮은 전력이 투입되어야 하며, 초기 전류 제어는 전력 제어의 한 방법이다[1][2].

그림 2는 통상적으로 전자식 안정기에 사용되는 직렬공진 인버터를 보여준다. 고주파 스위칭 구동 램프는 순수 저항으로 등가화되고 전압 및 전류는 동상을 이룬다[1]-[3][5].

반 브리지 인버터의 구형파 전압 V_f 는 식 1과 같고, 램프

* 정 회 원 : 포항산업과학연구원 기전자동화연구실
 ** 정 회 원 : 포항산업과학연구원 기전자동화연구실
 *** 정 회 원 : 포항산업과학연구원 기전자동화연구실
 † 교신저자, 정 회 원 : 위덕대학교 전자공학부 부교수
 E-mail : chlee@uiduk.ac.kr
 접수일자 : 2008년 12월 10일
 최종완료 : 2009년 4월 3일

의 RMS 전류 I_r 는 푸리에 시리즈 전개에 의해 기본파 성분을 취하면 식 2와 같이 재정리된다.

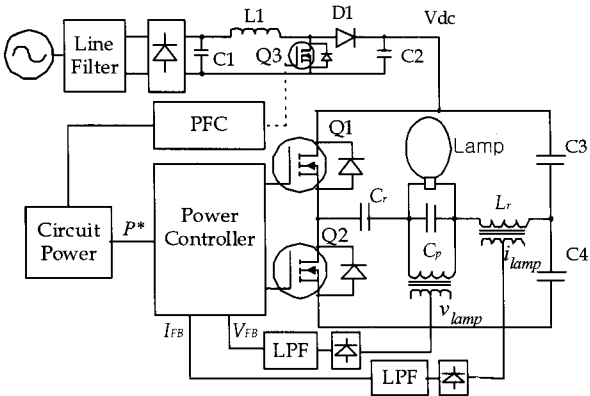


그림 1 전자식 안정기의 전력제어기 블록도
Fig. 1 The block diagram of power controller for electronic ballast.

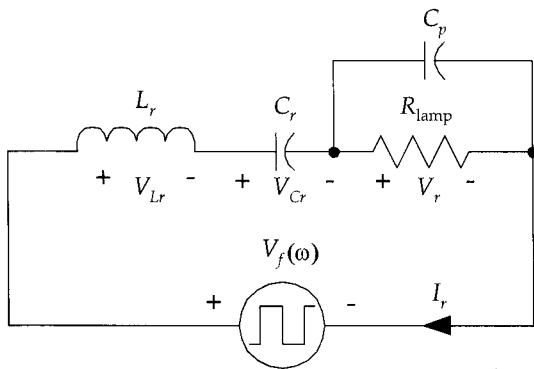


그림 2 전자식 안정기의 직렬 공진 인버터
Fig. 2 Series resonant inverter of electronic ballast.

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

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

램프 병렬 커패시터 C_p 는 공진 커패시터 C_r 에 비해 아주 낮은 값을 설정된다. 점화전 램프의 임피던스는 매우 높기 때문에 공진 커패시터 C_r 은 무시되고, 램프 병렬 커패시터 C_p 이 공진 인덕터 L_r 과 동작하여 $1/(2\pi\sqrt{L_r C_p})$ 의 주파수로 수 kV 이상의 높은 점등 전압을 생성시킨다. 램프가 점화된 후에는 램프 임피던스가 급격히 낮아져서 램프 병렬 커패시터가 무시되고 공진 커패시터 C_r 와 공진 인덕터 L_r 가 회로의 고유공진 주파수 $\omega_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_r C_r})$ 를 형성한다.

통상적으로 전자식 안정기의 운용 주파수는 공진 탱크의

고유 공진 주파수보다 높게 설정되며, 인버터의 출력 특성은 주파수에 대해 다음 수식과 같은 상수 $-K_{INV}$ 로 표현된다.

$$\frac{\Delta I}{\Delta \omega} = \frac{I_r(\omega_1) - I_r(\omega_2)}{\omega_1 - \omega_2} = -K_{INV} \quad (3)$$

공진 인버터의 스위치는 VCO(voltage controlled oscillator)에 의해 구동되며, VCO를 채용한 직렬 공진형 인버터의 전달함수는 다음과 같이 정리된다.

$$I_r = (-K_{INV} \cdot K_v)v + I_0 = -K_r v + I_0 \quad (4)$$

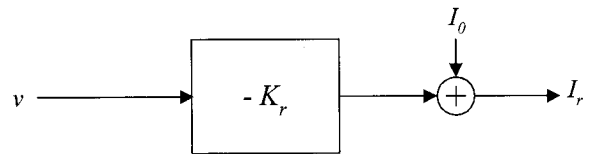


그림 3 주파수 제어 직렬 공진 인버터의 블록도
Fig. 3 The block diagram of frequency controlled series resonant inverter.

여기서 I_0 는 전류 오프셋이고, v 는 VCO의 입력 전압이다. 공진형 인버터를 식 4를 이용해 정리하면 그림 3과 같다.

2.2 제어기 설계 및 시뮬레이션

출력 전력은 전압 및 전류를 이용해 계산된다. 그림 4는 통상적인 직렬 공진 인버터를 채용한 전자식 안정기의 전력 제어 블록도를 나타낸다. 블록도에서 전달함수 (P_r/P^*)는 다음 시파 같이 정리된다.

$$I_r = (P^* - \frac{K_p}{1+T_f s} I_r^2 R_{lamp}) \frac{K_i K_r}{s} + I_0 \quad (5)$$

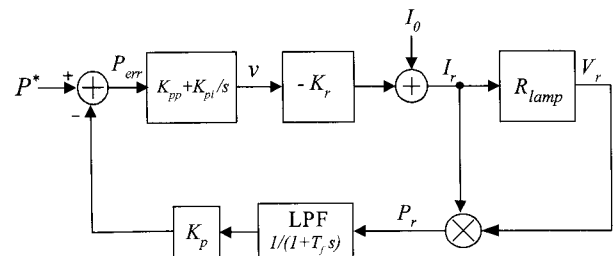


그림 4 곱셈기를 채용한 전자식 안정기의 전력제어 블록도
Fig. 4 The block diagram of general power controller for electronic ballast with product operation.

전자식 안정기 동작 시뮬레이션에서 전력 명령값 P^* 는 250[W]로, K_{pp} 와 K_{pi} 는 과잉응답이 적도록 설정되었고, 그 결과는 그림 5의 I-V 특성 그래프로 나타났다. 여기서

동작점의 변화는 램프 임피던스 변화에 따른 것이며, 램프 임피던스가 10[Ω]에서 100[Ω]까지 변하는 상황을 모의하였다. 그림의 점선은 곱셈기를 이용한 전력제어의 결과이고, 일점쇄선은 가산기를 이용한 전력제어 결과이다. 250[W] 램프의 경우 전상 동작 임피던스는 73[Ω]인데, 점등 직후 점등 초기 임피던스는 12[Ω] 정도로 낮다. 램프 임피던스가 51[Ω]보다 낮으면 과전류가 형성되므로 정격의 1.2배 정도에서 전류제한을 시킨다. 굵은 실선은 가산기를 이용한 전력제어에 있어서 전류 제한을 가한 결과이다.

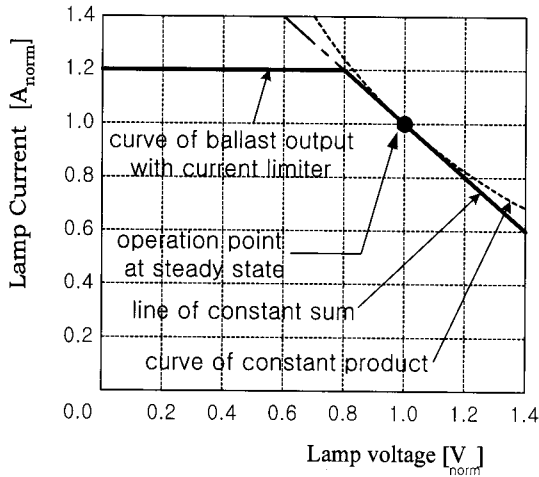


그림 5 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 I-V 특성
Fig. 5 I-Vcurve of electronic ballast for MH lamps.

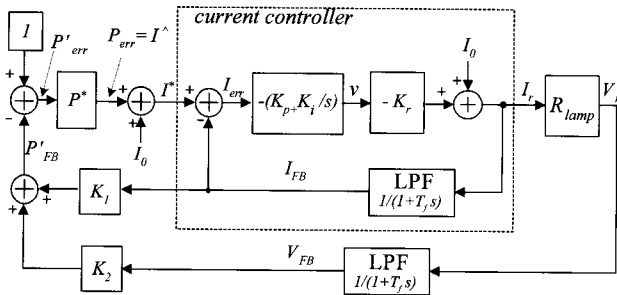


그림 6 가산기를 채용한 전자식 안정기의 전력제어 블록
Fig. 6 The control block diagram of power controller for electronic ballast with add operation.

본 논문에서는 전자식 안정기의 출력 전력제어가 그림 6에 도시된 바와 같이 가산기를 이용한 전력 연산이 사용된다. 그림에서 T_f 는 LPF의 지연시간이고, K_1 과 K_2 는 정격 전압 및 정격 전류를 각각 공칭값의 50%가 되도록 감쇄시킨다. 결국 케환된 전력값 P'_{FB} 는 전압값과 전류값의 평균값이 된다. 전력 명령값은 단위값이 되고 전력 오차 P_{err} 는 공칭 전력 오차 P'_{err} 에 정격 전력 상수 P^* 이 곱해짐으로서 얻어진다. 그림 6의 제어 블록도에는 내부에 전류제어 루프를 가지고 있으며 전류제어기는 공진 인버터를 포함한다.

제한된 전력제어기는 덧셈 연산에 의해서만 동작하기에, 단순한 구조에 저가격 회로로 구현된다. 그림 6의 블록도로부터 내부 전류제어기의 전달함수를 구하면 식 6이 되고, 극점은 식 7과 같이 구해진다.

$$\frac{I_r}{I_r^*} = \frac{K_r(K_p T_f s^2 (K_i K_f + K_p)s + K_i)}{T_f s^2 + (1 + K_r K_p)s + K_r K_i} \quad (6)$$

$$P_1, P_2 = -\frac{K_r K_p + 1}{2T_f} \pm \sqrt{\left(\frac{K_r K_p + 1}{2T_f}\right)^2 - \frac{K_r K_i}{T_f}} \quad (7)$$

안정된 동작을 위해 시스템의 대역폭은 LPF의 차단주파수보다 낮게 선택하는데, 식 7의 $K_p=0$ 으로 두고, 극점의 실수부는 LPF 대역의 반으로 설정하면 식 8과 같이 정리된다.

$$P_1, P_2 = -\frac{1}{2T_f} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2T_f}\right)^2 - \frac{K_r K_i}{T_f}}$$

$$z = -\frac{1}{T_f} \quad (8)$$

$$k_i > \frac{1}{4T_f K_r}, K_p = 0 \quad (9)$$

이는 전류제어기가 연산증폭기를 이용한 적분기로 구성됨을 의미하며, 그림 6의 블록도는 그림 7의 블록도로 단순화된다. 그림 7에서 P^* 는 1.0, K_c 는 0.75, K_v 는 0.25로 설정된다. 램프 전류 I_r 과 전력 명령값 P^* 의 관계는 식 10과 같이 정의되고, 상기 식의 극점과 영점은 식 11과 같이 얻어진다. LPF의 T_f 는 LPF의 지연 특성이며, K_r 은 공진형 인버터의 동작특성을 표현한다. 시뮬레이션에서 $T_f = .001$, $K_r = 2$, $K_c = 0.41$, $K_v = 0.0019$ 그리고 $K_i = 1000$ 으로 설정된다.

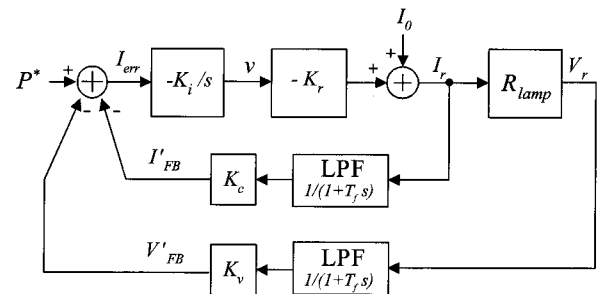


그림 7 설계된 전자식 안정기의 제어기 블록도
Fig. 7 The block diagram of controller for designed electronic ballast.

$$\frac{I_r}{P^*}(s) = \frac{K_r K_i T_f s + K_i K_r}{T_f s^2 + s + K_r K_i (K_c + K_v R_{lamp})} \quad (10)$$

$$P_1, P_2 = -\frac{1}{2T_f} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2T_f}\right)^2 - \frac{K_r K_i (K_c + K_v R_{lamp})}{T_f}}$$

$$z = -\frac{1}{T_f} \tag{11}$$

식 11에서 K_c 가 K_v 보다 커므로, 극점과 영점의 위치는 램프 임피던스 변환에 관계없이 고정되는데, 그림 8은 시스템의 근궤적도를 보여주며, 설계된 시스템이 전 영역에서 안정함을 확인할 수 있다.

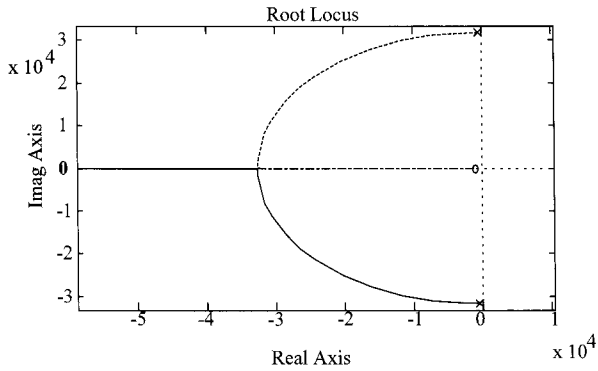


그림 8 설계된 전자식 안정기의 근궤적도
Fig. 8 Root-locus plot of designed electronic ballast.

그림 9는 통상적인 전력제어기와 제안된 전력제어기의 단위 응답 특성을 나타내었는데, 두 시스템 유사한 특성을 가지고 정상상태 오차는 없음을 알 수 있다. 그림 10은 램프 임피던스 R_{lamp} 의 증가에 따른 출력 전력 특성을, 그림 11은 R_{lamp} 의 증가에 따른 출력 전류 특성을, 그림 12는 R_{lamp} 의 증가에 따른 전압-전류 특성을 나타내었다. 각 그림의 실선이 제안된 제어기의 결과이고 점선은 통상적인 제어기의 결과인데, 일점쇄선은 통상적인 제어기에 전류 제한 기능을 부가시킨 결과이다. 제안된 제어기의 특성은 통상적인 전류제한 기능을 가진 제어기와 유사한 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

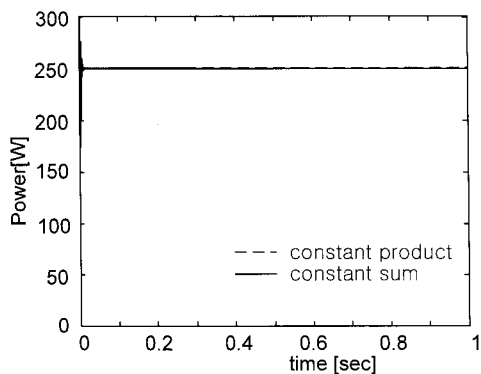


그림 9 일정 임피던스에서 단위 응답 특성 비교
Fig. 9 Comparison of step response of ballasts at constant impedance.

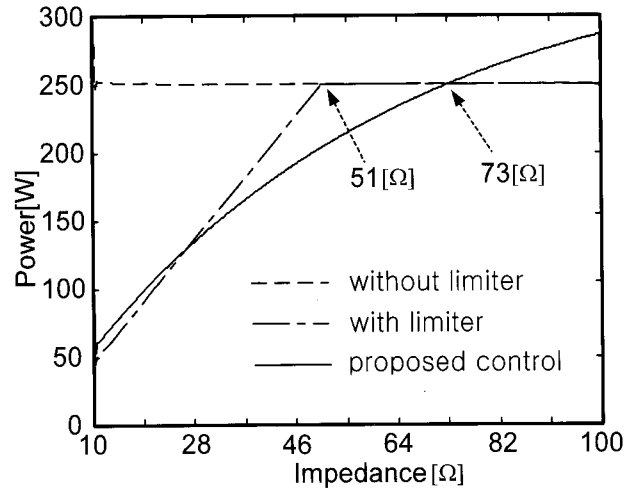


그림 10 가변 임피던스에서 출력 전력 특성 비교
Fig. 10 Comparison of output power of ballasts at varying impedance.

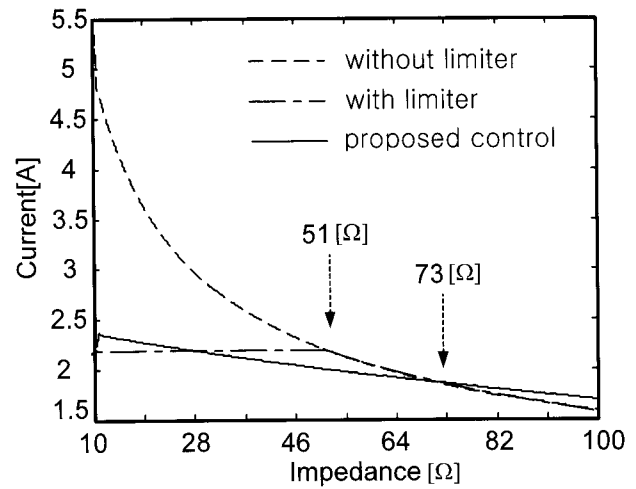


그림 11 가변 임피던스에서 출력 전류 특성 비교
Fig. 11 Comparison of output current of ballasts at varying impedance.

정전력 제어의 경우 램프 임피던스가 낮으면 전압은 매우 낮고 전류는 매우 높아지는데, 램프 시동 전류는 정격의 120% 정도로 제한되는 것이 적절한 것으로 알려져 있다. 제안된 제어기는 정상 상태의 정격 전력제어는 물론이고 과도 상태에서 별도 전류 제한기 없이 전류 제한 기능을 가진다. 또한, 열화된 램프의 경우 정상상태 램프 임피던스가 정격보다 높아질 수 있는데, 이 경우 기존 제어기는 아크 소멸로 연결되어 램프 사용수명을 다하게 된다. 제안된 제어기는 임피던스가 높아진 노화된 램프에 대해서 투입 전압을 정격보다 높게 제어하여 램프의 광 출력을 유지할 수 있는 장점도 가진다.

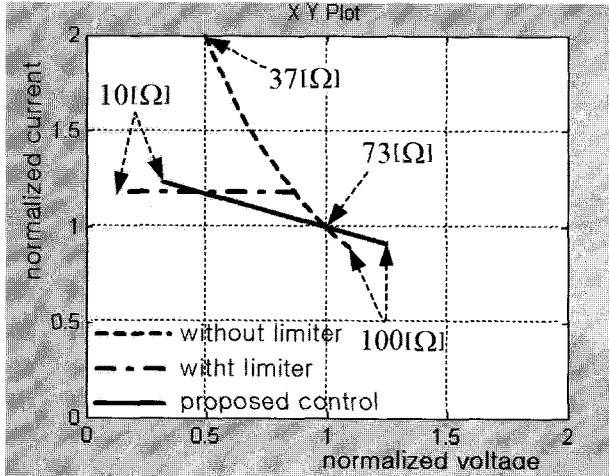


그림 12 가변 임피던스에서 전압-전류 특성 비교
 Fig. 12 I-V characteristic of proposed controller at varying impedance.

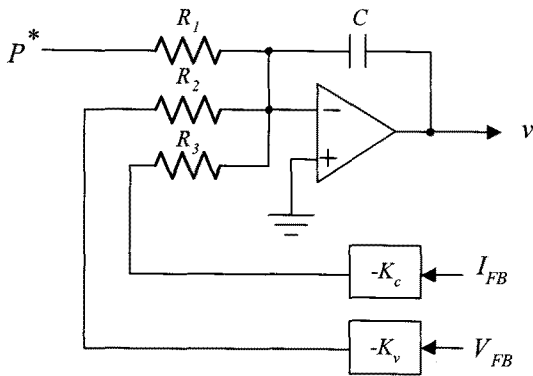


그림 13 전자식 안정기의 전력제어기 구현 회로
 Fig. 13 Evaluated circuit of ballast power controller.

그림 13의 회로는 그림 7의 블록도를 연산증폭기를 이용해 구현한 회로 예이다. 회로는 하나의 연산증폭기와 몇 개의 수동소자로만 구성된다. 여기서 각 수동소자의 값은 센서 종류 및 변환 비에 따라 조정된다.

시뮬레이션 결과, 제안된 전력제어기는 단순한 구조를 가지면서 안정된 전력제어 기능을 가짐을 확인하였으며, 부가적으로 점등 초기 전류제한 기능이 얻어지고, 임피던스가 높아진 노화 램프에 대해 별도의 부가 회로 추가 없이 사용 시간을 연장할 수 있는 장점도 가짐을 확인하였다.

2.3 실험 및 결과

실험 장치는 PFC를 채용하였고, 반 브리지 공진형 인버터, 초기 점등 회로 및 제안된 전력제어기로 구성되었다. 램프 및 안정기의 정격은 250[W]이고, 램프는 메탈 할라이드 램프를 사용하였다.

제안된 전력제어기를 이용한 램프 구동 실험 결과 램프 시동 전류가 램프 전압에 연관되어 적절히 제어됨을 확인하였다. 그림 14는 램프 점등 후 초기 시동 테스트 과정을 측정된 파형인데, 점등 전압은 매우 높게 형성되었고, 점등 직

후 램프 임피던스가 낮은 초기에는 낮은 전압과 높은 전류가 투입되고 점차 전압이 상승함에 따라 전류가 낮아짐을 확인할 수 있다.

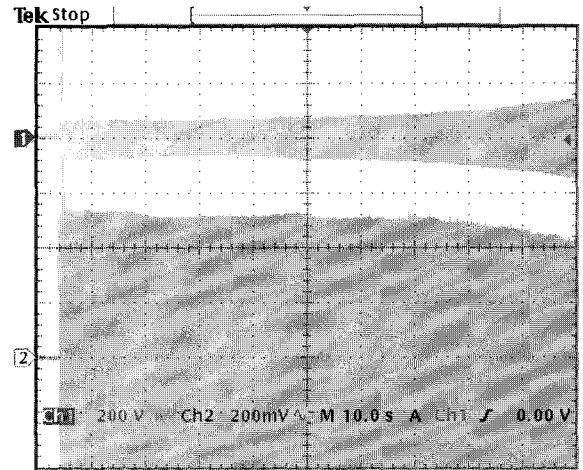


그림 14 초기 시동 테스트 결과
 Fig. 14 Warming-up test result (CH1:voltage, 200[V/div], CH2:current, 1[A/div], 10[S/div]).

3. 결론

HID 램프의 등가 저항은 점등 초기에는 극히 낮은 값을 가지고 점차 정상상태로 높아지는 특성을 가지며, 안정기는 램프 투입 전력을 적절히 조절하는 기능을 가져야 한다. 통상적인 전력제어기는 전압과 전류의 곱으로 전력이 연산되는데 정확한 전력제어가 가능하지만 비선형 특성을 가지고 있어 안정도 해석 등이 난해하며, 회로 구현에 고가의 곱셈기가 소요된다.

본 논문에서는 공진형 인버터와 램프 임피던스 변환 특성을 고려한 전자식 안정기의 선형화 모델을 얻고 일반 연산증폭기에 의한 전자식안정기용 전력제어기를 제안하였다. 시뮬레이션 해석 결과 과도상태 및 정상상태 전체적으로 안정한 특성을 확인하였고, 점등 직후 전류제한 기능도 자동적으로 구사됨을 확인하였고, 실험 결과도 일치함을 확인하였다.

참고 문헌

[1] S. Lee and C. Lee, "A Novel Power Controller for an Electronic Ballast for HID Lamps," Proceedings of PCIM 2003 Europe, vol. 47, pp. 579-584, 2003.
 [2] S. Lee and C. Lee, "Resonant-type electronic ballast for metal halide lamps," Proceedings of PCIM 2001, pp. 62-69, 2001
 [3] T. Liang, K. Su, and W. Fu, "High Frequency Electrical Circuit Model of Metal-Halide Lamp," Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference-APEC'98, pp. 1163-1167, 1998
 [4] S. Ben-Yaakov and M. Gulko, "Design and performance of an electronic ballast for high-pressure sodium(HPS) lamps," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 4,

pp. 486-491, Aug. 1997.

- [5] R. Redl and J. Paul, "A new high-frequency and high-efficiency electronic ballast for HID lamps: topology, analysis, design, and experimental results," Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference - APEC'99, vol. 1, pp.486-492, 1999

저 자 소 개



이 성 희 (李 成 熙)

1967년 9월 7일생. 1993년 경북대학교 전자공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1994년~현재 포항산업과학연구원 책임연구원.



김 태 원 (金 泰 元)

1974년 8월 10일생. 1997년 한양대 전자공학과 졸업. 2004년 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(박사). 2008년~현재 포항산업과학연구원 선임연구원.



박 태 준 (朴 泰 浚)

1965년 2월 14일생. 1991년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(박사). 1994년~현재 포항산업과학연구원 책임연구원.



이 치 환 (李 治 煥)

1961년 8월 6일생. 1984년 영남대학교 전자공학과 졸업. 1994년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1991년-1998년 영남이공대학 전기과 부교수, 1998년~현재 위덕대학교 전자공학부 부교수