

메탈할라이드 램프 안정기의 디지털 제어기 개발

문태환*, 김희준*, 조규민**, 김명구***
 *한양대학교, **유한대학, ***T&B Tronics

Development of A Digital Controller for The Metal Halide Lamp Ballast

Moon Tae Hwan*, Kim Hee Jun*, Cho Kyu Min**, Kim Myong Gu***
 *Hanyang University, **Yuhan College, ***T&B Tronics

Abstract - This paper presents a digital controller of electronic ballast for the metal halide lamp. The proposed controller includes the control algorithm for soft starting, no load protection, overcurrent protection and dimming(or power control). The proposed controller, moreover, has the high frequency modulation scheme and the tracking algorithm to avoid acoustic resonance phenomena. For the math production with the low cost using the ASICs, the proposed controller has been designed with the EPLDs only, without any microprocessor. In this paper, the proposed control algorithms are described and the experimental results of prototype 150W metal halide electronic ballast are presented.

나 상기 전자식 안정기의 경우 전압 제어 발전기 등의 선형 소자들로서 제어회로를 구성하였기 때문에 노이즈 등에 취약할 가능성이 있고, 제어회로의 부피가 크며, 회로 정수의 미세 조정이 요구되는 등 전자식 안정기의 양산 측면에 있어서는 다소의 단점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 기 제안된 전자식 안정기의 각종 제어 알고리즘을 보완함과 더불어 제어기를 디지털화함으로써 안정기의 신뢰성을 향상시키고자 하였다.

본 논문에서는 소프트 스타팅 방식의 점등 알고리즘, 무부하 보호 알고리즘, 주파수 변조 제어 알고리즘, 전력 제어 알고리즘 등과 더불어 실시간 공명 현상 검출 알고리즘 및 공명 현상 회피 알고리즘 등을 기술하였으며 이들 각각의 디지털 제어기 블록도를 나타내었다. 또한 150W 메탈 할라이드 램프를 적용한 실험 결과로서 제안한 디지털 제어기의 유용성을 검증하였다.

1. 서 론

2. 고주파 변조 메탈할라이드 전자식 안정기

2.1 주회로 구성

각종의 고휘도 방전 램프들 중에서도 특히 메탈 할라이드 램프는 뛰어난 연색성과 높은 광효율을 지니고 있어 백화점 쇼 윈도우 등의 각종 전시장 조명에서부터 무대의 스포트 라이트 혹은 자동차의 헤드 라이트에 이르기 까지 여러 요소에 사용되고 있다. 그러나 대부분의 경우 부피가 크고 무거운 자기식 안정기를 채용하고 있기 때문에 설치 장소에 제약을 받고, 또한 설치 작업이 번거로운 단점을 지니고 있다. 따라서 근래에는 전자식 안정기가 갖는 소형, 경량 및 고효율의 이점을 위하여 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 채용이 점차 증가하고 있다. 그러나 현재, 대부분의 메탈 할라이드 전자식 안정기들은 수 백 Hz의 구형파 인버터에 의해 구동되는 저주파식 전자식 안정기이다. 이는 형광 램프 등의 저압 방전 램프들과는 달리 고압 방전 램프들이 지니는 공명 현상(Acoustic Resonance Phenomena)의 문제 때문에 고주파 구동이 용이하지 않기 때문이다. 즉, 고압 방전 램프들은 아크관 내 압력 파동의 고유 주파수가 통상의 고주파 전자식 안정기의 램프 구동 주파수 대역에 위치하고 있기 때문에 램프의 구동 주파수가 압력 파동의 고유 주파수의 반에 해당될 경우 아크관 내의 기체가 공진을 일으켜 아크의 불안정을 초래하기 때문이다. 이들 고압 방전 램프들 중 특히 메탈 할라이드 램프는 다수의 공명 주파수가 넓은 주파수 대역에 조밀하게 분포되어 있기 때문에, 고압 수은 램프 혹은 고압 나트륨 램프 등의 다른 고압 방전 램프에 비하여 고주파식 전자식 안정기의 적용이 어려운 실정이다. 따라서 최근의 메탈 할라이드 램프와 관련한 대부분의 연구는 공명 현상을 제거하는 방법들에 초점이 맞추어 지고 있다.^[1-4]

그림 1에 주회로 구성을 나타내었다. 고입력 역률을 위하여 다이오드 정류기 후단에 부스트 타입의 능동 역률 개선 회로를 적용하였으며, 입력 전류의 고조파를 제거하기 위하여 입력단에 전자파 노이즈 필터를 부가하였다. 한편, 그림 1에 도시한 바와 같이 직류 링크단의 전압을 분압한 전압형 반 브리지 인버터를 이용하여 램프를 고주파로 구동하고자 하였다.

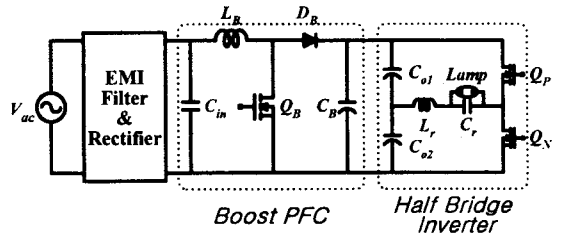


그림 1 주회로 구성

Fig. 1 Configurations of main circuit

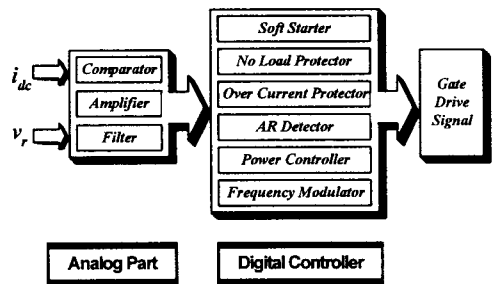


그림 2 제어기 구성

Fig. 2 Configurations of controller

필자들은 본 연구에 앞서 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기로서 20kHz에서 100kHz 사이의 고주파 영역에서 램프의 구동 주파수가 변조되는 고주파 변조 방식의 메탈 할라이드 전자식 안정기를 제안한 바 있다.^[5] 그러

2.2 제어기 구성

그림 2에 전체 제어기 구성도를 나타내었다. 다수의 제어기들이 복합적으로 구성되어 있기 때문에 그림 2에는 전반적인 제어기들의 기능만을 표시하였으며, 보다 구체적인 제어 흐름은 후술되는 각각의 제어 알고리즘에 대한 설명에서 나타내었다.

제안하는 전자식 안정기의 경우 직류단 전류를 검출하여 전력 제어 및 공명 현상 검출을 수행하며 부하단의 인덕터 전압을 검출하여 무부하 또는 램프 고온 상태에 있어서의 점등 실패에 따른 안정기 보호책을 수행하고 있다. 직류단 전류 및 인덕터 전압 검출계에는 선형 소자를 이용하여 증폭기, 필터, 비교기 등을 구성하였다.

디지털 제어기는 그림 2에 도시한 바와 같이 소프트웨어 스타팅 알고리즘, 무부하 보호 알고리즘, 과전류 보호 알고리즘, 주파수 변조 알고리즘, 전력 제어 알고리즘, 공명 현상 검출 및 회피 알고리즘 등을 구현한다.

이하 주요 알고리즘을 상세 블록도를 이용하여 기술하면 다음과 같다.

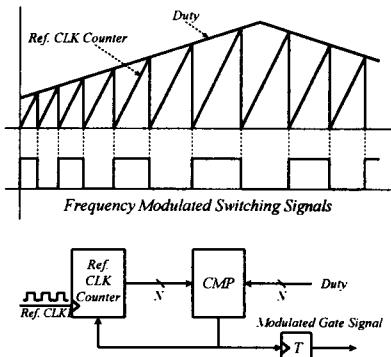


그림 3 주파수 변조 스위칭 신호 발생 제어 블록도
Fig. 3 Control block diagrams of the frequency modulating switching signal generation

먼저, 그림 3에 주파수 변조 스위칭 신호 발생 방법을 나타내는 개념도 및 이의 구현 제어회로 블록도를 나타내었다. 그림에 도시한 바와 같이 기준 클럭을 계수하는 카운터와 스위칭 주기 데이터가 같아지는 순간 기준 클럭 카운터를 리셋함과 동시에 토글 플립플롭을 트리거 시킴으로써 가변 스위칭 주기 데이터에 의해 주파수 변조되는 스위칭 신호 발생부를 구성하였다. 이 때, 가변 스위칭 주기 데이터는 200Hz에서 2kHz 사이의 주파수를 갖는 교류 성분의 삼각파와 전력제어를 위한 직류 성분을 가감한 변조 지령 데이터에 해당한다.

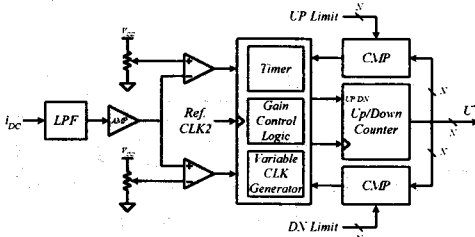


그림 4 전력 제어 블록도
Fig. 4 Block diagrams of the power control

다음으로, 그림 4는 가변 이득의 적분 제어기를 기반으로 하는 전력 제어 블록도이다. 제안하는 안정기의 경우 부스트 타입의 능동 역률 개선 회로를 채용하고 있으며 이 능동 역률 개선 회로는 입력 역률의 제어와

불어 직류단 전압을 일정으로 제어하고 있다. 따라서 직류단의 전류는 곧 램프 구동용 인버터의 입력 전력에 대한 지표로 사용할 수 있고, 스위칭 손실 등 인버터의 평균 전력 손실을 일정한 것으로 가정하면, 직류단의 전류를 램프 전력의 지표로 사용하는 것이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 직류단 전류를 제어함으로써 간접적으로 램프의 전력을 제어하고자 하였다. 이 때, 직류단 전류에는 입력 전원 주파수, 고주파 스위칭 주파수 및 저주파 변조 주파수에 해당하는 주파수 성분이 함유되어 있으므로 저역 통과 필터를 이용하여 이들 주파수 성분을 제거하였다. 한편, 본 연구에서는 회로의 간략화를 위하여 직류단 전류를 A/D 변환하지 않고 그림 4에 도시한 바와 같이 두 개의 비교기를 이용하여 직류 전류의 레벨을 소정의 폭 내에 위치하도록 제어하고자 하였다. 따라서 두 개의 비교기 신호의 조합에 따라 현재 상태의 오차 극성을 판단하고 이에 따라 업 다운 카운터를 동작 시킴으로써 제어 입력의 크기를 가감하는 방식으로 전력 제어기를 구성하였다. 이 때, 업 다운 카운터의 오버플로우를 방지하기 위하여 적절한 상 하한 제한치를 설정하였다. 또한 오차 극성에 머무르는 시간에 따라 가변 주파수의 클럭으로 업 다운 카운터를 구동함에 의하여 가변 이득 적분 제어기를 구성하였다.

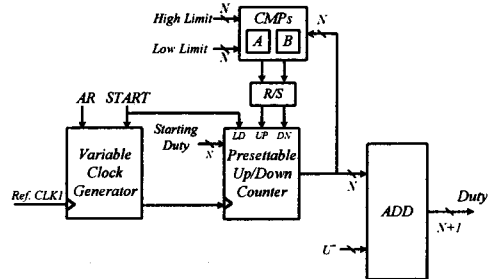


그림 5 주파수 변조 신호 발생 제어 블록도
Fig. 5 Control block diagrams of the frequency modulating signal generation

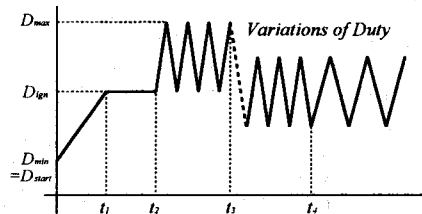


그림 6 주파수 변조 신호 개형
Fig. 6 Outline of the frequency modulating signal

그림 5와 그림 6은 각각 주파수 변조 신호 발생 제어 블록도 및 램프 점등 시부터 정상상태에 이르기까지의 변조 신호의 추이를 나타내는 것이다.

전체 시퀀스를 관장하는 타이머에서 램프 기동 신호를 발생하면, 시간 t_1 에 이를 동안 램프 구동 주파수를 기 설정된 초기 기동 주파수($1/2D_{start}$)에서부터 충분한 점등이 가능한 주파수($1/2D_{ign}$)까지 주파수를 가변시켜 소프트 스타팅이 이루어지도록 구성하였다. 가열되지 않은 램프의 경우 통상 수 kV를 인가하면 수 msec 이내에 방전이 이루어진다. 만일 램프가 없는 상태 혹은 고온 등 램프가 정상적으로 기동되기 어려운 상태일 경우, 지속적으로 인버터를 운전시킨다면 스위칭 소자가 파손될 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 시간 t_1 에서 부하단 인덕터 전압의 크기로써 정상 점등 유무를 판단하여 점등 실패 시 게이트 신호가 차단되는 무부하

보호 알고리즘을 적용하였다. 이는 부하단 인덕터에 보조 권선을 감아 인덕터 전압을 검출하여 비교기로서 이의 크기를 판단하고, 그 결과에 따라 게이트를 차단하는 간단한 알고리즘이므로 본 논문에서는 이에 대한 구체적인 제어 블록도는 생략하였다.

시간 t_1 에서 정상 점등이 이루어졌을 경우 그림 5에 도시한 가변 클럭 발생기는 시간 t_2 에 이를 동안 클럭 발생을 멈춤으로써 일정한 주파수로 초기 아크의 안정된 상태를 확보할 수 있도록 하였다. 시간 t_2 이후에는 전력 제어가 동작하기 시작함과 동시에 가변 클럭 발생기에서 기 설정된 변조 신호 주파수를 발생할 수 있도록 업 다운 카운터에 클럭을 공급함으로써 램프의 구동 주파수를 변조하여 정상 운전 상태로 돌입하도록 하였다. 여기서, 그림 5에 도시한 바와 같이 변조 신호와 전력 제어기의 제어입력을 가산하여 최종 변조 신호를 발생함으로써 주파수 변조와 더불어 이 변조 주파수 대역을 이동시켜 램프 전력을 제어 하고자 하였다. 이 때, 램프가 충분히 가열되기 이전에는 램프 전력이 정격에 못 미치므로 변조 운전 초기에는 전력 제어기가 포화된 상태이다. 따라서 램프가 정격 전력을 소비할 수 있는 상태가 되는 시간 t_3 까지는 램프는 가장 낮은 영역의 주파수 범위에서 변조가 이루어진다. 여기서, 제안하는 안정기의 경우 최저 주파수 ($1/2D_{max}$)를 20kHz로 설정, 램프의 구동이 항시 가청 주파수 이상으로 유지될 수 있도록 하였다. 또한 스위칭 손실 등을 고려하여 램프 구동 최고 주파수 ($1/2D_{min}$)는 100kHz로 설정을 하였다.

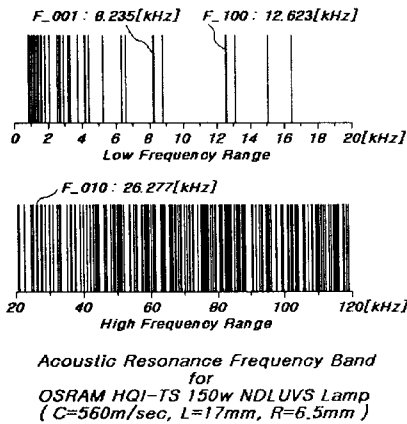


그림 7 메탈 할라이드 램프 공명 주파수 분포 일례
Fig. 7 An example of the acoustic frequency distribution for the metal halide lamp

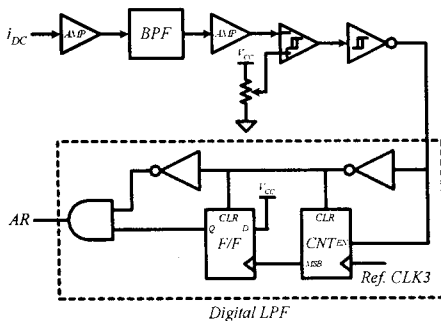


그림 8 공명 현상 검출기
Fig. 8 Detector of acoustic resonance phenomena

한편, 그림 7에 메탈 할라이드 램프 공명 주파수 분포의 한 예를 도시하였다. 이는 본 연구에서 적용한 램프 중의 하나인 OSRAM사의 HQI-TS 150W 메탈 할라이드에 대한 것이다. 램프의 압력 파동 주파수는 램프 구동 주파수의 두 배에 해당하므로 그림 7은 공명 주파수를 램프 구동 주파수로 환산하여 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯, 20kHz 이상의 고주파 대역에 있어서는 거의 모든 주파수에서 공명 현상을 일으킬 가능성이 있다. 각 주파수에서의 진동 폭은 각기 다르기 때문에 아크의 휨, 소음 등의 미미한 공명 현상이 발생할 수도 있고, 심한 플러커 현상이 발생할 수도 있으며 심할 경우 아크가 소멸되기도 한다. 따라서 해당 메탈 할라이드 램프를 고정의 고주파로 구동시키는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 본 연구에서는 고주파 변조를 통하여 램프 구동 주파수를 일정한 주파수에 머물지 않게 함으로써 메탈 할라이드 램프의 공명 현상을 피할 수 있도록 제어를 구성한 것이다. 그러나 그림 7에 도시하였듯 공명 주파수의 서브 하모닉까지 고려한다면 제안하는 안정기와 같이 일정한 변조 주파수의 삼각파형으로 램프 구동 주파수를 변조하는 방식은 완벽하다고 장담할 수는 없다. 즉 변조 삼각파형 주파수의 큰 고조파가 공명 주파수의 서브 하모닉 주파수와 일치하게 되는 경우 공명 현상이 발생할 가능성도 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 8에 표시한 바와 같은 실시간 공명 현상 검출기를 적용하여 공명 현상 회피 알고리즘을 수립하였다. 메탈 할라이드 램프에 공명 현상이 발생할 경우 램프의 임피던스가 변동한다. 따라서 램프가 전력에 변동이 생기고, 이는 곧 직류단 전력의 변동으로 이어지므로, 본 연구에서는 직류단 전력의 지표인 직류단 전류로부터 전력 변동의 유무를 검출하여 이를 공명 현상 유무의 지표로 사용하고자 하였다. 이 때, 앞서 기술한 바와 같이 직류단 전류에는 스위칭 주파수, 변조 주파수 그리고 전원 주파수 성분이 포함되어 있다. 그러나 육안으로 식별 가능한 공명 현상의 경우 ω_r 주파수가 적어도 전원 주파수 이하이므로 그림 8에 도시한 바와 같이 증폭기와 대역 통과 필터를 사용하여 저주파 대역의 램프 전력의 변동분을 검출하고 히스테리시스 비교기를 이용하여 공명 현상의 유무를 판정하도록 제어를 구성하였다. 또한 이 공명 현상 검출기에서 공명 현상이 발생한 것으로 판단될 경우, 해당 정보를 그림 5에 도시한 가변 주파수 클럭 발생기에 입력하여 변조 주파수를 변경하는 방식의 공명 현상 회피 알고리즘을 적용하였다. 공명 현상 검출기의 경우 선형 회로로 구성이 되므로 노이즈 등에 의한 오동작의 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 공명 현상 검출기의 선형 회로부 출력 신호가 기 설정된 기간 보다 짧을 경우 해당 정보를 무시하도록 디지털 제어기에서 다시 한 번 필터링함으로써 공명 현상 검출기의 오동작에 따른 불필요한 변조 주파수 변경을 방지할 수 있도록 하였다.

표 1 시스템 정수 및 파라미터

Table 1 System constants and parameters

V_{ac}	220 V	f_o	20k - 100kHz
C_{in}	100nF	f_m	200 - 2kHz
L_B	510 μ H	Q_B	IRFP450
V_{dc}	370 V	Q_P, Q_N	IRF840
C_{o1}, C_{o2}	470 μ F	t_1	6.3 msec
L_r	400 μ H	t_2	13.4 sec
C_r	30nF	$t_{retrigger}$	53.7 sec
ω_r	45.9kHz	LAMP	150 W MHD

4. 실험 결과 및 고찰

실험에 적용한 주요 정수 및 각종 파라미터는 표 1에 나타난 바와 같다. 표 1에서 w_r 은 L_r 과 C_r 의 고유 공진 주파수이며, f_0 와 f_m 은 각각 램프 구동 주파수의 범위 및 변조 신호 주파수의 범위이다. 그리고 $t_{trigger}$ 는 램프 기동 반복 시간으로 본 연구에서는 고온 등 램프의 불안정으로 인하여 기동에 실패하였을 때 약 53.7초마다 재기동 하도록 하였다.

먼저 그림 9에 전원 입력단의 전압, 전류 파형을 나타내었다. 수동 필터와 능동 역률 개선회로에 의하여 전류의 파형이 정형적으로 유지됨과 동시에 입력 전압과 동상을 이루어 거의 1에 가까운 입력역률을 가짐을 확인할 수 있다.

다음으로, 그림 10은 기동시 램프 양단의 전압 파형을 나타낸 것으로 정상적인 기동이 이루어지는 경우(위)와 무부하 시 램프 구동용 인버터 보호를 위하여 기동시점에서부터 약 6.3msec가 될 때까지 기동이 이루어지지 않아 게이트 신호를 차단함에 따라서 부하단 전압이 0으로 되는 경우(아래)이다.

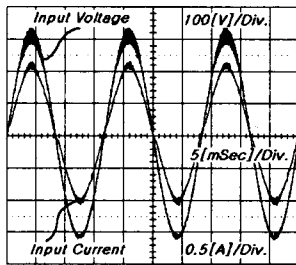


그림 9 입력 전압, 전류 파형

Fig. 9 Input voltage and current waveforms

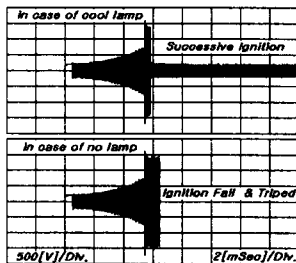


그림 10 기동시 램프 전압 파형

Fig. 10 Lamp voltage waveforms at starting

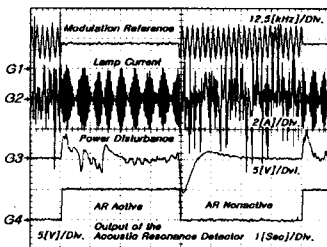


그림 11 일정/변조 주파수 운전 시 각부 파형
Fig. 11 Waveforms at the constant frequency and the modulated frequency operation

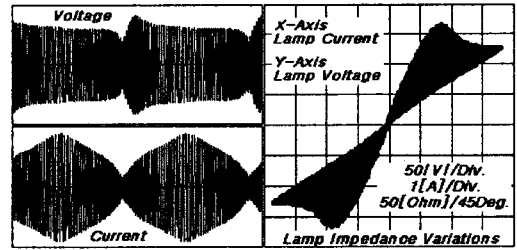


그림 12 램프 전압 전류 파형 및 특성 곡선
Fig. 12 Lamp voltage and current waveforms and its characteristic curve

그림 11은 약 4초씩 일정 주파수 운전 및 주파수 변조 운전을 반복하였을 때의 변조 신호, 램프 전류, 직류단 전력 변동 파형 및 공명현상 검출기의 출력 파형을 나타낸 것이다. 관측에 사용한 오실로스코프의 샘플링의 한계로 인하여 엘리어링 현상이 일어난 상태이므로 변조 신호와 램프 전류의 파형은 정확한 파형이 아니며 다만 그 개형만을 나타내는 것이다. 한편 본 연구에서 제안한 디지털 제어기의 경우 변조 신호 데이터를 외부로 출력하지 않기 때문에 그 개형을 관측할 수가 없어, 본 파형은 제안하는 안정기와 동일한 알고리즘을 갖는 선형제어 안정기로 관측된 파형임을 밝힌다. 그림 11로써, 본 연구에서 제안한 공명 현상 검출기가 잘 동작함을 알 수 있다. 끝으로 주파수 변조 운전 시 램프 전압 파형 및 전압/전류 특성 곡선을 그림 12에 나타내었다. 가변 주파수 운전에 의하여 램프의 임피던스가 순시적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 그러나 램프의 전력 제어는 평균 전력을 제어하는 것이기 때문에 이 임피던스의 변화는 램프의 전력 제어에는 아무런 문제가 되지 않는다.

4. 결 론

본 논문에서는 고주파 변조 방식의 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 디지털 제어를 제안하였으며 제어가 수행하는 각각의 제어 알고리즘에 대하여 기술하였다. 그리고 실험 결과를 통하여 제안한 디지털 제어가 공명 현상 없이 고주파로 메탈 할라이드 램프를 구동할 수 있음을 입증하였다. 추후 연구과제로는 본 제어기에 메모리를 추가하여 안정된 점등 상태의 데이터를 기록해 두어 재 점등 시 다시 적용하는 방식의 적용 및 ASIC을 위한 회로의 최적화 등이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Wei Yan, et al. "Investigation on Methods of Eliminating Acoustic Resonance in Small Wattage HID Lamps". Industry Applications Conference 2000, Vol.5, pp. 3399-3406, 2000.
- [2] Laszlo Laskai, et al. "White-Noise Modulation of High-frequency High-Intensity Discharge Lamp Ballasts". IEEE Transactions On Industry Vol.5, pp. 3399-3406, 2000.
- [3] 김기정, 박종연 "메탈 할라이드 방전과 내의 음향 공명을 감소시킨 전자식 안정기 설계" 전력전자학회 논문지, 제4권, 제5호, pp. 405-412, 1999.
- [4] H. Peng, S. Ratanapanachote, P. Enjeti, I. Pitel. "Evaluation of Acoustic Resonance in Metal Halide (MH) Lamps And An Approach to Detect Its Occurrence" Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Vol.3., pp. 2276-2283, 1997.
- [5] 문태환 외 3인, "메탈할라이드 램프용 고주파 변조 방식 전자식 안정기", 전력전자학회 하계학술대회는문집, 2001.