

고휘도 Short-Arc 램프용 전자식 안정기 설계 및 제작

김일권⁺ · 박대원 · 이성근 · 길경석

The Design and Fabrication of an Electronic Ballast for High Intensity Short-Arc Lamps

Il-Kwon Kim⁺, Dae-Won Park, Sung-Geun Lee, Gyung-Suk Kil

Abstract : This paper presents an electronic ballast using a step down converter, a low frequency inverter for high intensity short-arc discharge lamp. The proposed ballast is composed of a full-wave rectifier, a step down converter operated as a current source with power regulation and a low frequency inverter with external ignition circuit. The ignition circuit generates high voltage pulse of 3~5[kV] peak, 130[Hz] periodically. Moreover, it is able to reignite at regular intervals by protective circuit. As experimental results on the test, acoustic resonance phenomenon is eliminated by operating the low frequency square wave voltage and current. Lamp voltage, current and consumption power are measured 123.8[V], 8.1[A] and 1,002[W], respectively. It was confirmed that the designed ballast operate the lamp with a constant power.

Key words : Electronic Ballast, Short-Arc lamp, Step down converter, High pressure discharge lamp

1. 서 론

최근에 개발된 1[kW]급 이상의 고휘도 Short-Arc 램프는 기존 메탈할라이드 램프의 광효율 및 연색성을 크게 개선하였고, 광원의 크기가 순수한 점광원에 가깝기 때문에 등기구의 설계가 용이하여 그 수요가 급격히 증가하고 있다. 그러나 방전램프를 점등하기 위한 안정기는 수 십 [kg]이 넘는 자기식 안정기를 사용하므로 조명기구의 크기가 커지고 무게가 증가하므로 전체 조명설비의 설계 및 유지, 보수비용이 증가하게 된다. 이러한 기존의 자기식 안정기를 전자식 안정기로 대체하면 부피 및 무게를 1/4~1/5 정도로 감소시킬 수 있기 때문에 감소분만큼 조명설비의 비용

을 크게 절감할 수 있다. 그러나 이러한 대용량의 전자식 안정기는 국내 및 국외적으로 개발사례가 없고 최대 400[W]급 이하의 소형 램프를 대상으로 소수의 몇몇 업체를 통하여 연구 및 상용화가 진행되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 구조가 간단하고 소형, 경량화가 가능한 1[kW]급 고휘도 Short-Arc 램프용 전자식 안정기를 설계·제작하였다.

제안한 전자식 안정기는 130[Hz]의 구형 저주파를 램프에 인가함으로써 고압 방전 램프에서 발생할 수 있는 음향공명현상을 제거하였으며, 25[kHz]의 고주파 전압을 증첩시켜 아크튜브의 전극에서 발생할 수 있는 열적 불균형을 해소하였다. 또한 강압형 컨버터를 이용하여 2단의 전력제어를 수행하여, 점등 직후

⁺ 김일권(한국해양대학교 전기전자공학부), E-mail:hvkwon@shinbiro.com, Tel: 051)410-4893
박대원, 한국해양대학교 전기전자공학부
이성근, 한국해양대학교 전기전자공학부
길경석, 한국해양대학교 전기전자공학부

정전류원과 같이 동작하며, 정상 상태에서 램프에 인가되는 전력을 일정하게 제어함으로써 방전 램프에 안정한 점호 전압 및 지속적인 전류를 공급하였다. 램프의 점등은 별도의 점화기를 제작하여 3~5[kV]의 고전압을 인가하였으며, 타이머를 이용하여 일정한 간격으로 재점등을 시도하는 기능을 추가하였다.

2. 전자식 안정기의 설계

2.1 안정기의 기본 구성

본 연구에서 제작한 전자식 안정기는 램프의 안정적인 전력을 공급하며, 제어기의 구조를 단순화하기 위하여 3단으로 구성하였다^{[1],[2]}. 제 1단에서는 상용 전원을 전파 정류하여 강압형 컨버터에 인가한다. 제 2단은 점등 초기에 램프로 인가되는 전류를 일정하게 제한하는 정전류원의 역할과 정상상태일 때 정전력 제어가 용이한 강압형 컨버터를 사용하였다. 제 3단에서는 풀브릿지 인버터 회로를 적용하여 램프로 인가되는 전압 및 전류를 저주파수의 구형파로 만든다. 또한 점화기에 구동전압을 공급하여 초기 점등시 3~5[kV]의 고전압 펄스를 발생시킨다.

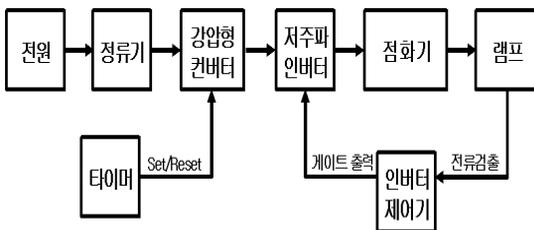


Fig. 1 Block diagram of the electronic ballast

2.2 램프 전력 제어

정상상태의 램프 전압은 제조사마다 그 특성치가 다르며, 점등 방향, 밀폐된 등기구 적용의 유무 및 노화의 정도에 따라 수~수 십[V]의 차이가 발생하게 된다. 따라서 안정적인 광출력 및 동작특성을 얻기 위해서는 정전력 제어가 필수적이다. 제한한 전자식 안정기는 그림 2에서와 같이 점등 후 램프 전압의 상승에 따라 2단 구성의 전력 제어회로로 구성하였다^{[3]-[7]}.

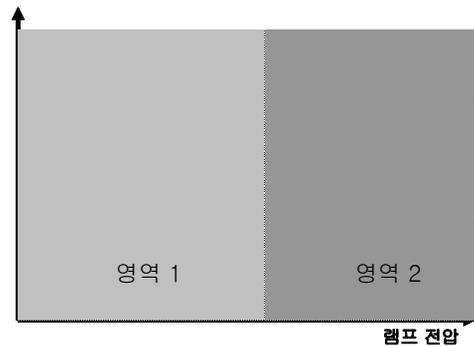


Fig. 2 Characteristics of the electronic ballast

영역 1은 점등 후 검출저항의 피드백 신호를 기준 전압과 비교하여 강압형 컨버터의 스위칭 소자를 PWM 제어함으로써, 급격히 변화하는 램프의 상태에 대하여 일정한 전류를 공급하는 정전류원의 동작을 수행한다. 이후 램프 전압이 정상 전압에 도달하면 영역 2의 제어신호로 전환되어 램프 전압과 전류의 피드백 신호를 이용한 정전력 제어를 수행한다.

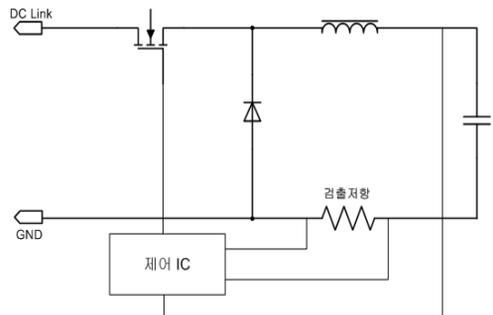


Fig. 3 Step down converter circuit

램프의 전력을 제어하기 위해서는 램프의 전압과 전류에 대한 신호를 검출해야한다. 하지만 제한한 안정기는 램프가 풀브릿지 양단에 연결되어 있기 때문에 플로팅된 램프의 전압과 전류를 검출하는 것은 어렵고 제어기가 복잡해지는 문제가 있다. 따라서 강압형 컨버터 출력 특성을 이용한 간접적인 검출방법을 사용하였다. 이는 컨버터 코일의 평균 전류가 램프 전류와 동일하고, 컨버터 출력 전압의 평균 전압은 램프 전압과 동일한 특성을 이용한 것으로써, 그림 3에 나타난 바와 같이 강압형 컨버터 출력 전압과 검출 저항 양단의 전압으로 램프의 전압, 전류의 값을 측정하였

다. 초기 점등 후 검출 저항을 통하여 램프의 전류를 검출하고 기준값과 비교하여 스위칭 소자의 시비율을 조절함으로써 램프로 흐르는 과전류를 제한하며, 이후 램프의 전압이 점차 증가하여 정상상태에 도달하면 램프의 전압과 전류의 피드백 신호를 기준 전력값과 비교하여 정전력 제어를 수행한다.

2.3 점등 회로

그림 4는 본 연구에서 제작한 점등 회로를 나타낸 것이다. 점화기는 폴브릿지 인버터 양단에 램프와 직렬로 연결되며 펄스 트랜스 1차측은 양방향 스위칭 소자에 연결된다. 인버터의 반주기마다 강압형 컨버터 출력전압이 양방향 스위칭 소자의 트리거 전압에 도달하면 스위칭 소자가 도통되어 펄스 트랜스 1차측에 펄스 전류가 흐르게 된다^{[8],[9]}. 이에 따라 2차측 권수비에 의한 3~5[kV]의 고전압이 램프에 인가되어 램프가 점등된다. 램프가 점등된 후에는 양방향 스위칭 소자 양단에는 트리거 전압보다 낮은 램프 전압만이 인가되어 스위칭 소자를 도통시키지 못하므로 펄스 트랜스 1차측은 개방된 회로가 된다.

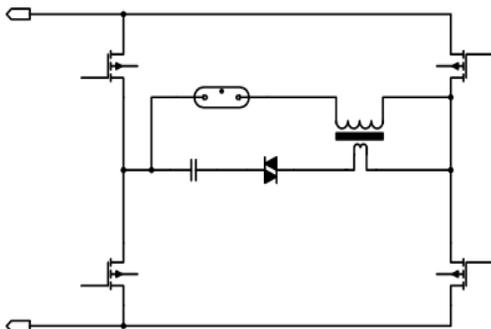


Fig. 4 Full-bridge inverter and ignitor circuits

2.4 재점등 회로

램프가 점등되어 일정시간이 흐르면, 아크-튜브는 방전에 의하여 강렬한 빛을 방출함과 동시에 내부가 고온·고압의 상태가 된다. 이 때 순간 정전이나 일시적 소등 후 램프가 충분히 식기 이전에 재점등을 하면 파센의 법칙에 의하여 램프의 방전개시전압이 매우 높아진다. 이 때문에 자연 냉각에 의해 내부 압력이

낮아져서 램프가 재점등 될 때까지 점화기는 지속적으로 램프에 고전압을 인가하므로 램프, 스위칭 소자 및 제어 IC에 불필요한 전압 스트레스를 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 타이머를 이용하여 램프가 냉각되는 일정시간 간격으로 재점등을 시도하도록 구성하였다.

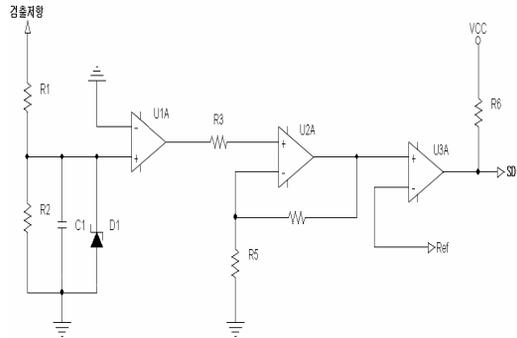


Fig. 5 Lamp current sensing circuits

그림 5는 램프의 점등 유무를 판단하는 전류 검출 회로를 나타낸다. 램프가 점등되면 강압형 컨버터의 검출저항 양단에 전압강하가 발생하고, 이 전압을 증폭기, 비교기를 통하여 타이머 IC의 Shut-Down 핀에 인가한다. 이에 따라 타이머 IC는 램프의 정상 점등 시 점등을 유지하며, 만일 램프가 점등되지 않을 경우 타이머 IC가 동작하여 2분 간격의 재점등 시도를 한다.

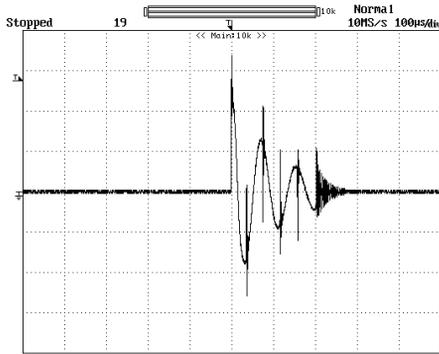
일반적인 고압 방전 램프는 5~10분 내에 냉각이 되므로 본 연구에서 제안한 재점등 회로의 적용은 램프가 재점등되는 동안 2~5회 정도만 고전압이 인가되어 불필요한 전압 스트레스를 줄일 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 점등 회로의 출력 특성

그림 8은 램프를 제거한 후 오픈 상태에서 폴브릿지 인버터 양단의 전압을 측정된 파형이다. 점등 회로는 폴브릿지의 동작에 의하여 반주기 마다 고전압 펄스를 발생시키며, 이 때 최대 전압은 3.4[kV]로 측정

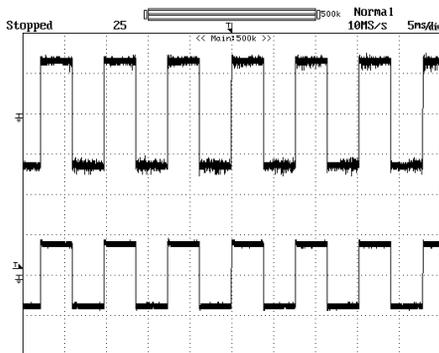
되었다. 램프가 점등된 이후에는 점화기의 양방향 스위칭 소자의 트리거 전압 이하로 램프 전압이 낮아지므로 더 이상 고전압을 발생시키지 않았다.



전압 [1kV/div, 100 μ s/div]
 Fig. 6 Ignition voltage waveform

3.2 램프 출력 특성

램프가 점등된 직후, 램프 전류는 안정기의 동작에 의하여 9.3[A]로 제한되었으며, 램프 전압은 약 20[V] 정도로 급격히 낮아지는 전형적인 램프의 부성 저항 특성을 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 램프의 임피던스는 점차 증가하여 정상 상태에 도달하였고, 이 때 램프 전압 및 램프 전류의 파형을 그림 7에 나타내었다. 램프 전압 및 램프 전류의 값은 각각 123.8[V], 8.1[A]로 측정되었다.



상 : 전압 [100V/div, 5ms/div]
 하 : 전류 [10A/div, 5ms/div]

Fig. 7 Output voltage and current waveforms during burn state

일반적으로 램프가 초기 점등에서 정상 상태에 도달하는 안정화 시간은 램프의 특성 및 주위 온도와 같은 여러 요인에 의하여 일정한 시간이 소요되며, 국내 KS 규격에는 약 5분 이하의 시간으로 규정하고 있다.

본 연구에서 제작한 전자식 안정기는 점등부터 정상 상태에 도달하는 시간은 약 2분 정도로 이러한 요구 조건을 만족함을 확인하였다.



상 : 전압 [50V/div, 1ms/div]
 하 : 전압 [50A/div, 100 μ s/div]

Fig. 8 High frequency overlapping waveform

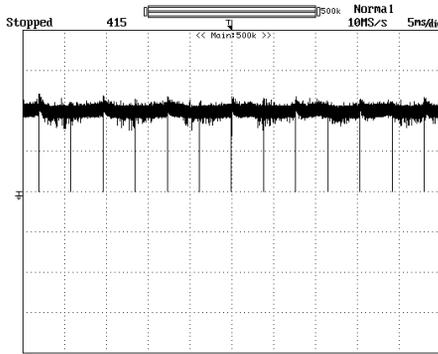
저주파수의 구형과 전원 인가는 램프 전력의 순시치가 일정하므로 음향공명현상을 제거할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 장점은 달리 상대적으로 직류로 구동되는 구간이 길어져서 램프를 DC로 구동할 때와 유사하게 램프의 수명이 단축되는 단점이 있다. 이 때 저주파수의 구형과 고주파 전압을 중첩시키면 램프 전극의 열적 불균형을 해소하여 이러한 단점을 해결할 수 있다.

제안한 안정기는 강압형 컨버터의 출력 캐패시턴스를 조절하여 강제로 리플을 함유시켜 이러한 문제를 해결하였다. 그림 8은 저주파 구형과 전원에 25[kHz]의 고주파 리플을 중첩시킨 파형을 확대하여 나타낸 것이다.

그림 9는 전력분석 기능을 이용하여 램프에 전달되는 전력의 파형을 나타낸 것이다. 측정된 램프의 전력은 1.002[W]이며, 램프 출력이 일정하게 제어됨을 확인하였다. 이처럼 구형과 전원을 이용한 구동방식은 램프의 출력이 항상 일정하기 때문에 플리커 현상 및 음향공명현상을 제거할 수 있으며, 램프의 광출력 또

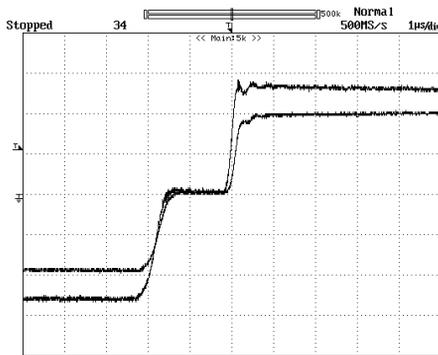
한 안정화 할 수가 있다.

램프의 수평 점등 이외에 $\pm 45^\circ$, 수직 점등 시에도 강압형 컨버터의 정전력 제어에 의하여 3~5[W] 정도 감소를 나타내었으며, 램프의 점등 방향에 따라 램프의 전력에는 커다란 변화가 없음을 확인하였다.



전력 [500W/div, 5ms/div]

Fig. 9 Output waveform of the lamp power



외부 : 전압 [50V/div, 5ms/div]

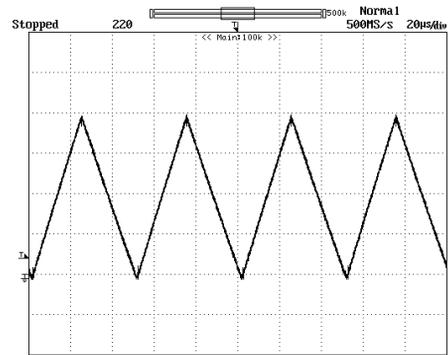
내부 : 전류 [5A/div, 5ms/div]

Fig. 10 Dead time of lamp voltage and current

그림 10은 그림 9의 전력 파형에서 260[Hz]의 주기로 램프의 전력이 0[W]가 되는 구간을 확대하여 나타낸 것이다. 이는 풀브릿지의 인버팅 동안에 램프 전류가 하단 FET의 바디 다이오드를 통하여 프리휠링 되는 데드 타임 구간을 나타낸 것으로서, 일반적인 소용량의 전자식 안정기와는 달리 2[μ s]의 시간으로 설정하였다.

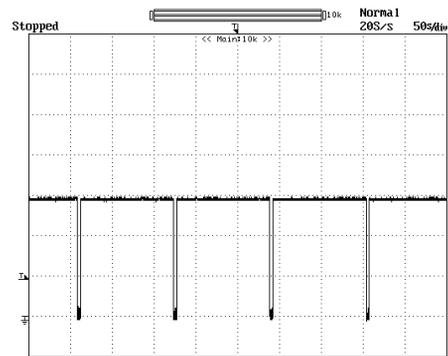
3.3 재점등 회로 특성

재점등 회로에 있어 램프의 점등 유무를 판단하는 것은 매우 중요한 부분이다. 그림 11은 강압형 컨버터의 검출저항을 통하여 흐르는 전류의 파형을 나타낸 것으로서, 강압형 컨버터의 인덕터에 흐르는 전류와 동일하기 때문에 간접적으로 컨버터의 동작 특성을 알 수가 있다. 그림에서와 같이 강압형 컨버터의 스위칭 주파수는 약 25[kHz]를 나타내었고 이 때의 듀티비는 42[%]로 측정되었다. 램프의 전류가 검출되었을 때에는 전류 검출 회로는 타이머 IC를 Shut-down시켜 점등을 유지하였으며, 이 때 강제적으로 안정기의 전원을 제거하였다가 즉시 전원을 인가하면 타이머 IC가 동작하여 약 2분 간격으로 재점등을 시도하였다. 그림 12는 이 때 타이머 IC의 출력 파형을 나타낸 것이다.



전류 [4V/div, 20 μ s/div]

Fig. 11 Current waveform of Buck inductor



전압 [5V/div, 50s/div]

Fig. 12 Output voltage waveform of the timer

4. 결 론

본 연구에서는 강압형 컨버터와 저주파 인버터를 이용하여 1,000[W]급 고휘도 Short-Arc 램프용 전자식 안정기를 설계·제작하였다. 실험결과 제안한 안정기는 소형, 경량화와 더불어 정전력형의 안정적인 동작 특성을 확인 할 수 있었으며, 결과는 다음과 같다.

- 1) 점등 회로는 양방향 스위칭 소자와 고압 펄스 트랜스를 이용하여 구성하였고, 점등 시 최대 3.4[kV]의 고전압을 램프에 인가하였다.
- 2) 강압형 컨버터를 이용한 전력제어는 램프 점등 직후 정전류원으로 동작하다가 램프가 정상 상태에 도달 했을 때 정전력으로 구동하는 2단 구성으로 제작하였다.
- 3) 풀브릿지 인버터를 이용하여 저주파수의 구형파를 램프에 인가함으로써, 음향공명현상을 제거하고 고주파 전압을 중첩시켜 전극의 열적 불균형을 해소하였다.
- 4) 간단한 타이머 회로를 첨가하여 순간 정전이나 재점등시 2분 간격으로 점등시도를 하는 자동 재점등 기능을 추가하였다.
- 5) 램프가 정상 상태에 도달했을 때 램프의 전압, 전류 및 전력은 각각 123.8[V], 8.1[A]와 1,002[W]로 측정되어 안정적인 동작특성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] H. Guldner, "Principles of Electronic Ballast for Fluorescent Lamps - An Overview", Pro. of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, pp. 19-25, 1999
- [2] T. J. Liang, "High Frequency Electrical Circuit Model of Metal-Halide Lamp", Pro. of the IEEE Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 2, pp. 1163-1167, 1998
- [3] Reatti A, "Low-cost high power-density electronic ballast for automotive HID lamp", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 15, No. 2, pp. 361-368, 2000
- [4] Benyaakov S, "Design and Performance of An Electronic Ballast for High-Pressure Sodium (HPS) Lamps", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 4, pp. 486-491, 1997
- [5] Kaiser W, "Hybrid Electronic Ballast Operating The HPS Lamp At Constant Power", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 2, pp. 319-324, 1998
- [6] 김기정, 박종연, "메탈할라이드 방전관 내의 음향 공명을 감소시킨 전자식 안정기 설계", 전력전자학회 논문지, 제4권, 제5호, pp. 405-412, 1999.
- [7] Ichirou Oota, "A High Efficiency Power Control Circuit for Metal Halide Lamp", Pro. of the IEEE Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 2, pp. 1168-1173, 1998
- [8] J. M. Alonso, "A Comparison of LCC and LC Filters for its Application in Electronic Ballast for Metal-Halide Lamps", Pro. of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, pp. 114-119, 2001
- [9] H. Kakehashi, "HID-Lamp Igniter Using A Two-Stage Magnetic-Pulse-Compression Circuit", Pro. of the IEEE Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 2, pp. 1174-1178, 1998