

고압 방전등(HID) 안정기 기술 동향

이 치 환

(위덕대 전자공학부 교수)

1. 서론

HID 자기식 안정기는 높은 전류 THD, 전력손실, 램프 수명단축 등 많은 문제점을 가지고 있으며, 전자식 안정기의 적용으로 자기식의 단점들을 해결할 수 있다. CWA(constant wattage autotransformer) 자기식 안정기는 안정기 효율 약 86(%)이며 250(W) 출력에서 50(W) 손실을 가진다. 전자식 안정기는 92~96(%) 효율을 가지며 출력이 큰 경우에 너지 절감 효과가 극대화된다. 또한 적절한 ignition 고전압과 정전력 제어특성은 HID의 수명을 2배 이상 연장하게 된다. 형광등은 높은 주파수 구동으로 30(%) 이상의 광속 개선이 발생하지만, HID는 고주파 구동에서 발광효율이 상승되지 않는다.

HID 전자식 안정기는 반도체 소자가 발명된 후, 1960년대 트랜지스터로 고주파 전원을 구현하여 시도하였으며, 구동주파수에 대한 점등특성 등이 연구되었다. 일반적으로 알려진 전자식 안정기의 문제는 음향공명이며 70~80년대에 많은 연구가 진행되었고 90년대에는 음향공명의 실용적 해결 방법과 전자식 안정기 제품들이 출시되기도 하였다. 그러나 초기에는, HID 램프의 강한 비선형 특성을 고려하지 못한 결과, 조건에 따라 불안한 점등특성과 신뢰성 확보에 실패하였다. 정격전압 130(V)인 메탈 램프를 중심으로 제품들이 출시되었으며 이것은 약 300(V)의 DC bus 전압에서 half-bridge 구현이 용이하기 때문이다. HID 나트륨 램프는 램프전압이 90(V) 전후이므로 안정기 손실개선에 어려움이 따르며 수명 말기의 사이클링 현상을 개선하는 것이 난제이다.

Dimming에 대한 램프 수명과의 관계 등도 연구되고 있다. 제어 IC는 형광등과 35(W) 자동차용을 중심으로 발표되고 있으나 HID가 요구하는 다양한 기능을 구현한 범용 IC는 아직 보이지 않고 있다. 대부분의 출시된 제품들은 독자적인 아

날로그 회로나 마이크로프로세서를 포함한다.

2. HID 램프 특성

HID 램프는 나트륨 램프와 메탈 램프로 크게 구분된다. 노란색을 발광하는 나트륨 램프는 ignition 후, 20(V)에서부터 램프전압이 상승하여 정격전압 90(V)에 도달한다. 사용시간에 따라 정격 램프전압이 점차적으로 상승하여 약 150(V)에서 수명말기가 된다. 안정기에서 높은 전압을 인가하지 못하면 램프는 소등되고 냉각 후 재점등을 반복하는 사이클링 현상을 일으킨다. 고주파 구동시 램프전압, 전류의 비선형성은 사라지고 순수 저항으로 모델링 할 수 있다. 나트륨 램프는 음향공명 현상이 대부분의 주파수 대역에서 발생하지 않는다.

메탈 램프는 MH, HQI, UHP 등으로 많은 종류가 있으며 ignition전압에 차이를 보인다. 그러나 ignition 후 램프 특성은 유사하다. 가로등에 사용되는 보조전극을 포함한 MH 램프는 램프 전압이 130(V) 부근이며 사용시간에 따른 램프전압의 변화는 미소하다. 그러나 램프는 점등 후 일정전압을 유지하는 제너특성을 나타낸다. 수명말기에는 전극의 흑화현상으로 광속이 감소하게 된다. 적절한 ignition으로 수명이 연장될 수 있으며, 1991년 Osram에서 발표된 연구 결과는 HQI 70(W)를 자기식 안정기로 3,000시간에서 평균 광속 80(%)를 보였으며, 전자식 안정기에서는 12,000시간 이상에서 평균 광속 80(%)를 보였다. 미국에서 판매되는 DynaVision 안정기는 8,000시간에서 광속유지 86(%)를 보장한다. 자기식 안정기는 광속 유지 64(%)를 보인다. 그러나 램프에 대한 수명연장 방법 및 장수명 램프에 대한 구체적 분석과 연구는 시도되지 않고 있다.

메탈 램프의 음향공명을 발생시키는 주파수 대역에 대한 연구는 많이 이루어졌으나 실제적인 안정기 구성에 영향을 미치

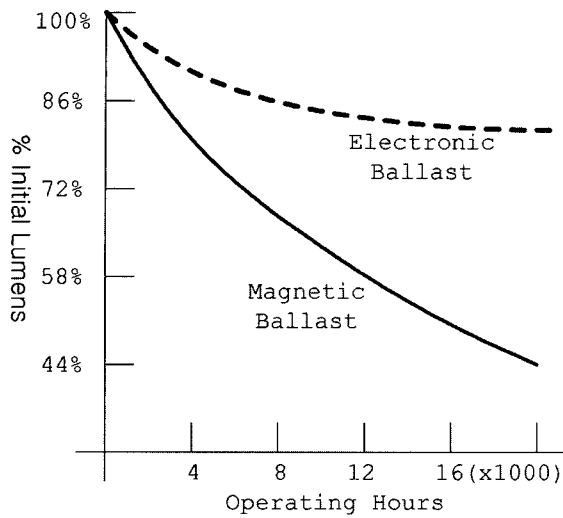


그림 1 광속 유지 특성 비교

는 중요한 기술적 내용은 부족하였다. 음향공명을 피하기 위해 100(kHz)이상에서 구동하거나, 구동주파수를 순시적으로 변화시키는 방법 및 400(Hz) 구형파로 구동하는 방법 등이 사용되고 있다.

3. 안정기 구성

HID 안정기는 PFC, 인버터 및 고압펄스발생기로 이루어진다. 입력전류 THD 개선을 위해 사용되는 PFC는 안정기의 효율을 결정하는 중요한 부분이다. 출력전력은 초기방전 시 약 30(%)에서 시작되며 재점등이 필요한 경우, 수 분간 무부하상태가 된다. 넓은 동작범위에도 안정된 제어특성이 요구되며 램프전압의 변화에 따라 DC bus 전압이 제어되는 구조가 필요하다.

DC bus 전압은 인버터의 출력 전압과 직접적인 관계가 있으므로 인버터 부분의 최적화에 관여한다. PFC 출력인 DC bus 전압을 제어 할 수 있는 SEPIC 구조가 시도된 경우도 있다. Boost 구조에서도 THD 개선을 위해 average current

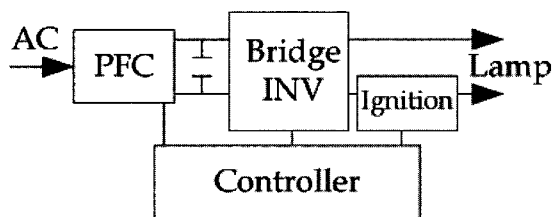


그림 2 전자식 안정기 구성

mode를 이용하기도 한다. 그러나 안정기의 효율을 높이기 위해서는 전통적인 ZCS Boost가 가장 적절하다고 생각된다. 과거에는 Valley-Fill 정류회로를 사용한 경우도 있으나 10(%) 이하의 전류 THD를 얻기에는 무리가 따른다.

음향공명을 제거하기 위해 400(Hz) 구형파로 구동하는 경우, 인버터는 full-bridge로 구성하며 400(Hz) 주기의 교번 동작 및 램프전류를 제어 하기위해 PWM을 동시에 수행한다. 인버터 앞단에 Buck 컨버터를 사용하여 400(Hz) 교번만 행할 수도 있다.

인버터는 전력스위치 4개에 콘덴서를 추가하고 ZVS 동작을 얻어낸다. 출력에 직렬로 연결된 인덕터는 방전전압을 받

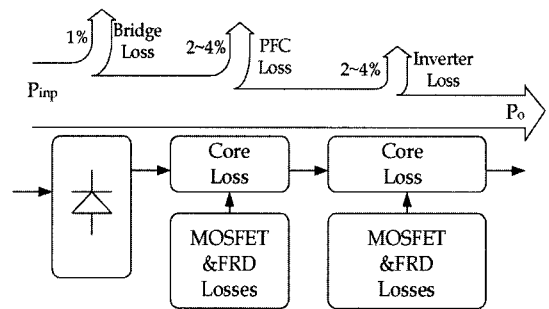


그림 3 안정기 손실 분포

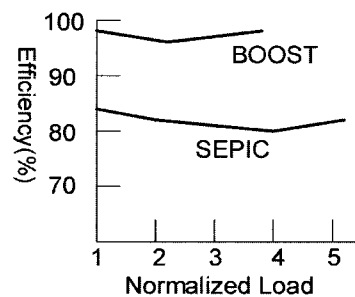


그림 4 PFC 효율비교

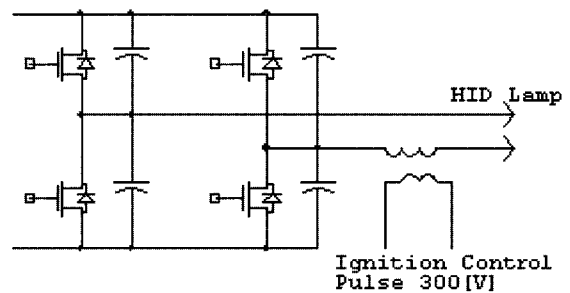


그림 5 400(Hz) 인버터

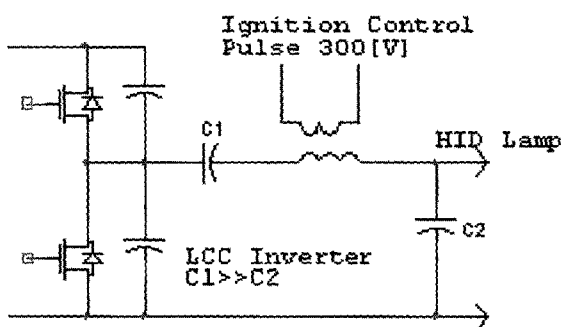


그림 6 고주파 인버터

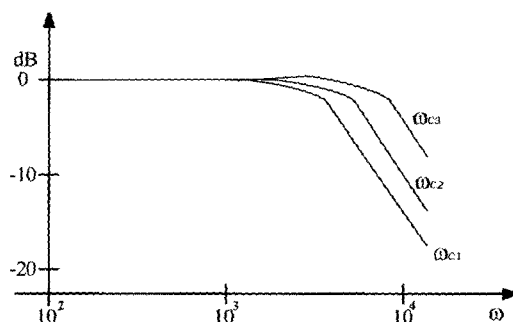


그림 7 공진인버터 출력전류 보드선도

생시키고 램프전류 제어용으로 사용된다. 인덕터 2차에 300[V] 펄스를 인가하여 6[kV] 정도를 쉽게 얻을 수 있다. 인덕턴스가 클 경우 많은 손실을 수반하므로 테슬라 코일 형태를 도입하기도 한다. 출력전력이 적을 경우 전해 콘덴서를 사용한 half-bridge 구성도 가능하다. 제어용 IC로 Philips UBA2032가 있으며 자체 발진과 full-bridge 구동이 가능하지만 인버터 전단에서 Buck으로 전압을 제어해야 된다. 여러 종류의 제어 IC가 출시되어 있으나 ignition, warm-up, dimming, 정전류 특성 등 HID가 요구하는 기능을 가지지 못하고 있다. 이것은 HID 특성이 비선형이며 아날로그 회로를 이용한 제어기능에 한계가 있기 때문이다. 전달함수는 인덕터와 램프를 포함하여 1차함수로 주어진다. 전류제어기는 PI제어기로 충분하다.

고주파로 직접 구동하는 경우 LC 공진인버터로 구성하며, 400[Hz] 인버터에 비해 제어의 단순성과 큰 전력에서도 half-bridge 구성이 가능하다. Ignition은 공진 인덕터를 이용하거나 LCC 구성으로 C2를 삽입하여 3[kV] 정도를 얻을 수 있다. 보조전극을 가지는 MH 램프는 방전개시를 위해 수 10[us]의 고전압을 인가해야 하므로 LCC 로 구성한다. 2개의 주 전극만 가지는 MH, HQI, UHP 등은 공진 인덕터 2차를 이용하는 것이 유리하다. LCC 구성으로는 전력소자 전류 한계로 2~3[kV]가 최대이며 이것은 HQI를 구동하기에는 무리이다. 보조전극 MH 램프의 경우 LCC는 유용한 방식이나, 2전극 HID에 적용하는 경우, ignition 후 짧은 시간 과도한 방전전류를 흐르게 한다.

공진인버터는 공진곡선으로 출력이 결정되며, 구동주파수로 출력전류를 제어하므로 단락 등의 사고에 대해 안정된 제어성능을 보인다. 공진 인버터의 주파수 제어에 대한 전류 전달함수는 complex phasor transformation으로 해석 할 수 있으며 램프의 등가저항과 공진 L, C를 결정하면 선형화된 전달함수가 얻어진다. 공진주파수와 구동주파수가 많은 차이가 있으면 2차 함수로 나타나며, 근접한 경우 1차 함수로 모델링 된다.

$$\frac{\Delta I}{\Delta w_c} = K \left\{ \frac{s + \frac{R}{2L}}{\left(s + \frac{R}{2L}\right)^2 + (w_c - w_0)^2} \right\} \quad (1)$$

여기서 w_c 는 구동주파수, w_0 는 공진주파수이다.

IR2167은 Boost PFC와 LCC half-bridge drive를 포함한 IC이다. 이 IC는 형광등을 기준으로 설계되어 HID의 다양한 구동 조건을 만족시키지는 못하는 것으로 파악된다. 고주파에서 발생하는 음향공명에 대한 대처 방법도 제시되지 않았으며 재점등 과정 등의 기능은 외부에 추가하여야 한다.

4. 출력제어: Dimming

HID 램프의 dimming은 에너지 절약과 연계하여 많은 연구가 진행되고 있다. 자기식 안정기에서는 dimming을 위해 입력전압을 조정하여야 하지만, 전자식 안정기에서는 쉽게 구현 할 수 있다. 그러나 HID에서의 dimming은 출력에 따라 색온도가 변화하며 광효율 감소가 따른다.

Dimming 동작은 주어진 램프의 최적 동작점을 벗어나는 것이므로 발광효율이 감소하게 된다. HPS 램프는 구동전력이 감소되면 램프전압, 전류가 함께 줄어들게 되므로 등가저항의 변화범위는 크지 않다. 반면, MH 램프는 구동전력에 대해 램프 전압이 변하지 않는 특성을 보인다. Dimming시 감소되는 발광효율은 전력감소에 따라 급격하게 낮아지게 된다. 60[%] 전력을 램프에 공급하면 약 40[%] 광속이 얻어진다. Dimming시 광속 응답은 약 1분 이내에 얻어진다. 여러 연구결과로부터, 짧은 시간의 dimming은 램프의 수명에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 50[%] dimming을 5시간 이상 지속하면 수명에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 최초 점등 시 램프 전극의 온도를 상승시키기 위해 100[%] 출력상태를 10분 이상 유지해야 하며 50[%] 이하의 dimming은 사용하지 않는다.

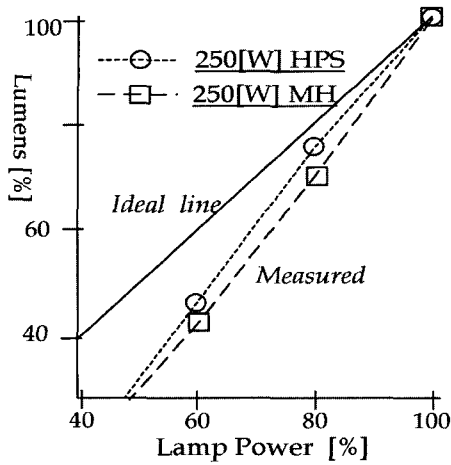


그림 8 Dimming 발광효율(250(W) 램프)

Ethernet 및 CAN 등의 네트워크가 발달되어 있으나 조명 설비의 네트워크는 DALI(Digitally Addressable Lighting Interface)를 중심으로 전개되고 있다. 저렴한 비용으로 구성할 수 있으며 on, off, dimming 및 감시를 행하고 두 가닥의 전선이 multi-drop으로 연결된다.

5. EMI 대책

전자식 안정기에 발생하는 EMI는 PFC의 MOSFET이 주원인이다. 인버터의 스위칭은 ZVS 동작으로 낮은 EMI 수준을 유지할 수 있다. Boost PFC의 MOSFET은 off시 FRD의 on time까지 큰 전압펄스를 만들고 정전 결합된 방열판-접지-교류입력선의 경로로 공통모드 EMI를 발생한다. 인버터에서 발생하는 전압펄스도 방열판 경로를 통하여 EMI가 발생한다. 이때 연결된 도체의 길이와 상호간의 정전용량으로 매우 복잡한 기생진동을 수반하며 수10(MHz)에 걸쳐 나타난다. 이러한 넓은 대역에 분포된 EMI는 필터로 제한하면 특정 주파수 대역은 감소하지만 다른 대역에서 상승하는 경우가 많이 있다.

수(MHz) 이상의 고조파는 EMI 필터로 해결하기에는 역부족이며 발생하는 기생진동을 줄여야 한다. 전통적으로 fine ceramic으로 소자와 방열판과의 이격거리를 크게 하거나, Faraday shield를 설치한다. 적절한 Faraday shield는 20(dB)이상의 감쇄를 얻을 수 있다. ZCS Boost PFC는 입력전류에 낮은 주파수의 고조파를 심각하게 발생시키므로,

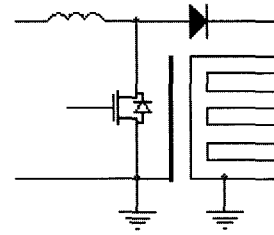


그림 9 Faraday shield

수 100(kHz) EMI 감쇄를 위해 교류입력에 PFC 스위칭 주파수에 대응하는 LC 필터를 설치해야 한다.

교류입력에서 관측되는 EMI 60(dBuV)는 1(mV)의 크기로 오실로스코프로 관측하기에 무리가 있다. 70(dBuV) 이상은 고역통과필터를 이용하여 관측가능하며 PFC 및 인버터 스위칭 동작과 관련된 기생진동을 확인 할 수 있고 회로 debugging이 가능하다.

6. 결론

HID 전자식 안정기는 램프의 복잡한 동작 특성과 신뢰성 등으로 인하여 아직 시장 점유율이 커지 않은 상황이다. 가로 등 전자식 안정기는 400(W)까지 출시되어 있으며 특수조명용은 1~2(kW)도 있다. 에너지 절감과 설치된 램프의 유지비용을 고려할 때, 앞으로 전자식 안정기가 일반화될 것으로 기대된다. 안정기의 설계기술은 정착되었으나 전자식 안정기를 위한 HID 램프의 모델링과 수명연장, 색온도 특성 등이 계속 연구되어야 할 것이다. 마이크로프로세서를 채용하여 램프를 자동으로 인식하고 구동하는 기능, 원격 감시, 원격 dimming 등의 네트워크, 수명말기 예측 등의 기능들이 구현된 유비쿼터서 안정기가 기대된다. ■

<저 자 소 개>



이치환(李治煥)

1984년 영남대 전자공학과 졸업. 1988년 경북대전자공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1998년~현재 위덕대 전자공학부 교수.