

컴팩트 형광램프용 조도제어형 전자식 안정기의 설계와 해석

김종길, 손영대
 동서대학교 전자공학과

Analysis and Design of Dimming Electronic Ballast for a Compact Fluorescent Lamps

Jong-Kil Kim, Young-Dae Son
 Dept. of Electronics Engineering, Dongseo Univ.

Abstract - 본 논문에서는 컴팩트 형광램프용 조도제어형 전자식 안정기의 각 동작 모드별 해석과 설계 및 실험적 고찰을 제시한다. 부스트 컨버터와 해프브리지형 고주파 공진형 인버터를 결합한 일단계 인버터 안정기를 제안하고 그 기본동작 및 특성에 관해 검토한다.

역률을 높이기 위한 방법으로 부스트단에서는 전류불연속 모드로 동작하도록 하였다. 전력 손실을 줄이기 위해 직렬 공진형 인버터는 영전압·영전류 스위칭 방식을 적용하였다. 출력 전압을 조정할 수 있도록 설계하여 조도 제어를 구현하였으며 다단계의 조도제어가 가능해진다.

전자식 안정기 시스템을 구성하기 위한 이론적인 근거를 마련하기 위하여 공진형 인버터를 동작 모드별로 해석하고 그 결과를 토대로 동작주파수 및 회로정수를 결정하며, 실제 전자식 안정기를 제작하여 시동특성과 조광특성을 비교 분석하였다. 36W 형광램프에 대한 실험 결과와 등가회로 모델에 의한 Pspice 시뮬레이션 결과를 토대로 제안한 전자식 안정기의 적용가능성을 입증하였다.

1. 서론

현재 우리 나라 전체 사용 전력의 18% 가량이 조명에 사용되고 있으며 조명용 전력의 80% 이상이 형광등에 사용되고 있다.

대부분의 램프는 부저항 특성을 가지므로, 과도한 전류에 의한 램프 파괴를 막기 위해서는 전류제한을 위한 안정기가 필요하다. 대부분의 전자식 안정기는 고주파에서 동작하는 공진형 인버터로 구현되는데, 그것은 크기와 무게가 매우 작아지고 광효율이 향상되며 명멸(flicker)현상의 감소로 인한 양질의 빛을 공급할 수 있고 소음이 제거되는 등 많은 장점이 있기 때문이다.

전자식 안정기의 고주파 인버터에 매끄러운 직류링크전압을 제공하기 위해서는 상당히 큰 커패시터와 함께 다이오드 브리지 정류기가 필요하다. 이러한 정류회로는 나쁜 역률과 심각한 고조파 왜곡을 야기하는 높은 입력전류가 불가피하게 생성된다. 능동 역률보상기(PFC)를 브리지 정류기와 전자식 안정기의 공진 인버터 사이에 삽입하여 이 문제를 경감시킨다. 즉, 불연속 모드로 동작하는 부스터 컨버터에 기초한 역률보상이 이루어진다. 그러나, 이러한 일단계 전력 처리단을 사용하게 되면 비용이 증가하고 신뢰성이 감소하며, 또한 시스템 구성이 복잡하게 되고, 시스템 효율이 낮아지게 되며 마찬가지로 크기도 상당히 커지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일단계 전력처리단에 기초한 전자식 안정기가 여러 논문에서 제시되고 있다[2,3].

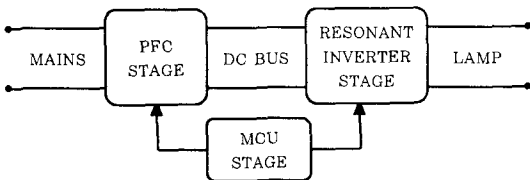


그림 1. 전자식 안정기의 블록도

본 논문에서는 일단계 전력처리단에 기초하여 부스터 컨버터와 공진점 이상에서 동작하는 해프브리지 병렬부하 직렬공진 인버터(Parallel Loaded Series Resonant Inverter: PLSRI)를 결합하여 컴팩트 형광등을 구동하기 위한 고역률 안정기를 제시한다. 그 구성을 그림 1에 나타내었다. MCU stage는 소프트 점등을 위한 스위칭 신호를 만들어낸다.

제안된 일단계 안정기는 종래의 2단계 안정기보다 제어기가 간단하고, 크기가 작으며 신뢰성이 높다.

2. 일단계 전자식 안정기의 해석 및 설계

그림 2에 역률보상부(PFC)와 램프 구동 인버터부가 결합된 제안된 일단계 안정기(Single-Stage Ballast : SSB) 회로를 나타내었다. 역률보상부는 불연속 전류모드(DCM)에서 동작하는 부스터 컨버터로 구성되어 있다. 불연속전류 모드에서 동작하는 부스터 컨버터는 저항 애플레이터의 성질을 가지므로 듀티비와 스위칭 주파수가 일정할 때 입력전류의 평균값은 자동적으로 정현 선전압을 따르게 되고 교류 입력측의 고역률을 보충하게 된다. 해프브리지 PLSRI는 이러한 구성에서 램프를 구동하기 위해 사용된다. 그러므로, 스위치 M_2 는 부스터단뿐만 아니라 또한 PLSRI단의 성질을 가진다. 램프와 병렬 연결된 커패시터 C_p 는 램프 시동용이며, 공진 커패시터 C_s 보다 훨씬 큰 값을 갖는 직류차단 커패시터 C_b 의 전압 리플은 무시한다. 두 개의 전력 스위치는 50kHz~100kHz의 스위칭주파수에서 50%의 듀티비로 교대로 턴온·오프된다. MCU에서 이 스위칭을 담당한다.

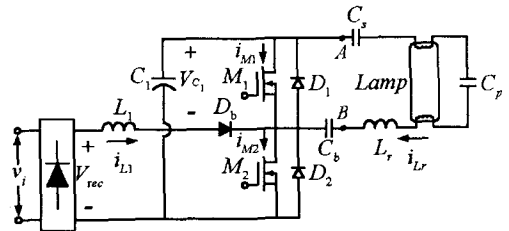


그림 2. 제안된 일단계 안정기

제안된 일단계 전자식 안정기는 부스트 역률보상단과 램프구동 인버터단으로 나누어 해석할 수 있으며, 각 단의 경계조건을 고려한 전체 안정기의 해석 결과를 일단계 전자식 안정기의 설계에 적용할 수 있다.

1) 부스트 역률보상단

그림 3은 그림 2에 보인 부스트 역률보상단 등가회로를 나타내며, 램프구동 인버터단은 하나의 블록으로 나타내었다. 부스트 역률보상단은 불연속모드로 동작시 고역률을 얻을 수 있으며, M_2 가 턴 온 될 때 영전류 스위칭(ZCS)로 동작한다. 커패시터 C_1 는 순시 선전압이 영이 될 때 충분한 전압레벨을 유지할 수 있도록 커야 한다. 부스트 역률보상단의 주 설계 파라미터는 부스터 인덕턴스이며, 이를 구하기 위해 다음의 과정을 거친다.

인덕터 L_1 에 흐르는 전류피크의 포락선은 다음 식과 같이 입력 선전압 $v_i = V_m \sin \omega t$ (V_m 은 입력 선전압의 최대값)의 파형을 따르게 된다.

$$i_{L1(\text{peak})} = (V_m \cdot DT_s) / L_1 \cdot |\sin \omega t| \quad (1)$$

여기서 T_s 는 스위칭 사이클의 주기이고, D 는 듀티비를 나타내며, ω 는 전원 주파수이다.

식 (1)로부터 피크 인덕터전류는 정현적으로 변화함을 알 수 있다. M_2 가 턴오프시, L_1 을 흐르는 전류는 출력 쪽으로 방전되면서 서서히 감소한다. 방전시간 T_d 는 다음 식과 같다.

$$T_d = V_m T_{on} / (V_{c1} - V_m) \quad (2)$$

불연속 모드로 동작시 $T_d \leq (1-D)T_s$ 이므로 듀티비는 불연속 인덕터 전류를 형성하기 위해 $1-\delta$ 보다 작거나 같아야 한다.

$$D \leq 1 - \delta \quad (3)$$

여기서, $\delta = V_m / V_{c1}$ 이고 V_{c1} 은 그림 3에 나타난 직류링 크전압이다. 그러므로, $1-\delta$ 의 최대치는 적어도 0.5이어야 한다. 직류링크전압은 교류입력 피크전압의 두배보다 작거나 작아야 한다[1]. δ 는 각단의 관계에서 중요한 역할을 하고, δ 가 작아질수록 선전류의 파형은 더욱 정현적이 되며 역률도 높아진다. 턴온시간과 방전시간동안의 평균 인덕터 전류로 구성된 평균 선전류는 다음 식과 같다.

$$i_{i(\text{avg})} = \frac{(T_{on} + T_d) \cdot I_m}{2T_s} = \frac{I_m}{2} \left(\frac{DV_{c1}}{V_{c1} - V_m} \right) = D^2 T_s / 2L_1 \cdot V_m / (1 - \delta) \quad (4)$$

또한, 부스트단에 유입되는 한 주기당 평균 입력전력은 다음 식과 같다.

$$P_{i(\text{avg})} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_m \cdot i_{i(\text{avg})} \cdot \sin^2 \omega t \, dt = V_m^2 / 4L_1 \cdot D^2 T_s / (1 - \delta) \quad (5)$$

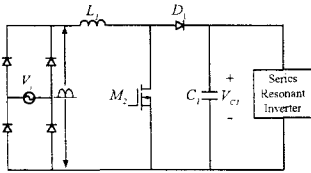


그림 3. 부스트단의 등가회로

만약 입력전력 $P_{i(\text{avg})}$ 이 인버터단에 흡수되는 전력과 같다면, 직류링크전압 V_{c1} 은 일정하게 유지될 수 있다. 그러므로, 입력전력을 램프로 입력되는 전력과 같게 두면 다음 식과 같이 부스트 역률보상단의 인덕턴스 값을 구할 수 있다.

$$L_1 = 1 / (1 - \delta) \cdot (V_m^2 \cdot D^2) / (4P_o \cdot f_s) \quad (6)$$

여기서, P_o 는 램프 입력전력, f_s 는 스위칭 주파수이다.

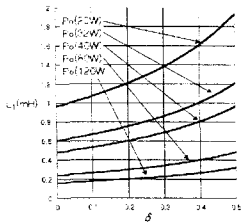


그림 4. 부스트단의 인덕턴스

그림 4에 부스터 인덕턴스가 식(6)에 의해 주어진 δ 와 P_o 의 함수로 나타내었다.

2) 해프브리지 PLSRI단

인버터단에서의 주된 설계 파라미터는 공진성분이다. 그림 5 (a)에 해프브리지 PLSRI의 기본 회로를, (b)에는 해석을 위한 등가회로를 나타내었다. 그림 2에서 커

패시터 C_1 은 그것의 전압 V_{c1} 이 스위칭 주기동안에 일정하게 유지되도록 충분히 커야 한다. 그러므로 이 인버터를 해석하기 위해서 그림 1에 나타난 회로를 그림 5 (a), (b)와 같이 간략하게 할 수 있다.

점등되기 전에 램프 저항 R_{lamp} 는 매우 크고, 개방 회로로 모델화 할 수 있고, 점등 후에는 병렬로 연결된 C_p 와 R_{lamp} 의 임피던스 의해 저항성분이 매우 낮아진다. 그러므로, 정상상태에서 R_{lamp} 는 공진성분 L_r 과 C_s 로 이루어진 직렬 회로로 구성되는 선형저항으로 모델링 할 수 있다. 전력 스위치 M_1/D_1 과 M_2/D_2 는 이상적이고 스위칭 주파수 f_s 로 각각 상보적으로 동작한다는 가정 하에, A와 B점을 교차하는 전압 v_{AB} 는 구형파 형태로 나타난다.

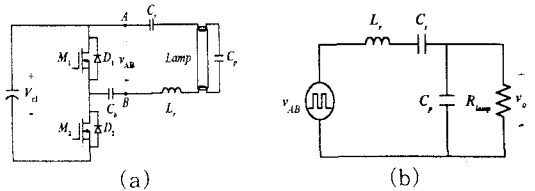


그림 5. (a) 해프브리지 직렬 공진 인버터 (b) 해석적인 등가회로

그러므로, LC 직렬 공진 인버터의 동작은 그림 5(b)에 나타난 것과 같이 v_{AB} 의 구형파 전압에 의해 구동되는 선형회로로 등가화 할 수 있다. LC공진회로에 의해 고조파성분이 자연적으로 필터링 되므로 공진회로에서 파형은 사인형태이고, 다만 기본적인 입력 전압만 중요하다. 그림 5(b)에 나타난 직렬 공진회로는 다음 식으로 나타낼 수 있다:

$$f_r = 1 / 2\pi \sqrt{L_r C_s} : \text{Resonant frequency} \quad (7)$$

$$Q_s = \omega_o L_r / R_{lamp} : \text{Quality factor} \quad (8)$$

공진회로에 공급되는 기본파 성분은 푸리에 분석에 의해 다음 식으로 얻을 수 있다:

$$v_1 = 2V_{c1} / \pi \cdot \sin(2\pi f_s t) \quad (9)$$

그림 5 (b)로부터, 주파수 영역에서 전압 분배 법칙을 이용하여 전압 이득을 다음으로 구할 수 있다:

$$G_V = V_o / V_{c1}(j\omega) = 1 / [1 + C_p / C_s (1 - f_u^2) + jQ_s (f_u - 1/f_u)] \quad (10)$$

여기서, $f_u = f_s / f_r$ (주파수 비)이다.

또한, v_{AB} 의 기본파를 위상기준으로 할 때 회로 임피던스의 역수의 위상이 공진탱크전류의 위상이 되며 아래 식과 같다.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{C_p}{C_s} \frac{f_u}{Q_s} \right) - \tan^{-1} \left[\frac{Q_s (f_u - 1/f_u)}{1 + C_p / C_s (1 - f_u^2)} \right] \quad (11)$$

그림 6에 $C_s = C_p$ 에 대한 해프브리지 PLSRI의 전압이득과 v_{AB} 를 기준으로 한 공진전류의 위상을 나타내었다.

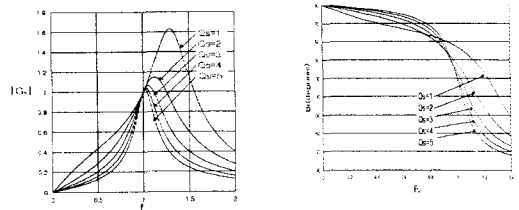


그림 6. 해프브리지 PLSRI의 전압이득 및 전류위상

3) 소프트 점등(MCU Stage)

램프가 점등하기 위해서는 수백 볼트 정도의 충분한 점등 개시 전압을 제공해야 한다. 또한 램프의 수명을 연장하기 위해 필라멘터에 예열전류를 흘려 점등시 필요한 초기 방전전압을 낮추어 소프트 점등이 이루어지도록 하였

다. 점등전 램프 임피던스는 매우 높으므로 스위칭 주파수를 공진주파수보다 높은점에서 발생시키면, 이 시점에서 인버터의 출력전압은 충분한 점등 개시전압이 발생하지 않으므로 램프의 전극을 예열한다. 이때 스위칭주파수를 정상동작 주파수까지 서서히 감소시키면 램프는 소프트 점등이 이루어지고 임피던스는 빠르게 감소한다. 점등 후 스위칭주파수를 가변함으로써 조도를 제어할 수 있다.

그림 7에 MCU 프로그램 순서도를 나타내었다. 먼저 start 스위치를 입력시키면 스위칭 주파수는 소프트 점등이 이루어지는 주파수를 발생하고 서서히 감소하여 램프가 점등될 수 있는 최소 주파수까지 감소된다. 그 후에 최대 주파수와 최소주파수까지 점차적으로 가변할 수 있도록 하였다.

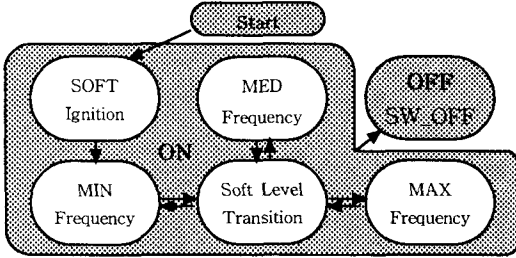


그림 7. MCU 프로그램 순서도

3. 설계 과정

제안한 역률보상 기능을 갖는 일단계 전자식 안정기의 설계과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 안정기의 스위칭 주파수 f_s 의 결정 : 이 값은 스위치 M_1 이 영전압 스위칭이 되도록 선택되며, 식 (7)로부터 공진요소 값을 설계하는 기준이 된다.
- 2) 부스트단의 전압 변환비 δ 의 선택 : 스위칭 소자에 걸리는 전압 스트레스를 최소화하기 위해 직류링크 전압 V_{C1} 은 가능한 낮아야 하지만, 불연속 동작모드를 보증하기 위해 충분히 커야 한다.
- 3) 듀티비 D 의 선택 : 이 값은 부스트단의 스위치 M_2 가 턴온시 영전류 스위칭이 되는 불연속 동작모드와 PLSRI단의 M_1 이 턴온시 영전압 스위칭이 되는 공진점 이상의 동작을 동시에 만족하는 값이어야 한다.
- 4) 식 (6)에 의한 boost semi-stage의 인덕턴스 값 결정 한다.

4. 실험 결과

본 연구에서는 입력 규격을 만족하는 제안한 일단계 안정기 모델을 3절에서 설명한 설계과정에 따라 직접 구현하여 설계된 시스템의 개념과 실험가능성을 입증하였다. 그림 8에 PSpice 시뮬레이션 결과를 나타내었고 그림 9에는 실험 파형을 나타내었다.

부스트단의 피크 인덕터 전류는 그림 9(a)에서 정현적으로 변화함을 알 수 있다(그림 8의 i_{L1}). 또한 그림 9(c)는 스위치 M_1 이 턴 온 될 때 ZVS가 이루어짐을 나타낸다. 스위치 M_2 가 턴 온 될 때 ZCS가 되는 것을 그림 8 (e)에서 확인할 수 있다. 그림 8(d)에서 선전압과 선전류가 거의 동위상이므로 역률이 1에 가까운 것을 알 수 있다. 각 실험파형은 이론적인 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 부스터 컨버터와 병렬부하 직렬공진 인버터를 결합한 일단계 인버터 안정기를 제시하였다. 종래의 이단계 안정기 각단에서 독립적으로 동작하던 스위치들이 결합되어 SSB를 구성한다. 높은 입력 역률은 불연속 전류모드에서 동작하는 부스트 semi-stage에 의해 얻을 수 있고 입력전류는 자연적으로 사인 입력전압의 형태로 나타난다. 이것은 적은 비용으로 높은 역률을 얻기 위한 간단하고 효과적인 방법이다. 직렬 공진 인버터는 형광램

프를 구동하고, 특히 능동 스위치는 다른 스위치가 영전류 스위칭 동작 동안에 영전압 스위칭으로 동작한다. 그러므로 안정기의 효율이 증가하게 된다. 36W 형광램프에 대해 설계 과정에 따라 시스템을 제작하였다. 50kHz의 스위칭 주파수와 110V 입력전원에서 실험 결과를 얻었다. 그 결과 설계된 시스템의 타당성 확인할 수 있었다.

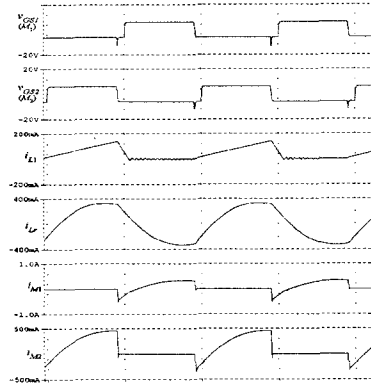


그림 8. 시뮬레이션 결과

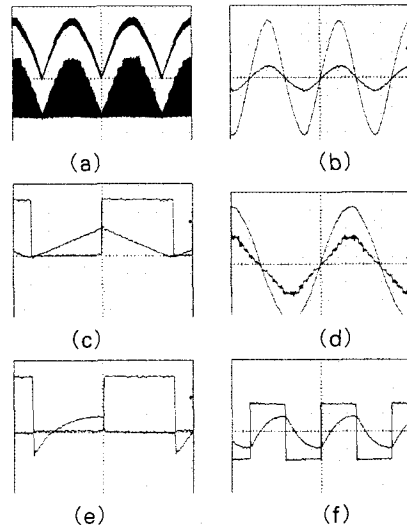


그림 9. 실험파형 (a) 정류된 AC 입력전압 및 boost semi-stage 인덕터 전류, (b) 램프 전압 및 전류, (c) 스위치 M_2 의 V_{M2} 및 i_{L1} (ZCS), (d) 선전압 및 선전류, (e) 스위치 M_1 의 V_{M1} 및 i_{b1} (ZVS), (f) 램프전압 및 공진 전류 (* (a)~(b) : 50V/div., 200mA/div. (c)~(e) : 50V/div., 100mA/div.)

[참고 문헌]

- [1] Kwang-Hwa Liu and Yung-Lin Lin, "Current Waveform Distortion in Power Factor Correction Circuits Employing Discontinuous Mode Boost Converters", *IEEE PESC'89*, pp.825~829, 1989.
- [2] T.-F. Wu, M.-C. Chiang and E.-B. Chang, "Analysis and Design of a High Power Factor, Single-Stage Electronic Ballast with Dimming Feature", *IEEE APEC'97*, pp.1030~1036, 1997.
- [3] J. L. Freitas Vieira, Marcio A. Co and Luciano D. Zorzal, "High Power Factor Electronic Ballast Based on a Single Power Processing Stage", *IEEE PESC'95*, pp.687~693, 1995.
- [4] J.M.Alonso, J.Ribas, A.J.Calleja, E.López and M.Rico, "Development of An Intelligent Fluorescent Lamp Ballast Based on Neuron Chip", *EPE'97*, Vol.2, pp.315~320, 1997.