

개선된 밸리필과 밸리용 승압형 변환기를 결합한 고역률 형광등용 전자식 안정기

윤용식, 채균, 조규형

대전광역시 유성구 구성동 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과

TEL: 042-869-5424, FAX: 042-869-8024

A Unity Power Factor Electronic Ballast for Fluorescent Lamp having Improved Valley Fill and Valley Boost Converter

Yong-Sik Youn, Gyun Chae and Gyu-Hyeong Cho

Dept. of Electrical Engineering, KAIST, Taejeon, Korea

TEL: +82-42-869-3424, FAX: +82-42-869-3410

Abstract - A new PF correction topology, Improved Valley Fill (IVF) with Valley Boost Converter (VBC) used in the electronic ballast for fluorescent lamp is presented. The IVF can adjust the valley voltage higher than half the peak line voltage. Hence, there is no pulsating line current around the line voltage peak, PF and THD are significantly improved. The VBC is added to the IVF to achieve unity PF and to increase the valley voltage. The measured PF and THD for a prototype electronic ballast are 0.997 and 5%, respectively, and the lamp current CF is as low as 1.5.

1. 서 론

형광등은 백열등에 비하여 큰 부피를 갖지만 발광효율(efficacy, lm/W)이 상당히 높기 때문에 오늘날 인공 조명으로 가장 널리 이용되고 있다. 형광등은 부성저항 특성을 갖기 때문에 안정기를 필요로 하는데, 현재 많이 사용되고 있는 50-60Hz 동작의 전자기식(코일식) 안정기는 부피가 크고 무거우며, 깜박임 및 가청잡음이 있고, 큰 전력손실로 인해 효율이 낮은 단점이 있다. 그러나, 가청주파(20kHz) 이상의 고주파로 동작하는 전자식 안정기는 이와 같은 단점을 갖지 않는다. 고주파 동작으로 깜박임은 발생하지 않고 가청잡음은 제거된다. 또한 인덕터와 커패시터의 크기가 주파수의 증가로 인하여 훨씬 감소하므로 전자식 안정기는 가볍고 작다. 게다가, 50-60Hz 동작에 비하여 고주파에서 형광등의 발광효율이 대략 10% 이상 증가하여 절전 효과를 얻을 수 있다.

최근들어 역률(power factor, PF)과 고조파왜율(total harmonic distortion, THD)에 대한 각종 규제가 강화되면서, 전자식 안정기의 역률개선에 관

하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 역률개선회로는 입력전류파형을 교류전원의 파형과 같도록 하면서 정류기를 통해 직류전압을 만드는 회로이다. 역률개선회로는 크게 수동형과 능동형으로 구분된다. 수동형은 인덕터와 커패시터 또는 다이오드로 구성되어 제어회로가 필요없이 간단하지만, 일반적으로 크고 무겁우며 0.95 이상의 고역률을 얻지는 못한다. 그러나 능동형은 트랜지스터의 스위칭 동작으로 인덕터 전류를 단속하여 교류전원과 거의 같은 모양의 입력전류로 조절하므로 거의 1에 가까운 고역률을 얻을 수 있지만, 트랜지스터의 제어를 위해 복잡한 회로가 필요해지는 단점을 갖는다.

본 논문에서는 전자식 안정기의 역률개선을 위하여 개선된 밸리필(valley-fill) 형태를 제안하였고, 개선된 밸리필 형태에 밸리구간에서만 동작하는 승압형 변환기를 결합한 새로운 방식의 복합형 역률개선회로를 제안하여 0.99 이상의 고역률을 얻었다. 제안된 역률개선회로는 단순히 승압형 변환기를 이용하는 방식보다 간단하고 저가격이며 전력손실이 거의 발생하지 않는 장점을 갖는다.

2. 본 론

2.1 전형적인 밸리필 방식

전형적인 밸리필 방식의 개념적인 회로도, 전파정류되어 만들어진 직류전압과 입력전류 동작 파형을 그림 1에 나타냈다. 교류전원이 브리지 다이오드로 전파정류되어 직류전압이 만들어지면 C1, C2와 D3의 직렬 연결에 전류가 흘러, 같은 값을 갖는 C1, C2는 전파정류전압의 최고치 부분에서 $V_p/2$ 로 각각 충전된다. C1, C2의 방전은 각각 D1, D2를 통해서만 가능하므로, 전파정류전압이 $V_p/2$ 이하로 떨어지기까지는 C1, C2가 방전되지 않는다.

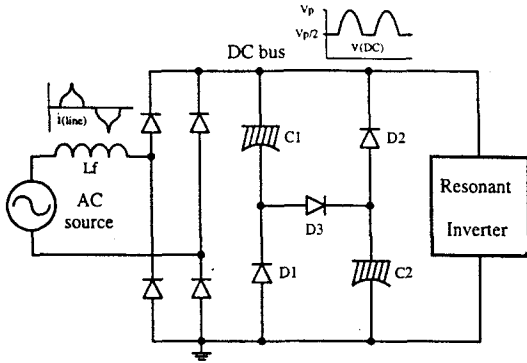


그림 1. 전형적인 밸리필 회로와 전압 전류 파형

따라서, 전파정류전압이 $V_p/2$ 이상에서 C1,C2는 방전되지 않고, 직류전압은 교류전원의 전파정류 파형을 그대로 유지하며 입력전력을 공진형 인버터에 직접 공급한다. 전파정류전압이 $V_p/2$ 이하로 떨어지면, 최저치 부분에서 $V_p/2$ 로 충전된 C1,C2가 각각 D1,D2를 통해 공진형 인버터에 출력전력을 공급하여 직류전압을 $V_p/2$ 로 제한한다. 이 구간에서 출력전력을 공급하며 $V_p/2$ 이하로 방전된 C1,C2는 전파정류전압의 최고치 부분에서 다시 $V_p/2$ 로 각각 충전되는데, 이 때는 그림 1에서 알 수 있듯이 펄스형의 충전전류가 흘러서 역률을 저하시키므로 입력단에 추가적인 저역필터용 인덕터를 필요로 한다. 적절히 추가된 인덕터에 의하여 기존의 밸리필 방식은 최고 0.95의 역률(PF)과 최저 40%의 고조파왜율(THD)을 갖는다.

2.2 개선된 밸리필 형태

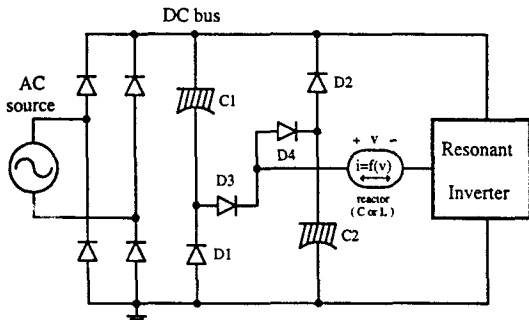


그림 2. 개선된 밸리필 회로

그림 2는 새로운 개선된 밸리필 형태 (IVF) 역률 개선회로의 개념적인 회로도이다. 본질적으로 개선된 밸리필 형태도 밸리필의 구조를 갖기 때문에 기존의 밸리필 방식과 비슷한 동작을 수행한다. 전파정류전압이 $V_p/2$ 이하로 떨어지면, 최저치 부분에서 $V_p/2$ 로 충전된 C1,C2가 각각 D1,D2를 통해 공진형 인버터에 출력전력을 공급하여 직류전압을

$V_p/2$ 로 제한한다. 또한 전파정류전압이 $V_p/2$ 이상에서는 C1,C2가 방전되지 않고, 직류전압은 교류전원의 전파정류 파형을 그대로 유지하며 입력전력을 공진형 인버터에 직접 공급한다. 이 구간에서 개선된 밸리필 형태의 C1과 C2는 공진의 매주기마다 공진형 인버터로부터의 전류에 의해 각각 D3와 D4를 통해 반주기마다 번갈아 충전된다. 여기서 C1,C2가 전파정류전압으로부터 직접 충전되지 않는다는 것은 결국 C1,C2의 충전전압이 항상 전파정류전압의 $V_p/2$ 이상임을 의미한다.

따라서, 개선된 밸리필 형태는 기존의 밸리필과는 달리 직렬 연결된 수동부품의 값을 변화시켜 공진형 인버터로부터의 전류를 제어하여 C1,C2전압 이른바 밸리전압을 $V_p/2$ 이상으로 조절할 수 있다. 또한 개선된 밸리필 형태에서는 직류전압으로부터 C1,C2를 직접적으로 충전하는 것이 불가능하기 때문에 그림 1과 같은 펄스형의 C1,C2 충전전류가 그림 2의 입력전류파형에는 발생하지 않고 입력전원단의 필터용 인덕터가 불필요하다.

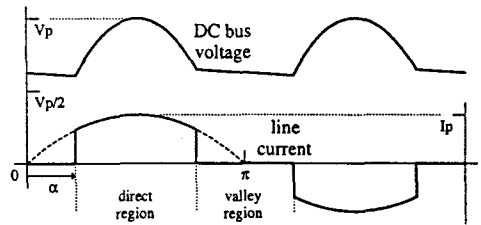


그림 3. 가변의 비도통각을 갖는 개선된 밸리필의 전압 전류 파형

결국 그림 2의 직류전압과 입력전류의 파형은 그림 3에 그려진 바와 같이 밸리 구간의 위상각 α 에 의한 유사정현파로 근사화할 수 있다. 위상각 α 의 변화에 의한 밸리전압과 역률(PF)과 고조파왜율(THD)의 관계는 그림 4와 같이 그려진다. 밸리전압은 최소한 $V_p/2$ 이상이므로 α 는 30° 이상의 값만을 가질 수 있다.

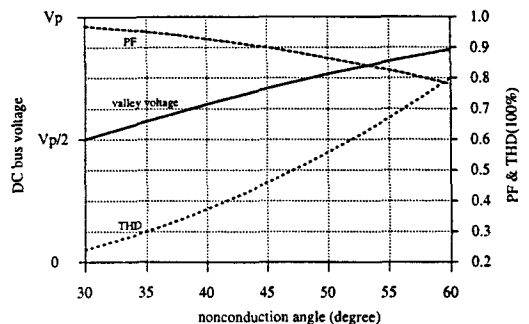


그림 4. 개선된 밸리필에서의 직류전압과 역률 및 고조파왜율

그림 4를 보면 개선된 밸리필 형태의 역률개선회로는 α 가 30° 에서 최대의 역률과 최소의 고조파왜율을 가짐을 알 수 있다. 따라서 적절히 작은 값을 갖는 수동부품을 이용하여 30° 의 α 로 조정하면, 기존의 밸리필 방식과 비교하여 밸리전압은 같은 $V_p/2$ 이지만, 역률이 0.96 이상으로 증가되고 고조파왜율은 25% 정도로 감소될 수 있다.

형광등의 전류파고율(lamp current crest factor)은 이상적인 경우 $\sqrt{2}(=1.4)$ 인데 이 값이 증가할수록 120Hz의 깜박임(flicker)이 발생할 수 있고, 발광효율(efficacy, lm/W) 및 형광등의 수명이 감소하는 경향이 있다. 따라서 형광등의 전류파고율을 최소화하기 위해서는 직류전압의 변동 즉, 밸리전압을 최대한 증가시켜야 하는데 이는 위상각 α 를 증가시킴으로써 가능해진다. 그러나, α 의 증가는 역률을 감소시키고 고조파왜율을 증가시키기 때문에 개선된 밸리필 형태만으로는 밸리전압을 더 이상 증가시키는 것이 그다지 큰 의미를 갖지 못한다.

따라서, 위상각 α 를 증가시켜 밸리전압을 가능한 높이면서도 역률의 저하없이 오히려 거의 1에 가까운 역률을 얻을 수 있도록 하기 위하여, 개선된 밸리필 형태에 입력전류가 0인 밸리 구간에서만 동작하는 밸리용 승압형 변환기(VBC)를 결합하여 새로운 형태의 복합형 역률개선회로를 설계하였다.

2.3 제안된 복합형 역률개선회로

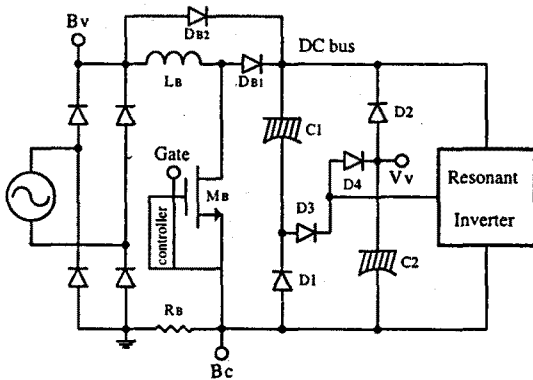


그림 5. 밸리용 승압형 컨버터와 결합된 개선된 밸리필

그림 5는 새로운 복합형 역률개선회로의 개념적인 회로도이다. 그림 5에서는 밸리전압을 가능한 증가시키기 위하여 C1, C2 충전 을 위한 그림 2의 수동부품을 단락시켜 이용하였고, 밸리 구간에서만 동작하는 밸리용 승압형 변환기를 L_b , D_{B1} , M_b 와 새로 설계된 아주 간단한 제어회로로 구성하였다. 한편, 밸리용 승압형 변환기가 동작하지 않는 밸리 이상의 직류전압 구간에서는 추가된 D_{B2} 로 출력전류를 흘림으로써 L_b - D_{B1} 경로에서 발생하는 전력손실을 제거하였다.

입력의 전 구간에서 출력전력을 전달해야 하고 직류전압이 입력전압 최고치의 최소 1.3배 정도는 보장이 되어야 하는 일반적인 승압형 변환기와는 달리, 제안된 밸리용 승압형 변환기는 밸리 구간에서만 동작하고 그 이외의 구간에서는 직류전압이 입력의 전파정류전압파형을 그대로 유지하므로 직류전압의 최고치가 입력전압의 최고치와 같다. 제한된 영역의 동작에 의한 밸리용 승압형 변환기 실효전류의 감소는 소용량 M_b 와 작은 L_b 로도 충분하므로 비용과 크기면에서 우수한 장점을 갖는다. 더욱이 밸리용 승압형 변환기의 작은 실효전류와 밸리 구간의 낮은 전압 영역 동작에 의하여 전력손실이 거의 발생하지 않으므로, L_b 의 전류가 항상 0 이상의 값을 갖는 연속전류형의 제어가 가능하여 입력단의 저역필터가 전혀 필요하지 않다.

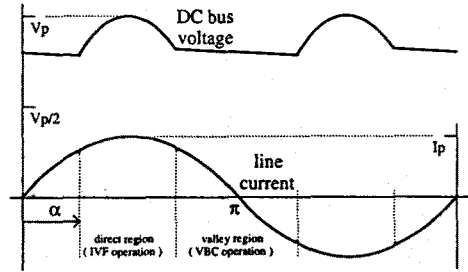


그림 6. 그림 5의 전압 전류 파형

그림 6은 새로운 복합형 역률개선회로의 직류전압과 입력전류의 동작 파형이다. 밸리전압이 전파정류전압의 $V_p/2$ 보다 상당히 높아질 수 있고, 입력전류도 매끄러운 정현파형을 갖는 거의 1의 역률이라는 것을 알 수 있다. 입력전류의 모양이 이와 같은 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 개선된 밸리필 형태에 의하여 펄스형의 C1, C2 충전전류가 발생할 수 없고, 연속전류형으로 제어되는 밸리용 승압형 변환기의 동작에 기인한다.

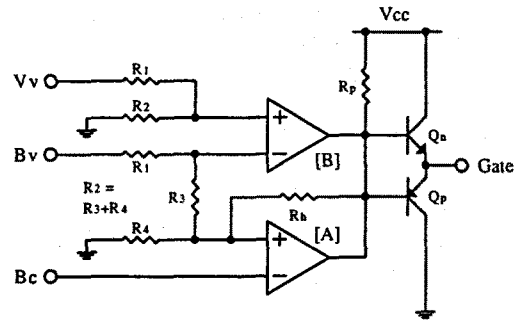


그림 7. 간단한 밸리용 승압형 컨버터 제어기

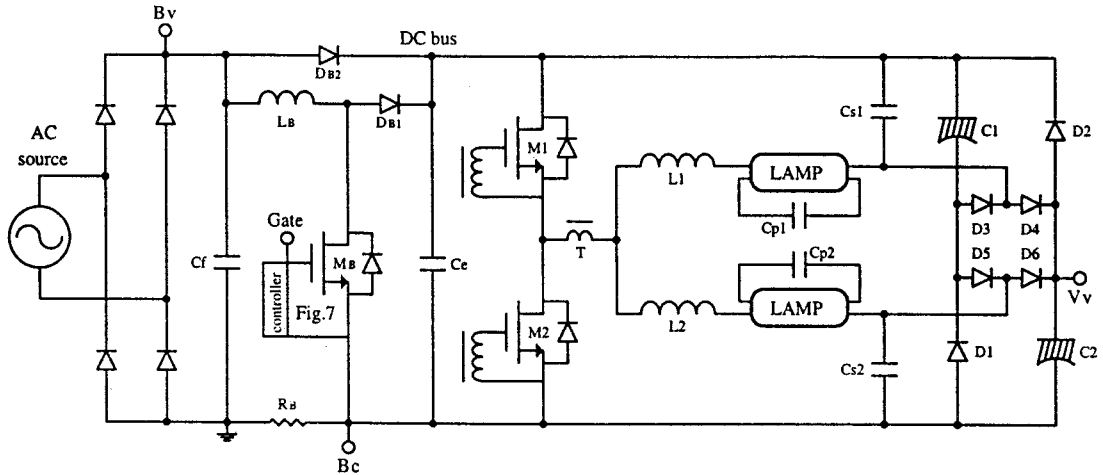


그림 8. 제안된 역률개선회로를 갖는 형광등용 전자식 안정기의 전체 구조도

한편, 입력전류가 0인 밸리 구간에서만 동작하는 승압형 변환기의 스위치(M_B) 제어를 위하여 그림 7과 같이 새로운 형태의 제어회로를 설계하였다. 제어회로의 비교기는 하나의 집적회로(IC)에 두 개의 비교블록이 내장된 (예를들면 LM393-8DIP) 형태를 이용하였다. 일반적으로 승압형 변환기의 제어는 역률개선용 집적회로가 많이 이용되는데, 역률개선용 집적회로는 단가가 비교적 높고 주변의 부가회로가 복잡하여 전체적인 비용이 상당히 증가하는 단점이 있다. 그러나, 제안된 밸리용 승압형 변환기의 제어회로는 단순히 한 개의 범용 집적회로와 수 개의 저항만으로 구성되어 저가격이며 간단하다.

제어회로의 비교블록 A는 감지된 전파정류전압(B_v)과 입력전류(B_c)를 비교하여 전류연속형으로 동작하는 밸리용 승압형 변환기의 스위치(M_B) 제어를 담당하며, 비교블록 B는 감지된 전파정류전압(B_v)과 밸리전압(V_v)을 이용하여 밸리 구간의 제한된 영역에서만 밸리용 승압형 변환기가 동작하는 것을 보장하고, 이를 위하여 A와 B의 출력단이 와이어드앤드(wired-and) 로직으로 접속되었다.

3. 결 론

3.1 실험결과

전형적인 전압원 방식 직렬공진형 인버터에 새로 제안된 복합형 역률개선회로를 결합하여 구현한 40W(F40T12) 형광등용 전자식 안정기의 전체 회로를 그림 8에 그렸다. 공진형 인버터와 개선된 밸리필 형태와의 연결은 C_{S1}과 C_{S2}의 중간점에 직접 접속하여 밸리전압을 가능한 증가시켰고, 두등용이므로 밸리필 형태가 D3~D6로 구성되었다. 밸리용 승압형 변환기의 작은 C_f와 C_e는 전압감지와 공진형 인버터의 안정된 동작을 위하여 추가되었다.

새로 제안된 복합형 역률개선회로를 결합하여 구현한 그림 8의 형광등용 전자식 안정기는 실험실에서 구성되어 측정되었다. 입력 교류전압 220V에서 출력전력 74W를 기준으로 하였고, 실험에 사용된 각종 부품의 값은 다음과 같다.

M1, M2 = M_B = IRF730, D1~D6 = D_B = 1N4937,
 L = 2mH, L_B = 1mH, C_p = 8.2nF, C_S = 15nF,
 C1, C2 = 22μF, C_f = 1nF, C_e = 100nF

그림 9~12는 제안된 복합형 역률개선회로의 실험 파형이다. 전파정류전압이 밸리전압보다 높은 구간에서는 개선된 밸리필 형태가 동작하고, 밸리전압이 전파정류전압보다 높은 구간에서는 연속전류형의 밸리용 승압형 변환기가 동작하여 입력전류를 매끄러운 정현파로 제어하므로써 0.997의 역률과 5%의 고조파왜율을 얻었다. 또한 승압형 변환기를 사용했음에도 불구하고 직류전압의 최고치는 입력전압의 최고치와 같고, 직류전압은 310Vp에서 최저 240V의 높은 밸리전압을 갖는다. 따라서 제안된 역률개선회로는 형광등 전류의 변동이 작기 때문에 잡박음이 거의 없으며 파고율이 1.5 정도로 낮다. 그림 11과 12는 그림 10에서 직류전압이 최고치일 때와 최저치일 때의 형광등 전류를 확대하여 나타낸 것이다.

한편, 기존의 일반적인 승압형 변환기만을 사용하여도 이와 같이 1의 역률과 낮은 파고율을 얻을 수 있으나, 제어회로가 상당히 복잡하고 전압 스트레스와 전력손실이 발생하며 불연속전류형으로 입력단의 저역필터가 반드시 필요하다는 사실을 주목하면, 제한된 구간에서만 연속전류형으로 동작하여 전력손실이 적고 입력단의 저역필터가 필요하지 않은 제안된 복합형 역률회로가 무척 우수함을 알 수 있다.

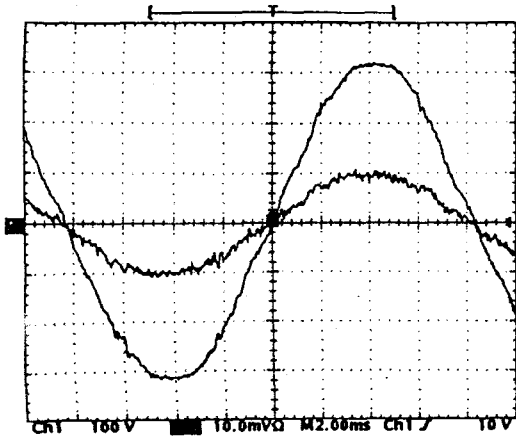


그림 9. 입력 전압 (100V/div)
& 입력 전류 (0.5A/div)

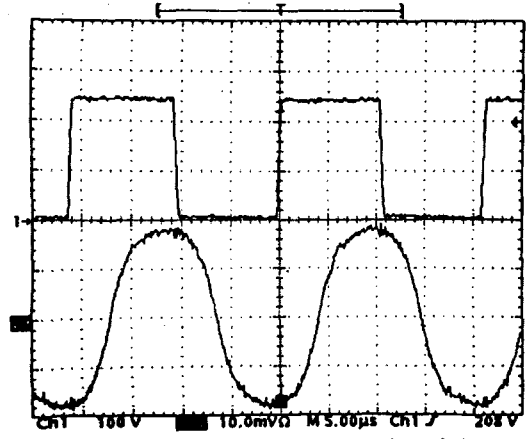


그림 12. 직류 전압 240V에서 구형파 전압
(100V/div) & 형광등 전류 (0.2A/div)

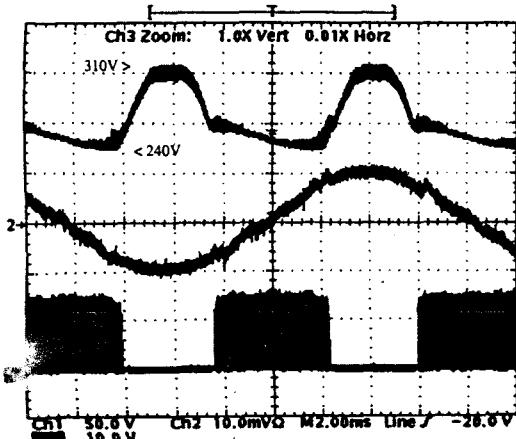


그림 10. 직류 전압 (50V/div) & 입력 전류 &
밸리용 승압형 컨버터 게이트 구동 (10V/div)

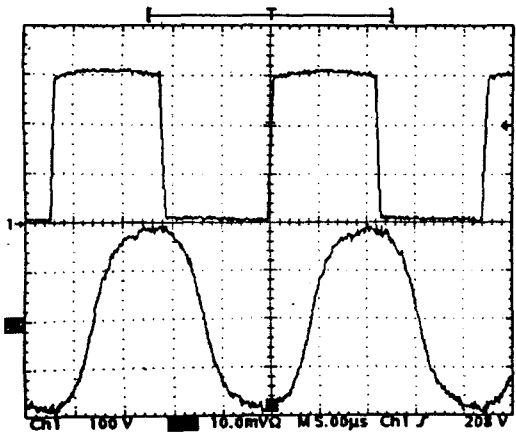


그림 11. 직류전압 310V에서 구형파전압
(100V/div) & 형광등전류 (0.2A/div)

3.2 고찰

본 논문에서는 고성능 전자식 안정기의 구현을 위하여 개선된 밸리필 형태에 밸리용 승압형 변환기를 결합한 새로운 방식의 복합형 역률개선회로를 제안하였다.

제안된 복합형 역률개선회로는 전파정류전압이 밸리전압보다 높은 구간에서는 개선된 밸리필 형태가 동작하고, 밸리전압이 전파정류전압보다 높은 구간에서는 연속전류형의 밸리용 승압형 변환기가 동작하여 입력전류를 매끄러운 정현파로 제어함으로써 0.997의 역률과 5%의 고조파왜율을 갖는다. 또한, 310Vp의 직류전압에서 밸리전압이 최저 240V로 상당히 높기 때문에, 형광등 전류의 파고율이 1.5 정도로 낮아 밸리필 구조의 120Hz 감박임이 발생하지 않는다. 게다가 일반적인 승압형 변환기를 이용한 경우에 비하여 전압 스트레스와 전력손실이 작고, 제어회로가 상당히 간단하여 저가격이라는 장점이 있다.

(참고 문헌)

- [1] M. H. Kheraluwala, "Modified valley fill high power factor electronic ballast for compact fluorescent lamps," PESC 95, pp. 10-14, 1995.
- [2] B. Andreyca, "Active power factor correction using zero current and zero voltage Switching Techniques," HFPC, pp.46-60, June, 1991.
- [3] R. R. Verdeber, "Harmonics from compact fluorescent lamps," IEEE trans. IA, vol. 29, no. 3, pp.670-674, May/June, 1993.
- [4] L. Malesani, "High efficiency electronic lamp ballast with unity power factor," IEEE IAS Conf. Records, pp. 681-688, 1992.