LC공진회로를 이용한 형광등용 전자안정기에 관한 연구

論 文
2-3-1

A study on an Electronic Ballast Using LC Reasonance Circuit for Fluorescent Lamps

崔 壽 鉉* · 趙 成 權** · 鄭 鳳 晩* · 韓 秀 彬**
(Soo-hyun Choi · Sung-kwon Cho · Bong-man Jung · Soo-bin Han)

요 약

고효율을 갖는 고주파점등용 전자식안정기 개발에 대한 연구이다. 안정기 입력단에 LC병렬공진회로를 연결하고 출력단에서 LC직렬공진회로를 이용함으로써 효율을 향상시켰다. 안정기에 대한 회로상의 주요 착상을 중심으로 동작을 설명하였으며 실용회로를 구성하여 성능을 실험하였다. 그 결과 개발된 전자식안정기의 40W 형광램프에 적용시 형광등과 안정기의 총 소비전력은 35W였으며 이는 기존 국내의 전자식 안정기의 적용시 소비전력에 대해 10%가 향상된 것이다. 고조파특성 또한 기존 자기식안정기 수준으로 향상되었다.

Abstract

An electronic ballast with high efficiency is newly developed. The efficiency of ballast is improved by using the LC parallel reasonance circuit at input stage and LC series reasonance circuit at output stage. The electronic ballast is analyzed in view of the principal idea of circuit and the performance is proved by testing the practical circuit for 40W fluorescent lamp with the electronic ballast. The consumed energy of a fluorescent lamp equipped with the developed ballast are below 35 watts which give an improvement of up to ten percents in energy savings in comparison with other electronic ballast in market. The harmonic characteristics is also improved to the level of the typical magnetic circuit ballast.

1. 서 론

70년대 석유파동이후 에너지절약은 시대적 요청으로써 조명분야에 있어서도 고효율 광원개발, 안정기의 효율향상, 조명제어등에 의한 에너지절약 방안이 연구되어 왔다.

이중 형광등안정기에서는 쵸크코일형과 같은 기존 자기식안정기의 구성재료의 개선, 안정기일부를 반도체소자로 대체시키는 방법, 고주파점등방식등에 의한 효율향상등이 주연구개발대상이었다.

기존 자기회로구조의 안정기의 경우 사용되는 큰 철심과 권선으로 인해 손실이 크며 부피가 커지는 것과 점등시간이 긴 것이 문제로서 자기회로

* 韓國動力資源研究所에너지 節約技術 센터長 ** 韓國動力資源研究所 責任技術員
* 韓國動力資源研究所 先任研究員 **韓國動力資源研究所 研究員

식 안정기의 일부를 반도체소자를 이용하여 점등 특성을 개선하거나 전력을 절감시키는 방법이 광범위하게 연구되었고[1), 2)] 최근에는 고주파점등시 상용주파수 60Hz의 경우와 비교하여 형광등의 발광효율(luminous efficacy)이 향상된다는 사실에[3)] 입각한 고주파점등방식의 전자식안정기의 개발들이 발표된 바 있다.[4), 5), 6)]

고주파점등방식의 회로구조는 트랜지스터 블로킹 발진인버터, 구형파 푸쉬풀인버터, 정전류푸쉬풀인버터등이 주로 사용되어 왔으나, 그 가격이 고가이므로 실용화 되는 데에 가장 장애가 되고 있으며 전원에의 고조파영향등도 보급에 큰 문제가 되고 있다.

본 연구에서는 인버터와 LC직렬공진회로가 직렬로 연결된 구조로 다른 방식의 고주파점등 전자식안정기에서 사용된 펄스트랜스가 없이 형광등에 전원을 직접 공급하며 입력전원에서 형광등에로의 에너지흐름을 조절할 수 있도록 입력단에 LC병렬공진회로를 삽입한 새로운 구조의 전자식 안정기를 제안하였다.

2. 전자안정기 구조

본 안정기의 구조는 그림 1과 같이 구성된다. 크게 AC전원에서 직류로 변환되는 AC/DC 변환부와 직류를 다시 고주파수의 교류로 바꾸는 DC/AC 변환부로 구성된다.

2. 1. LC병렬공진회로(LC parallel reasonance circut)

정류회로와 직렬로 연결되어 전원에서부터 형광등을 방전시키는 전기에너지의 양을 조절한다. 즉, LC공진회로가 전기에너지를 저장함으로써 에너지 손실없이 정류되는 DC전압의 평균치가 낮게 조절되며 후단의 인버터와 LC직렬공진회로의 작용에 의해 정상적으로 방전작용이 유지됨으로써 전력소모가 절감된다. 이 회로는 또한 일반 정류회로의 경우의 변화가 큰 전류펄스를 완만하게 유지시켜 줌으로써 고조파특성과 역율이 향상되게 한다.

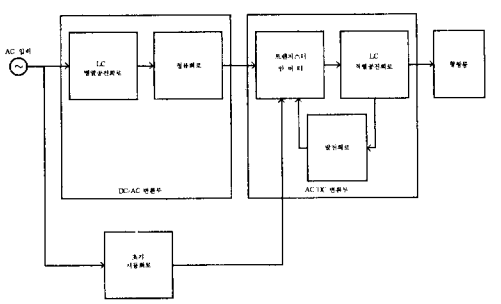


그림 1. 전자안정기의 구성도
Fig. 1. Block diagram of electronic ballast.

2. 2. 인버터(Inverter)

인버터는 정류된 DC전압을 고주파수로 스위칭시킴으로써 구형파(square wave)를 출력하며 반도체 소자로는 고주파수용의 내압이 큰 전력용 트랜지스터를 사용했다.

2. 3. 발진회로(Oscillating Circuit)

사용된 발진회로는 처음 전원연결시 초기시동회로에 의해 동작하며 이후 인버터의 부하에 흐르는 전류의 변화에 의한 재생작용에 의해 트랜지스터를 반복적으로 계속 구동시킨다.

2. 4. LC직렬공진회로(LC series reasonance circuit)

인버터와 직렬로 연결되어 정류된 전압을 증폭시키는 일종의 Low-pass filter의 특성을 가지며 트랜지스터인버터의 구형파출력을 정현파로 정형시킨다.

사용된 인덕터는 전류제한용 초크로서도 작용한다.

3. 안정기동작

3. 1. AC/DC 변환부

안정기의 AC/DC 변환부는 그림 2와 같이 모델링(modeling)할 수 있다.

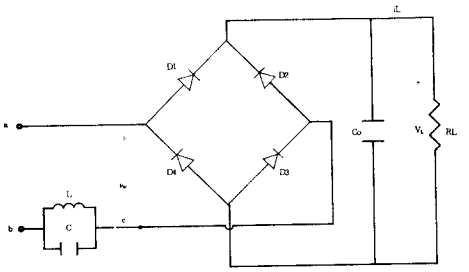
후단의 인버터의 스위칭동작과 형광등 방전작용은 고주파점등용안정기의 경우 20−50kHz의 고주파수로 동작되므로 60Hz인 입력단에서는 후단의 동작을 등가저항 R_L로 볼 수 있다. 이 등가저항 R_L은 다음식과 같이 정의한다.

$$R=\frac{V_L}{I_L}$$

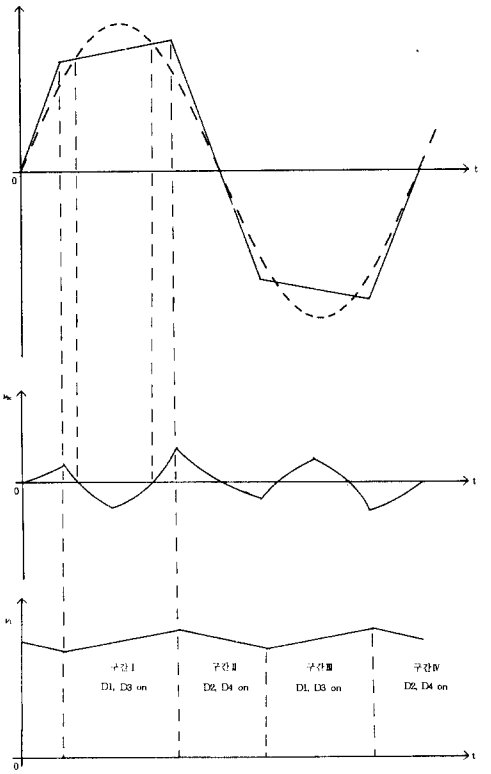
여기서 V_L : V_L의 RMS 값

I_L : i_L의 RMS 값

처음 전원전압이 0에서 증가하면 다이오드 D1, D3가 도통하여 전원-D1-Co-D3-LC공진회로의 회로가 형성되어 정류용 캐패시터 Co가 충전된다(그림 2-b, 구간 I) 동시에 LC공진회로에 에너지가 충전되므로 Co에 충전되는 전압은 전원전압의 최대값보다 작게된다. 전압 V_α가 V_L보다 낮아질때 다이오드는 모두 개로되어 Co에 충전된 전압은 부하 R_L을 통해서 방전되며 LC공진회로는 자체에서 공진하게 된다.(그림 2-b, 구간 Ⅱ)



(a) 입력단구조의 등가회로



(b) 입력단회로의 동작파형

그림 2. 입력단 등가회로와 동작파형

Fig. 2. Equivalent circuit and its waveform of the input stage.

전원전압의 방향이 음으로 바뀌어서 $|V_\alpha| > V_L$인 상태가 되면 다이오드 D2, D3가 도통되어 전원-LC공진회로-D2-Co-D4로 회로가 형성되어 $|V_\alpha| < V_L$인 상태가 될때까지 Co가 다시 충전된다.(그림 2-b, 구간Ⅲ) 이후 다이오드는 모두 개로되고 Co의 전압은 방전되며 LC 공진회로는 자체공진하게 되고, 전원전압이 양으로되어 다이오드 D1, D3가 도통됨으로써 1주기의 동작이 완료된다.(그림 2-b, 구간 Ⅳ)

3. 2. DC/AC 변환부

3. 2. 1. 동작설명

출력단의 구조는 그림 3-a와 같이 half bridge 트랜지스터 인버터와 직렬공진회로로 구성된다. 형광등은 정상적 점등상태에 있다고 가정하여 등가회로에서는 저항 Rf로 볼 수 있으며 등가저항 Rf는 다음식으로 정의한다.

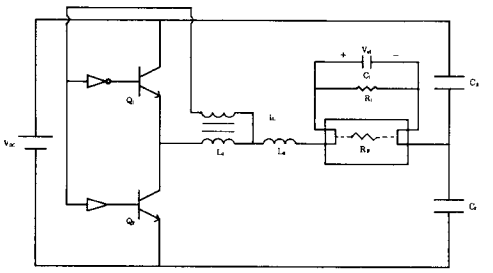
$$Rf = \frac{V^2}{P}$$

여기서 V : 형광등의 관전압

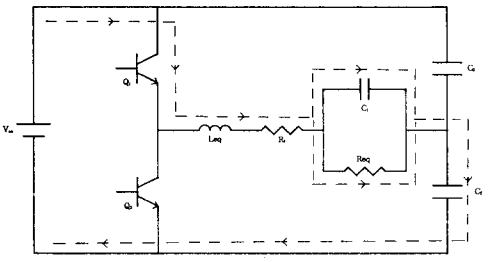
P : 형광등의 관전력

처음 트랜지스터 Q1이 도통된 상태에서는 그림 3-b와 같이 공진의 반주기동안 회로가 형성되고 회로의 등가 인덕터 Leg에 흐르는 전류 i_L과 캐패시터 C1의 전압 V_{C1}이 증가하게 된다.

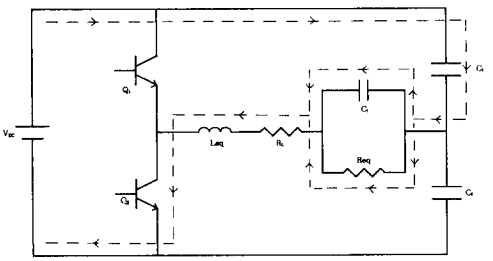
V_{C1}이 최대로 충전되어 i_L이 0가 되고 방향이 바뀔때 전류트랜스을 통해서 트랜지스터 Q1을 개로시키고 트랜지스터 Q2를 도통시키는 구동신호가 발생되어 공진의 다음 반주기동안의 회로가 그림 3-c와 같이 형성된다. 이 기간동안 i_L은 그림 3-d와 같이 0에서 부터 i의 음의 최대값 $-I_L$까지 역으로 증가한 후 감소하며 V_{C1}이 양의 최대값 V_{C1}에서 음의 최대값 $-V_{C1}$으로 충전된다. 이 때 i_L의 방향이 바뀌며 트랜지스터 Q1은 도통되고 Q2는 개로되어 그림 3-b의 상태로 환원되면서 공진의 1주기동작이 완료되고 새로운 주기의 동작이 시작된다. 그림 3-d에서 T_s는 스위칭소자가 완전히 스위칭되는 시간으로서 고속 트랜지스터의 경우는



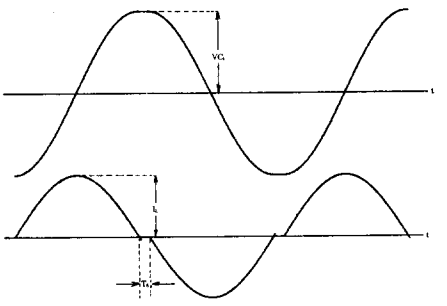
(a) 출력단회로의 개략도



(b) 인버터 동작(트랜지스터 Q_1 도통)



(c) 인버터 동작(트랜지스터 Q_2 도통)



(d) i_L, v_C의 동작파형

그림 3. 출력단 등가회로와 동작

Fig. 3. Equivalent circuit and circuit operation of the output stage

매우 작은 값으로 회로 1주기동작시간에 비교하여 무시할 수 있다.

3. 2. 2. 주파수 응답특성

인버터의 트랜지스터 출력은 구형파이므로 고조파(harmonics)성분이 많이 포함되어 있다. 형광등의 방전시 방전전압은 가능한 정현파(sine wave)로 파형을 정형시키는 것이 적합하며 충분한 방전전압이 요구되므로 공진회로에서의 주파수 응답특성은 중요하다. 그림 3-a의 안정기는 그림 4와 같은 등가회로로 보며 정상상태에서의 해석시 전달함수(transfer function) H(jw)에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\left| H(jw) \right| = \left| \frac{V_C(jw)}{V_i(jw)} \right| = \frac{1}{2} \left[\frac{C^2+D^2}{A^2+B^2} \right]^{1/2}$$

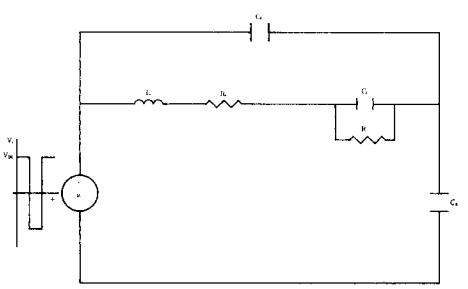


그림 4. 출력단의 등가회로

Fig. 4. Equivalent circuit of output stage

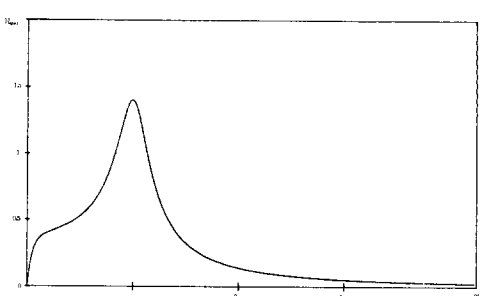


그림 5. 출력단회로의 주파수응답 특성

Fig. 5. Frequency response characteristics of output stage

단, $A=R_L+\frac{R_1}{1+(\omega C_1R_1)^2}$

$$B=\omega L-\frac{1}{2\omega C_2}-\frac{\omega C_1R_1^2}{1+(WC_1R_1)^2}$$

$$C=\frac{R_1}{1+(\omega C_1R_1)^2}$$

$$D=\frac{\omega C_1R_1^2}{1+(\omega C_1R_1)^2}$$

주파수에 따른 전달함수의 변화는 그림 5와 같이 공진주파수 ωo에서 전압중 폭율이 최대인 일종의 low-pass-filter와 band-pass-filter 특성의 혼합특성을 보여주고 있다.

방전전압 V_C의 n차 고조파 성분의 크기는

$$|V_{C1}(n)|=|V_i(n)\ H(nj\omega o)|$$

$$=\frac{4V_{DC}}{\pi}\frac{|H(n\omega o)|}{(2n-1)^2}$$

이다. 3차 이후는 기본파의 1% 이하로 감소함으로써 방전전압은 정현파에 근사한 파형으로 정형된다.

4. 안정기의 실험 및 결과

4. 1. 안정기의 동작파형

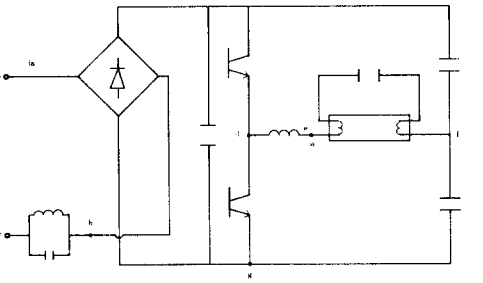
개발된 전자식안정기의 회로의 구조는 그림 6-a와 같다.

그림 6-b는 입력단의 전원 V_a(A)와 LC 공진회로 후단의 파형 V_b(B)으로써 정류전압이 LC공진회로에 의해 감소됨을 보여준다. 그림 6-c는 안정기 입력단 전류 ia로 일반적인 정류회로의 전류파형과 비교하여 전류의 도통시간이 길며 파형이 완만하여 역율 및 고조파 특성이 향상됨을 알 수 있다. 파형의 최대값에서의 전류피크값은 공진회로의 최적값에 의해 대폭 감소시킬 수 있다.

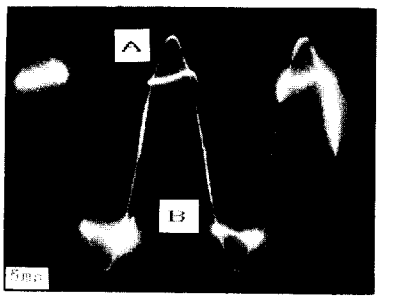
그림 6-d는 트랜지스터 인버터출력인구형파파형 V_{dg}이고 그림 6-e와 그림 6-f는 형광등 양단전압 V_{ef}와 관전류 ie로 관전압은 LC공진회로의 주파수선택통과 특성에 의하여 정현파에 가깝게 정형됐음을 보여 준다. 관전류 ie는 형광등의 비선형적인 방전특성에 의하여 파형이 왜곡되어 있음을 보여준다.

4. 2. 안정기의 특성

제안된 안정기의 구체적인 특성을 국내의 안정

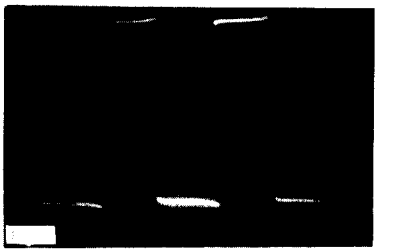


(a) 안정기회로구조

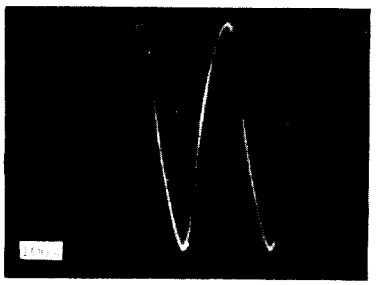


(b) V_a[A], V_b[B]의 동작파형

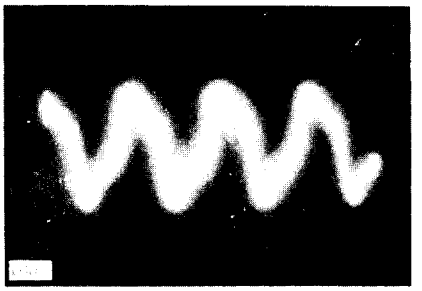
(c) ia의 동작파형



(d) V_{dg}의 동작파형



(e) V_{ef}의 동작파형



(f) ie의 동작파형

그림 6. 개발된 전자안정기회로의 주요동작 파형
Fig. 6. Waveform of developed electronic ballast

기와 비교하여 보면 표 1과 같다. 제안된 40W 가정용 형광등용 전자안정기의 경우 소비전력은 약 35.5W로 기존 전자식안정기의 39.4W보다는 4W가, 일반 자기식안정기보다는 10W나 전력절감이 되어 각각 10%와 20%의 절전효과를 얻었다.

역율의 경우도 국내 전자식안정기 5개 제품의 평균역율 54.6%의 낮은 역율문제를 해결하여 역율 개선용 캐패시터을 사용한 국내 자기식안정기 6개 제품의 평균역율 94.5% 수준인 94%를 얻었다.

조도도 330Lux로서 기존 전자식안정기 보다 높은 자기식 안정기수준의 조도로 향상되었다.

4. 3. 안정기의 고조파 특성

전자식안정기의 경우 요구되는 파형을 인위적으로 발생시키는 근본 특성상 그 과정에서 고조파가 많이 발생하게 되고 전원에 유입됨으로써 많은 고조파장애를 일으키는 원인이 되므로 좋은 고조파 특성을 갖는 것이 실용화에 중요한 문제가 된다.

개발된 안정기의 고조파특성은 Spectrum Araly-zer HP3582A을 이용 전원에 연결된 입력단의 전류파형을 CT(current transformer)을 사용하여 측정하였다. 그림 7은 타안정기와 측정된 고조파특성을 비교한 것으로서 기존 전자식안정기인 그림 (b)보다 고조파함유량이 매우 적으며 일반 자기식안정기의 경우(c)에 비교되는 고조파특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 8차까지의 고조파성분을 측정하여 왜율(distortion factor)을 계산한 결과가 표 2로서 개발된 안정기의 경우 40.1%의 왜율로 기존전자식 안정기의 왜율 79.3%를 크게 개선시킨 것을 알 수 있다.

5. 결 론

형광등의 방전부를 트랜지스터인버터와 LC공진회로의 직결로 연결된 구조를 이용하고 정류단에 LC병렬공진회로를 첨가한 새로운 구조의 고주파

표 1. 개발된 전자식 안정기의 성능
Table 1. Performance of developed electronic ballast

항 목	개발된 전자식 안정기	기존 전자식 안정기[1] (국내 5개업체 평균)	일반자기식 안정기[1] (국내 6개업체 평균)
전 원(V)	220	220	220
주 파 수(Hz)	60	60	60
입 력 전 류(mA)	188〔330〕[2]	360	221
총소비전력(W)	35.5〔43〕[2]	39.4	46
조 도[3](Lux)	330	308	333
역 율(%)	94〔57〕[2]	54.6	58(94.5)[4]
비 고	사용 형광등 FLR 40 (220V, 40W) 측정기기 : Lux Meter YEW 3281 : Multifunction Power Meter RFL 636		

주 1. 1987년 제품에 대한 측정치 평균값임
2. 〔 〕 안은 입력단 LC공진회로를 단락시켰을 때 측정 값
3. 조도측정은 암실에서 1m거리에서 측정
4. 안정기에 캐패시터를 부착한 경우

표 2. 고조파 함유량 비교

Table 2. Comparison with other ballast in harmonic component

〔%〕

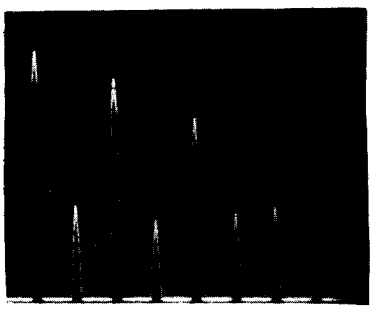
고조파 차수 \ 기본파에 대한 고조파 비율	개발된 전자식 안정기	기존 전자식 안정기 (L사 제품)	자기식 안정기 (S사 제품)
2	9.4〔5.6〕[2]	3.9	6.7
3	32 〔59.5〕	70.8	28.1
4	1.3〔4.7〕	3.2	2.5
5	19.9〔34.2〕	35	5.6
6	3.2〔3.4〕	3.5	0.9
7	8.9〔14〕	2.6	1.8
8	2.8〔1.86〕	2.5	1.6
왜율[1](8차 까지)	40.1〔70.4〕	79.3	29.6

주 1. 왜율(Distortion Factor) $= \sum_{n=2}^{n} \frac{\sqrt{I_n^2}}{I_1}$

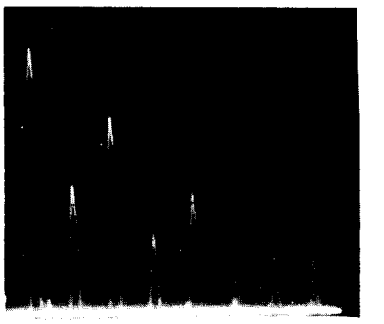
2. 〔 〕 안은 입력단 LC공진회로를 단락시켰을 때 측정 값

점등용 전자식 안정기에서 출력단의 공진회로는 주파수 선택통과 특성과 전압증폭특성에 의한 형광등의 효율적인 방전을 일으키고 입력단의 공진회로는 전력소비절감과 고조파특성을 향상시켰다.

(a) 개발된 안정기의 고조파특성



(b) 기존 전자식안정기의 고조파특성(L사 제품)



(c) 자기식 안정기의 고조파특성(S사 제품)

그림 7. 고조파특성 파형비교(10db/div)

Fig. 7. Comparison in harmonic characteristic waveform.

회로해석에 의한 소자값을 이용 최적의 성능을 갖도록 설계 제작하여 실험한 결과 국내의 기존전자식안정기의 소비전력의 10%이상의 절전효과를 얻었고 고조파 특성도 기존자기식안정기 수준으로 향상되었다. 이 성능은 일본에서 개발되어 실용화된 정전류형푸쉬풀인버터구조의 전자식안정기와 충분히 비교될 만한 수준이다.

본 연구는 태성전자개발주식회사의 연구비지원으로 수행된 것으로 연구결과는 상품화되고 있으

며 앞으로도 효율개선 등이 지속적으로 이루어질 것으로 계획된다.

참고 문헌

1) 井山博え외,"SCRのゲートターこオあ特性れ利用したけい光うこプ用マタータ", 日本照明學會誌 64－4, pp. 165～170, 1980.

2) 姬井豊治, 中西宣一郎, 元治崇, "放電うンプ點燈用サイリスタ 逆並列形昇壓回路の解析", 日本照明學會誌 59－8, pp. 408～415, 1975.

3) J. H. Campbell, "New parameter for high frequency lighting systems", Illum. Eng., pp. 247～256, 1960.

4) 矢島외, "省電力形電子安定器スーパーバうスト新シリーズ", 東芝しゼユー, Vol. 34, No. 7, pp. 585～588, 1979.

5) 湯原恒平외, "定電流プツシコプルンパータによお螢光うンプ用電子安定器", 日本照明學會誌, 68－10, pp. 501－506, 1984.

6) 戶村光一외, "けい光燈點燈用電流歸還形トうンジスタインバータ", 日本照明學會誌, 63－2, pp. 66－72, 1979.

7) 姬井豊治외, "放電うンプ點燈用サイリマタインバータ形昇壓回路の設計", 日本照明學會誌 59－3, pp. 114－120, 1975.