

압전 변압기의 모델링과 형광등 안정기회로의 응용

論 文

48B-7-5

Modeling and Analysis of Power Piezoelectric Transformer and Its Application to Fluorescent Lamp Ballasts

崔 城 振* · 李 圭 燦* · 趙 普 衡**

(Sung-jin Choi · Kyu-chan Lee · Bo-Hyung Cho)

Abstract - The piezoelectric transformer (PT) is an electro-mechanical device that transfers electrical energy through a mechanical vibration. In this paper, a PT operating in the contour vibration mode is introduced for an application of fluorescent lamp ballast. Utilizing its inherent characteristics of the LC resonator and a high voltage gain to ignite the lamp in light load condition, an investigation of a power piezoelectric transformer as a potential component for a fluorescent lamp ballast is discussed. PT is easy to be produced in mass and reduces the cost of the ballast. The modified equivalent circuit model of the PT considering the operating current level is derived to design the fluorescent lamp ballast. This model describes the voltage gain of the PT in wide load variations and various input current levels. The experimental and simulation results are provided to verify theoretical analysis. The power capacity of the currently developed PT is relatively low (15W), but it can be increased by adopting a multi-layer structure and is currently under investigation. It is also possible to parallel the PT for higher power processing.

Key Words : Piezoelectric Transformer, Equivalent circuit modeling, Fluorescent Lamp Ballast

1. 서 론

압전 변압기(Piezoelectric Transformer)는 기계적인 진동 에너지를 매개로 하여 전기 에너지를 전달하는 소자이다. 1950년대에 Rosen에 의해 처음 제안된 이후 기존의 자기 회로 소자를 대체하는 소자로서 활발히 연구되고 있다. 압전 현상을 이용한 소자는 원래 신호 레벨 회로에서 공진자로 쓰이기 시작하여 그 응용 범위가 전력 전자 분야로 넓어진 것은 비교적 최근의 일이다.

압전 변압기는 자기 에너지를 매개로 하지 않으므로 전자기 노이즈가 생기지 않으며, 특히 권선이 없어서 대량 생산에 유리하므로 응용 회로의 가격을 낮출 수 있다. 또한 높은 Q값(Quality factor)을 갖는 공진 현상을 나타내므로 여러 가지 응용 범위에 쓰일 것으로 기대된다. 그 응용 범위에 따라 높은 승압비를 얻을 수 있거나, 작은 크기를 가지도록 하는 등 여러 가지 형태의 압전 변압기가 연구되고 있다.

현재까지의 압전 변압기의 응용 범위는 크게 다음의 두 가지로 나눌 수 있다[1]. 우선, 노트북 컴퓨터에 쓰이는 백

라이트(Cold Cathode Fluorescent Lamp)용 인버터에서 초기 방전 전압을 얻기 위한 소자로서 기존 변압기에 비해 작은 크기를 가지고도 높은 승압비를 얻으면서 또한 효율도 높은 장점을 살리며 응용되었다[2,3].

한편, DC-DC 컨버터의 소형화를 위해서도 압전 변압기가 도입되었는데 압전 변압기는 코어 손실이 존재하지 않으므로 비교적 고효율을 얻으며 주파수 상승에 따라 전원 장치의 소형화를 가능하게 할 수 있는 점이 특징이다[4]-[9].

본 논문에서는 새로운 응용 회로로서 압전 변압기를 이용한 형광등 안정기(fluorescent lamp ballast)에 대해 논의하면서 압전 변압기의 전기적 등가 회로 모델을 유도한다. 기존에 사용된 등가 회로 모델은 형광등 점등 시와 점등 후의 두 가지 동작 조건에서의 전압 이득을 모두 설명하지는 못한다. 제안된 등가모델은 기존의 모델을 변형하여 입력 전류에 따른 기계적 공진의 Q값 변화를 고려하기 때문에 이 두 가지 조건에서의 전압 이득을 모두 설명할 수 있는 장점이 있다. 제안된 모델의 유도 과정을 설명하고 실험 결과와 비교하여 검증한다. 그리고 실제로 이 등가 회로 모델을 사용하여 형광등 구동 회로를 설계하여 그 결과 파형을 살펴본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에서는 압전 변압기의 일반적인 특성과 응용 범위에 대해서 살펴보고 본 연구의 필요성에 대해 논의한다. 본론에서는 기존의 압전 변압기 등가 회로 모델링 방법의 한계를 설명하고 새로운 전기적 등가 회로 모델을 유도하여 이를 실험으로 검증한다. 그리고 제안된 등가 회로 모델을 사용하여 형광등 구동 회

* 正 會 員 : 서울대 大 學 院 電 氣 工 學 部 博 士 課 程

** 正 會 員 : 서울대 電 氣 工 學 部 教 授 . 工 博

接 受 日 字 : 1999년 2月 25日

最 終 完 了 : 1999년 6月 3日

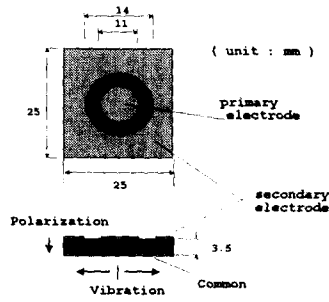


그림 1 형광등 안정기용 압전 변압기
Fig. 1 Piezoelectric Transformer

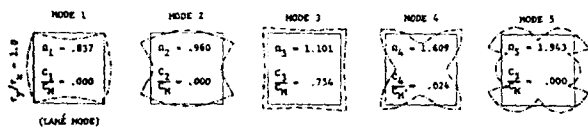


그림 2 얇은 정방형 평판의 진동
Fig. 2 Dilation-type vibration

로를 설계하는 방법을 응용 예와 함께 제시하고 실제로 몇 가지 응용 회로를 설계해서 실험 파형을 살펴본다. 결론에서는 결과를 정리하고 향후 연구방향을 제시한다.

2. 압전 변압기의 모델링과 해석

2.1 압전 변압기의 구조

이 논문에서 사용된 압전 변압기의 구조를 그림 1에 나타내었다. 주어진 압전 변압기는 PZT(lead zirconate titanate)를 사용하여 제작된 것으로 중앙 부분에 1차 전극, 바깥쪽에 2차 전극이 위치하고 있다. 그림과 같은 방향으로 외곽 공진(contour extensional vibration)을 이용하여 진동하고 기계적인 공진 주파수는 대략 75kHz 정도이다.

2.2 압전 변압기의 동작 모드 분석

얇은 사각형 평판(thin rectangular plate)에서 외곽 공진이 일어날 때 기계적인 공진 모드를 고려하면, 앞의 그림 1의 전극 배치에서 생길 수 있는 공진 형태는 그림 2의 dilation-type 공진이며[19], 방사형 대칭 구조를 가지고 있는 모드 3과 모드 4가 우세한 진동 모드가 될 것이라고 예상할 수 있다.

그림 3은 Network analyzer (Hewlett Packard 8751A, 87511A)를 이용하여, 주파수에 따른 s-파라미터 전달 특성을 측정한 그림이다. 여기서는 주파수 전달 특성(S21)을 10kHz 부터 300kHz의 주파수 범위에서 살펴보았는데 봉우리 부분이 각 공진 모드가 일어나는 지점이다. 45kHz에서 일어나는 모드 3의 공진모드와 75kHz 부근의 모드 4의 공진 모드, 90 kHz 의 5차 모드 등을 관찰할 수 있다. 이외에도 수많은 공진모드를 관찰할 수 있는데 이중에서 전압 전달 특성(S21) 값이 가장 큰 것은 4차 모드인 75kHz 부근이므로 이 주파수 근방에서 압전 변압기를 구동한다.

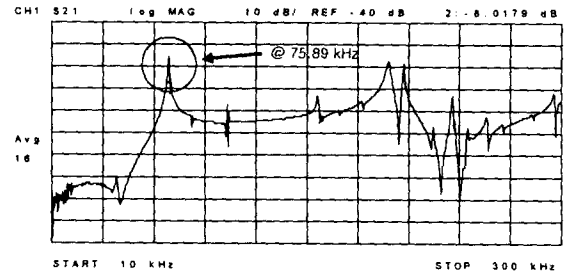


그림 3 Network Analyzer로 분석한 전압 전달 특성
(x 축 : 주파수[kHz], y 축 : S21 [dB])
Fig.3 Measured Scattering Parameter curve (S21)

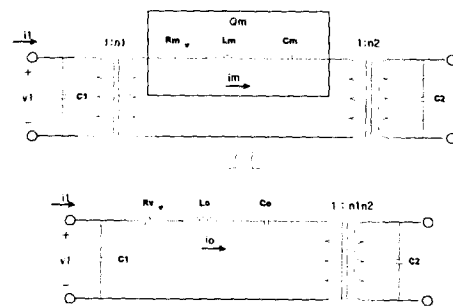


그림 4 압전 변압기 등가 회로 모델
Fig. 4 Circuit Modeling of PT

2.3 압전 변압기의 모델링

그림 4는 전력전자 회로를 설계하기 위해 본 논문에서 제안한 공진 주파수 근처에서의 압전 변압기의 등가 회로 모델이다. 이 모델은 신호 레벨에만 쓰이는 기존 모델[11]을 파워레벨을 고려하기 위해 다소 변경한 것이다.

가운데에 있는 LC 공진 부분이 기계적인 현상을 전기적으로 모델링한 부분이다. Lm - Cm 공진부는 기계적인 공진을 나타내고, Rm과 함께 기계적 공진의 Q값(Qm)을 설명한다. 기존 모델에 있는 Rm의 값을 가변 저항(Rv)으로 함으로써 파워레벨을 고려할 수 있도록 했다. C1과 C2는 입력 전력 전극에 의해 나타나는 정전 용량을 표현하고, n1과 n2는 기계적인 에너지와 전기적 에너지의 상호 결합 계수를 표현한다. 그림 4 아래 부분의 회로는 주어진 등가 회로 모델에서 실험적으로 회로 정수 값을 추출해 내기 위해 보다 간소화시킨 모델이다.

등가 회로 모델에서 회로 정수 값을 찾아내는 방법중에 대표적인 것은 Y-circle (Admittance circle) 측정법이다 [13,14]. Y-circle 측정법은 주어진 공진 회로의 각 소자값을 측정 그래프로부터 구하는 방법이다. 그런데, 이 방법을 주어진 압전 변압기의 모델링에 그대로 적용하는 데는 문제가 있다.

안정기 회로를 설계하기 위해서 필요한 압전 변압기의 전

기적 등가 회로 모델은 램프의 점등 시의 전압 이득과 점등 후 정상 상태에서의 전압 이득 두 가지를 모두 설명할 수 있는 모델이어야 한다. Y-circle 측정법은 동작점을 고려하지 않고 단지 신호 레벨에서 측정을 하여 회로 값들을 도출하기 때문에 입력 전류의 크기에 따른 실제 기계적인 공진 특성 변화를 고려하기 어렵다.

일반적으로 압전 변압기의 기계적인 공진 특성 (mechanical quality-factor : Qm)은 압전 물질의 기계적인 진동 속도에 영향을 받는다[15]. 이 속도가 증가할수록 Qm은 대체로 감소하고 압전 변압기의 전압 이득이 감소한다. 그런데 기계적인 진동 속도는 등가 회로 모델에서 LC 공진부에 흐르는 전류(그림 4의 im)로 표현되므로 이러한 현상을 모델에 반영하고자 할 때에는 Qm을 전류에 따른 가변적인 값으로 간주해야 한다.

따라서, 공진의 damping 저항을 입력 전류에 따라 가변하는 방법을 고려해 보았다. 이때 가변저항 Rv가 Qm의 변화를 반영하여 전류에 따른 함수가 된다. 압전 변압기의 1차 측 입력 캐패시턴스(C1)가 상당히 작아서 이를 통해 흐르는 전류를 무시할 수 있다고 할 때, Rv는 식 (1)과 같이 입력 전류 평균치(i1의 rms)의 함수로 근사하여 표현할 수 있다.

$$R_v = f(i_{m,rms}) \approx \hat{f}(i_{1,rms}) \quad (1)$$

제안된 압전 변압기 등가회로 모델에서 회로 정수값을 도출하는 절차를 그림 5에 요약하였다. 이제, 이 방법을 사용하여 주어진 압전 변압기의 등가 회로 모델을 구성해보자.

<등가 회로 모델 구성 절차>

1) Y-circle방법을 이용하여 아래의 값들을 계산한다.

$$L_o = 103.8 \text{ mH}, C_o = 42.9 \text{ pF}, \\ C_1 = 0.593 \text{ nF}, C_2 = 1.98 \text{ nF}, n = 0.44$$

2) 입력 전류 크기에 따른 Rv 값의 변화를 측정한다.

Qm을 나타내는 저항 Rv의 변화를 손쉽게 측정하는 방법은 다음과 같다. 부하가 개방일 때 공진 주파수에서의 등가 회로는 그림 6과 같다. 따라서 기본과 가정을 하면 입력 임피던스는 아래와 같이 주어지고,

$$|Z_{in}| = \frac{V_{1,rms}}{I_{1,rms}} = \left| \frac{1}{j\omega C_1} \parallel R_v \right| \quad (2)$$

따라서, 위의 식(2)로부터 저항 Rv는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_v = |Z_{in}| \sqrt{1 - (\omega |Z_{in}| C_1)^2} \quad (3)$$

이러한 계산을 다양한 입력 전류 레벨(rms)에서 반복하여 수행한다.

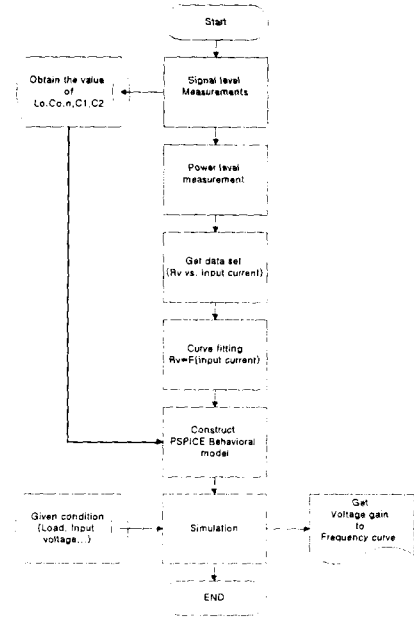


그림 5 등가모델 구현을 위한 순서도
Fig. 5 Flow Chart for modeling the PT

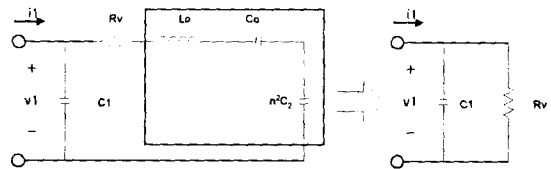


그림 6 부하를 개방했을 때 공진점에서의 등가회로
Fig. 6 Equivalent circuit near the resonant point

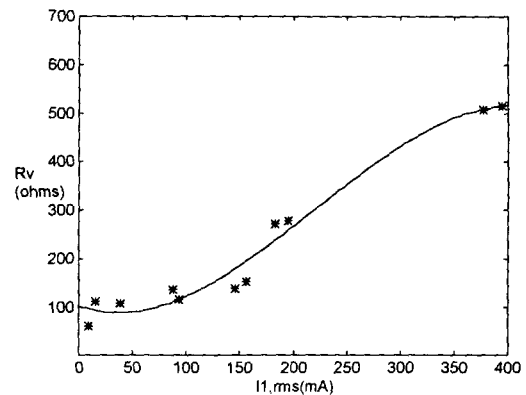


그림 7 입력 전류 평균치에 따른 Rv변화와 그 근사함수
Fig. 7 Rv vs. Input current

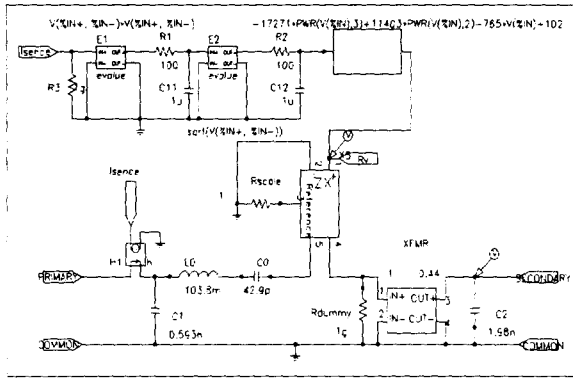


그림 8 PT의 PSPICE ABM 모델
Fig. 8 Pspice Behavioral Model of PT

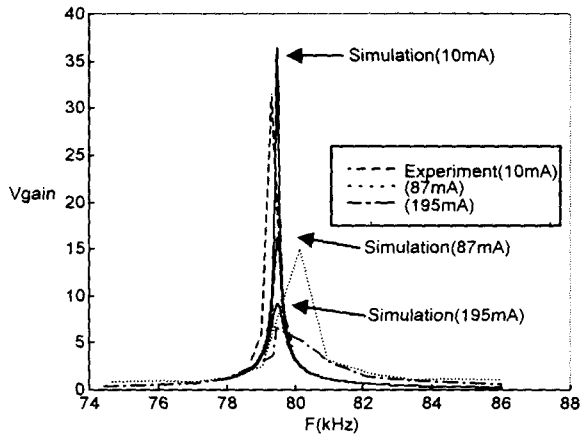


그림 9 개방 부하시 압전 변압기의 전압 이득
Fig. 9 Voltage gain (open load case)

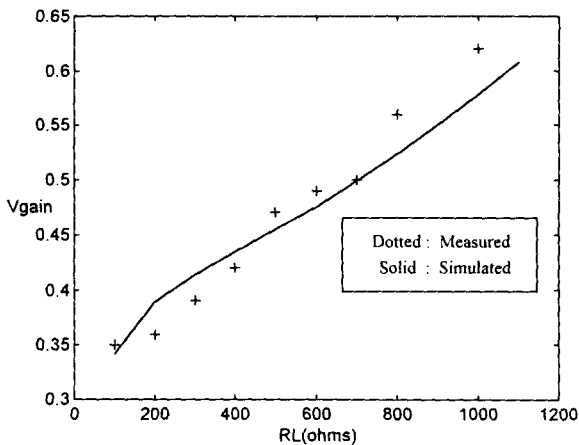


그림 10 부하저항의 증가에 따른 최대 전압이득의 변화
Fig. 10 Maximun voltage gain vs. resistive load

3) Rv와 입력 전류간의 상관 관계를 구한다.
2)에서 구한 자료들을 가지고 그림 7과 같이 3차 곡선으로 근사하였다.

4) SPICE Behavioral 모델을 구성한다.
그림 8과 같이 입력 전류의 평균값(rms)에 따라 공진 특성을 달리하는 SPICE behavioral 모델을 구성한다. 구성된 모델을 이용하여 다양한 부하 조건에 따른 압전 변압기의 전압 이득을 모의 실험할 수 있다.

앞에서 유도한 등가 회로 모델과 실제 실험 결과를 비교 해서 살펴보면, 그림 9는 부하를 개방했을 때 주파수에 따른 전압 이득 곡선을 나타낸다. 실제로 입력 전류의 평균값이 증가함에 따라 전압 이득이 감소하며, 제안된 모델을 사용할 때 모의 실험한 결과가 실제 실험 결과에 근사함을 알 수 있다. 그림에서, 200mA(rms) 정도의 입력 전류로 구동되었을 때는 10mA(rms)의 경우보다 최대 전압 이득이 3배 이상 감소함을 알 수 있다.

그림 10은 입력 전류를 50mA(rms) 정도로 하였을 때 저항 부하에 따른 최대 전압 이득 곡선을 나타낸다. 부하 저항이 증가할 때 압전 변압기의 전압 이득도 증가함을 관찰할 수 있다. 다음 장에서 설계할 형광등의 등가 부하 저항은 각각 800ohm과 500ohm이고 이때의 최대 전압 이득은 0.5-0.6 이다.

주어진 압전 변압기는 부하가 작을 때는 승압 특성, 부하가 클 때에는 강압 특성을 나타내는 소자임을 알 수 있다. 실제로 형광등을 구동하기 위해서는 이러한 특성이 필요하다. 다음 장에서는 유도된 모델을 이용하여 실제 형광등 안정기를 설계해 본다.

3. 압전 변압기를 사용한 형광등 안정기

이 장에서는 압전 변압기를 형광등 안정기 회로에 적용하고, 제안된 모델을 이용하여 실제 회로를 설계하여 실험 결과를 분석한다.

전자식 형광등 안정기의 회로로 널리 쓰이는 것은 그림 11과 같은 half-bridge로 구동하는 series-parallel 회로이다. 이 회로에서는 인덕터(Lr)가 병렬 캐패시터(Cp)와 공진하여 충분한 램프 시동 전압을 얻으며 정상 상태에서 정전압에 가까운 전류 파형을 얻는다. 그러나, 이 인덕터는 수 mH 정도로 전자식 안정기 가격 상승의 원인이 된다.

3.1 12W 저전력형 압전 안정기 (I)

그림 12는 저전력(12.5W)을 구동하는 압전 안정기 회로이다. 앞장에서 살핀 바와 같이 주어진 압전 변압기는 부하가 작을 때 높은 전압 이득을, 부하가 클 때 낮은 전압 이득을 나타낸다. 이러한 특징은 실제 형광등 부하를 구동하기 위해서는 상당히 유리한 특성이다. 형광등 부하는, 점등 전에는 전류가 램프로 흐르지 않으므로 개방 회로로, 점등 후에는 정상 상태에 이르면 등가적인 저항으로 각각 표현된다. 따라서 그림 12와 같이 압전 변압기를 램프 부하와 구동시키면, 점등 전에 얻어지는 높은 전압 이득으로 시동 전압을

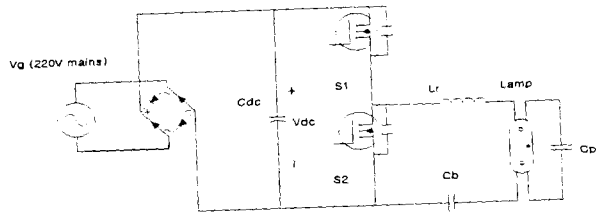


그림 11 일반적인 공진형 전자식 안정기
Fig. 11 Conventional Electronic Ballast

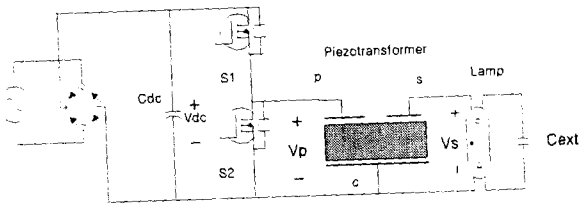
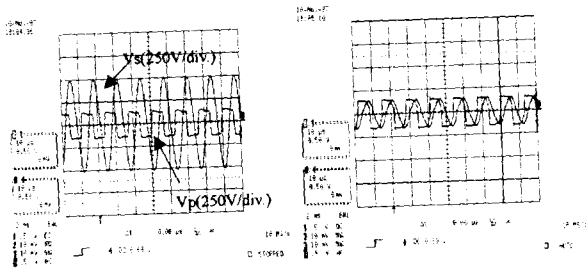


그림 12 저전력형 압전 안정기(I)
Fig. 12 Low Power PT Ballast(I)



(a) 점등 전 (b) 점등 후 정상상태

그림 13 압전 변압기(I)의 1차측과 2차측 전압
Fig. 13 Low Power PT Ballast

확보하고 일단 램프가 점등되어 정상 상태에 이르면 등가 부하 저항에 대해서 원하는 동작 조건으로 구동하도록 설계할 수 있다.

또한, 압전 변압기는 상당히 큰 Q값을 가지는 공진 특성을 나타낸다. 따라서, 구형파가 압전 변압기의 1차단에 바로 인가될 때에도 변압기 2차단에 나타나는 파형은 그림 13에 나타난 것처럼 상당히 정현파에 가깝다. 이는 램프 전류의 과고율(Crest factor)을 낮추어 램프의 수명을 연장하는 데에도 도움을 준다.

<설계 절차>

그림 12의 형광등 압전 안정기의 설계 절차는 다음과 같다.

- 1) 예열 전류를 고려하여 Cext을 설계한다.
- 2) 모의 실험을 통해 동작 주파수를 선택한다.
앞장에서 유도한 모델을 사용하여 점등 전압과 정상 상태

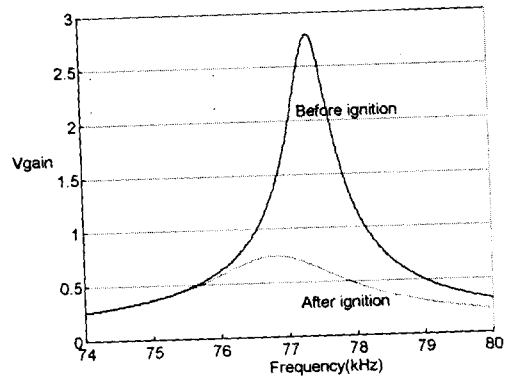


그림 14 점등 전과 후의 전압 이득 (Cext=2.2nF)
Fig. 14 Voltage gain before and after ignition(Cext=2.2nF)

동작 전압을 동시에 만족하는 동작 주파수를 선택한다. 그림 14는 등가 회로 모델로 모의 실험하여 얻은 전압 이득 곡선이다. 점등 전의 곡선은 램프를 개방 부하로 생각하고 얻었으며, 12.5W의 정상 상태 등가 부하(800 Ω)를 사용하여 점등 후의 곡선을 얻었다. 필요한 램프 점등 전압은 500V(peak)이고, 램프의 정상 상태 전압은 92V(rms)이므로 다음과 같이 원하는 전압 이득을 계산한다.

먼저, 기본과 가정을 하면 압전 변압기의 1차측에 걸리는 기본과의 rms값은

$$V_{p, fund, r. m. s.} = 220 \times \frac{4}{\pi} \times \frac{1}{2} \quad (4)$$

이다. 따라서 필요한 전압 이득은 점등 시에는,

$$V_{gain, starting} = \frac{500/\sqrt{2}}{V_{p, fund, r. m. s.}} = 2.53 \quad (5)$$

정상 상태에서는,

$$V_{gain, s. s.} = \frac{92}{V_{p, fund, r. m. s.}} = 0.66 \quad (6)$$

가 된다.

이제, 위의 전압이득을 모두 만족시키는 동작 주파수를 선택하면 그림 14로부터 77.2kHz를 얻는다.

<실험 결과 및 파형>

이상의 절차에 의해 설계된 압전 안정기의 점등 특성을 그림 15에 나타내었다. 고정된 주파수에서 동작하므로, 최적의 예열 조건[16]만족시키지는 못하고 있으나, 일반적으로 안정기의 예열 전류 조건을 개선하기 위해 사용하는 변동

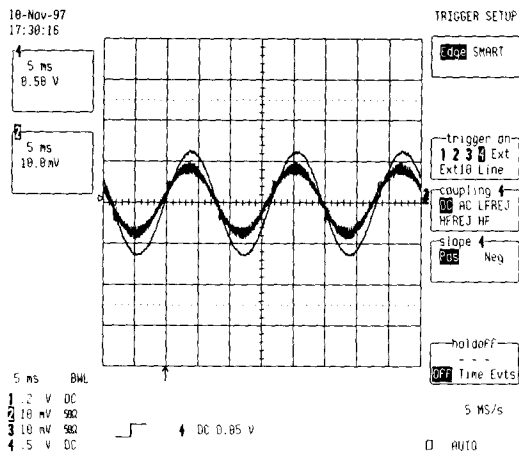


그림 19 라인 입력 전류(200mA/div.)와 입력 전압(250V/div.)

Fig. 19 Line input current(200mA/div.) and voltage(250V/div.)

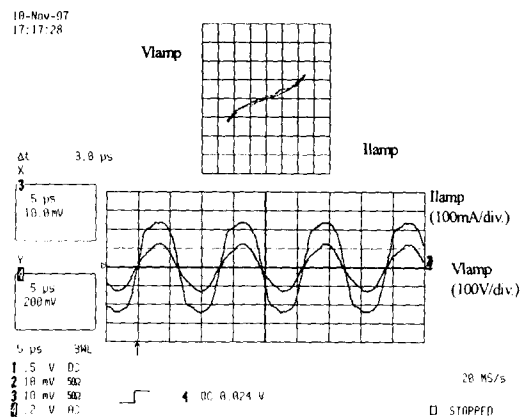


그림 21 정상 상태의 램프 전압과 램프 전류
Fig. 21 Steady-state characteristics

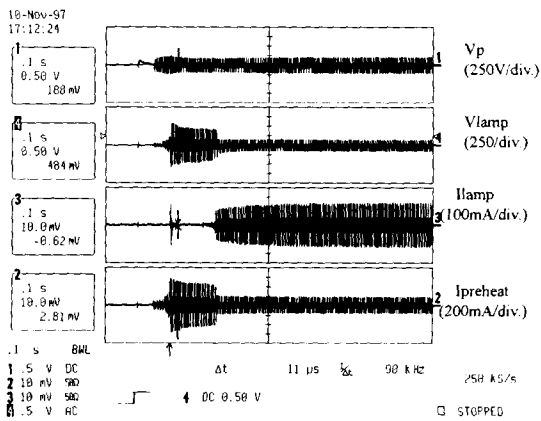


그림 20 램프의 점등 특성
Fig. 20 Start-up characteristics

나타내었다. 그림으로부터 전류의 왜곡도가 매우 낮음을 알 수 있다.

4. 결 론

입력 전류 크기에 따른 기계적 공진 특성의 변화를 고려한 압전 변압기의 등가 회로 모델이 제안되었으며 실험을 통하여 모델의 타당성을 검증하였다. 이 모델은 여러 가지 부하 조건과 입력 전류에 따른 기계적인 공진 특성의 변화를 설명할 수 있기 때문에 형광등 안정기의 응용 회로에서 램프의 점등 전과 점등 후의 전압 이득을 동시에 설명할 수 있는 장점이 있다.

압전 변압기를 사용하여 구동하는 형광등 안정기의 응용 회로를 몇 가지 제시하였으며 제안된 등가 회로 모델이 응용 회로 설계에 어떻게 쓰이는 지를 설명하였다. 그리고 실제로 설계된 응용 회로의 동작을 실험을 통하여 검증하였

다. 압전 변압기를 사용한 형광등 안정기는 자기 회로 소자의 갯수를 줄일 수 있기 때문에 대량 생산시 전체 시스템의 가격을 낮출 수 있을 것이다.

현재까지 개발된 압전 변압기가 처리 가능한 전력은 15W 정도로 비교적 낮다. 따라서 전력 처리 능력을 높이기 위한 방법으로 압전 변압기를 병렬 연결하여 구동하거나 새로운 다층 구조의 압전 변압기를 개발하는 연구가 향후에 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C. Y. Lin and F. C. Lee, "Piezoelectric transformer and its applications," Proc. of VPEC seminar, Sep., 1995.
- [2] S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami, A. Fukuoka, T. Inoue, and S. Hirose, "Third-order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application to high-voltage power inverter," IEEE Ultrasonics Symposium, 1994, pp. 525-530.
- [3] M. Shoyama, K. Horikoshi, T. Ninomiya, T. Zaitso and Y. Sasaki, "Operational analysis of the push-pull piezoelectric inverter," IEEE APEC and Exposition, Feb., 1997, pp. 573-578.
- [4] T. Zaitso, T. Inoue, O. Ohnishi, and A. Iwamoto, "2 MHz power converter with piezoelectric ceramic transformer," IEEE INTELEC '92 Proc., pp. 430-437, Oct.1992.
- [5] T. Zaitso, O. Ohnishi, T. Inoue, M. Shoyama, T. Ninomiya, F. C. Lee, and G. C. Hua, "Piezoelectric transformer operating in thickness extensional vibration and its application to switching converter," IEEE PESC Record, June, 1994.
- [6] C. Y. Lin and F. C. Lee, "Design of piezoelectric transformer converters using single-ended topologies," VPEC Power Electron. Sem. Proc., 1994.
- [7] T. Zaitso, T. Shigehisa, T. Inoue, M. Shoyama, and

T. Ninomiya, "Piezoelectric transformer converter with Frequency control," IEEE INTELEC, 1995, pp. 175-180.

[8] T. Zaitzu, T. Shigehisa, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Piezoelectric transformer converter with PWM control," IEEE APEC, 1996, pp. 279-283.

[9] T. Zaitzu, Y. Fuda, Y. Okabe, T. Ninomiya, S. Hamamura, and M. Katsuno, "New piezoelectric transformer converter for AC-adpater," IEEE APEC, 1997, pp. 568-572.

[10] Wei Chen and F. C. Lee, "An improved charge pump electronic ballast with low THD and low crest factor," IEEE APEC, 1996, pp. 622-627.

[11] H. W. Katz, Solid-state magnetic and dielectric devices, John Wiley & Sons, Inc., 1959.

[12] J. Zelenka, Piezoelectric resonators and their applications, Elsevier, 1996, pp. 146-188.

[13] PJM Smidt and JL Duarte, "Powering neon lamps through piezoelectric transformers," IEEE PESC'96, June, 1996, Vol.2, pp.310-315.

[14] C. Y. Lin and F. C. Lee, "Design of a piezoelectric transformer converter and its matching networks," PESC Record, 1994, pp. 607-612.

[15] Y. Kaname and Y. Ise, "A study of transducer design of piezoelectric ceramic transformers," The Journal of the Acoustical Society of Japan, Vol.32, No. 8, Aug., 1975.

[16] Y. Ji and R. Davis, "Starting performance of high-frequency electronic ballasts for 4-foot fluorescent lamps," IAS Annual Meeting, Vol. 3, Oct., 1995, pp. 2083-2089.

[17] P. R. Herrick, "Mathematical models for high intensity discharge lamps", IEEE Transactions on industry applications, Vol. IA-16, NO. 5, Sep./Oct., 1980.

[18] 이규찬, 조보형, "Pspice를 이용한 형광등 모델링", SNU Power Electronics System Lab. Weekly Seminar, 1997

[19] R. Holland, "Contour extensional resonant properties of rectangular piezoelectric plates," IEEE Transactions on sonics and ultrasonics, vol. SU-15, NO. 2, pp. 97-105, April, 1968

[20] E. Hafner, "The piezoelectric crystal unit -definitions and methods of measurement," Proceedings of the IEEE, vol. 57, NO. 2, pp. 179-201, Feb., 1969

저 자 소 개



최 성 진 (崔 城 振)

1973년 2월 4일생. 1996년 서울대 공과대학 전기공학부 졸업. 1998년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 주 관심분야는 전력전자회로의 모델링 및 분석법.

Tel : 877-9141

E-mail : zerotic@snu.ac.kr



이 규 찬 (李 圭 燦)

1964년 6월 18일생. 1987년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1989년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~현재 효성중공업 기술연구소 책임연구원보. 현재 동 대학원 전기공학부 박사과정.

Tel : 877-9141

E-mail : lkc@snu.ac.kr



조 보 형 (趙 普 衡)

1952년 2월 11일생. Cal Tech(학사, 석사). Virginia Tech(박사). 1980년~1982년 TRW 항공우주연구소. 1985년~1989년 Virginia Tech 조교수. 1989년~1995년 Virginia Tech 부교수. 1995년~현재 서울대 전기공학부 부교수.

Tel : 880-7260

E-mail : bhcho@snu.ac.kr