

압전변압기를 이용한 CCFL의 PSPICE 모델링에 관한 연구

황락훈* 김주래* 이상용* 신양호* 조문택**
 * 세명대학교 **대원과학대학

A Study on Pspice Modeling with CCFL using Piezoelectric Transformer

Lak-Hoon Hwang, Moon-Taek Cho, Sang-Yong Lee, Ju-Rae Kim, yang-ho shin
 Semyung University Dae-Won Science College

ABSTRACT

This paper presents a PSPICE circuit model for the simulation of both static and dynamic characteristics of fluorescent lamps. The model can be utilized for an electric ballast simulation with continuous dimming and transient mode simulation such as step dimming.

Characteristics of a Rosen-type piezoelectric transformer were analyzed by combining an equivalent circuit with piezoelectric equations and the relation between the characteristics and the dimension of the PT was studied.

1. 서론

압전 변압기는 1956년 C.A.Rosen에 의하여 최초로 원리와 응용에 관한 연구가 이루어졌으며, H.W.Katz, P.A.van Berkum 등에 의하여 발전되어 고전압 발생 장치로서 주목을 받기 시작하였다. 1960년대에는 TV의 수평 발진 회로에 이용되는 고압 변압기로서 개발되었지만 고출력 특성을 얻기가 어렵기 때문에 개발이 중단되었다가 고출력용 압전 세라믹의 개발이 진행되었다.

압전 변압기의 특성 해석에 있어서 C.A.Rosen은 압전 변압기의 등가 회로에서 공진 주파수가 부하 저항에 의존하는 경우에 대하여 해석을 행하고 승압비의 이론식은 치수와 재료의 압전 상수로 나타낼 수 있다고 하였으며 P.A. van Berkum은 탄성 진동 응력을 이용하여 일정 공진 주파수로 구동시 무손실의 경우와 등가 내부 손실 저항을 포함하는 일반적인 경우의 승압비 해석을 행하였다.

한편, DC-DC 컨버터의 소형화를 위해서도 압전 변압기가 도입되었다. 컨버터를 소형화하기 위해서는 동작 주파수의 상승이 필연적인데, 기존 자기 변압기로는 코어 손실이 문제가 되어 동작 주파수 상승이 제한되었다.

하지만 압전 변압기는 이러한 코어 손실이 존재하지 않으므로 비교적 고효율을 얻으며 전원장치의 소형화를 가능하게 할 수 있다. 이 응용분야에서 현재 논의되고 있는 문제는 압전 변압기의 고효율 구동을 위한 매칭회로의 개발, 입력 전압의 변동과 출력 전압의 변동을 동시에 제어하는 문제, 그리고 구동 전력의 한계를 극복하는 문제 등으로 요약될 수 있다. 무엇보다도 전력전자 분야에서 압전 변압기를 응용하려고 할 때 가장 큰 문제가 되는 것은 전력 구동 능력인데, 더 큰 전력을 구동하기 위해서는 재료분야와 회로분야에서 더 많은 연구가 필요하다. 본 논문에서는 압전 변압기와 형광램프의 전기적 등가회로에 의한 PSPICE 모델을 제시한다.

2. 압전변압기의 모델링

그림 1은 2차 로젠형(λ 모드 진동형) 압전 변압기의 구조이다. 그림과 같이 장방향 압전 세라믹에 있어서 좌 반부는 판면에 대향 전극을 만들고 판의 두께 방향으로 분극 처리를 행하여 구동부를 구성하였으며, 나머지 우 반부에는 판의 단면에 전극을 설치하고 길이 방향으로 분극 처리를 행한 후 길이 방향에서 정해지는 고유 공진 주파수의 전압을 구동부에 인가하게 되면 길이 방향인 발전부에 기계적 진동이 발생, 압전 효과에 의하여 단면 전극에서 고전압이 발생하게 된다.

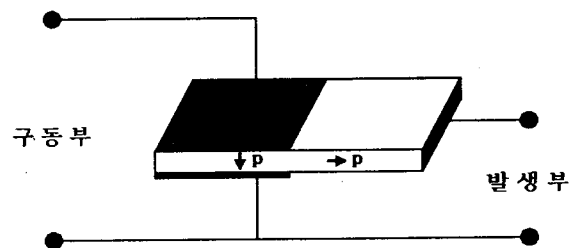


그림 1 압전 변압기
 Fig. 1 Piezoelectric Transformer

압전 변압기의 입력측 전압 $V_{Lr}(t)$ 식 (1)과 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{Lr}(t) = V_{Lr} \sin \omega_s t \quad (1)$$

$$V_{Lr} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{in}}{(1-D)} \sin D\pi \quad (2)$$

또한 압전 변압기의 출력 단자측의 등가임피던스는 식 (3)으로 표현된다.

$$R_{EQ} = \frac{\pi^2}{2} R_L \quad (3)$$

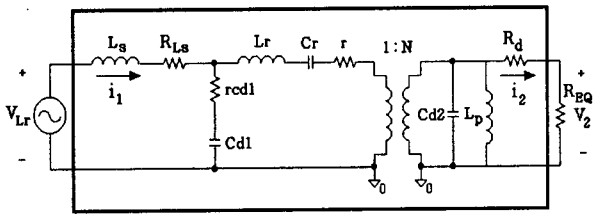


그림 2 압전 변압기의 교류등가회로
Fig. 2 AC equivalent circuit of Piezoelectric Transformer

그림 2의 교류 등가회로에서 기생저항 r_{cd1} 과 C_{d1} 은 효율의 주파수 특성을 정확하게 나타내기 위해 삽입하였으며, R_{Ls} 와 R_d 는 L_s 의 등가저항이다. 출력전압 V_o 의 반주기 동안의 평균값은 식 (4)로 표현되며, 승압비 G 는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_2 \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_2}{\pi} \quad (4)$$

$$G = \frac{V_2}{V_{Lr}} = \frac{\pi V_o}{\frac{2}{\pi} \frac{V_{in}}{(1-D)} \sin D\pi} \quad (5)$$

$$= \frac{(1-D)\pi^2}{2 \sin D\pi} \frac{V_o}{V_{in}}$$

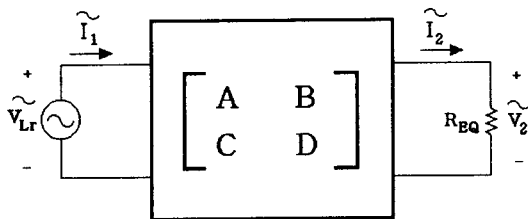


그림 3 F-Matrix
Fig. 3 F-Matrix

그림 2를 그림 3의 F-Matrix 형태로 나타내므로써 식 (6)과 같이 입·출력 전압과 전류의 관계를 구할 수 있으며, 이 때 F-Matrix의 요소들은 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{Lr} \\ \tilde{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_2 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_{Ls} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{d1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{d2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

교류등가회로의 승압비 G 는 식 (8)로 표현할 수 있으며, 출력전압 V_o 는 식 (4)와 식 (8)에 의해 식 (9)를 구할 수 있다.

$$G = \frac{V_2}{V_{Lr}} = \frac{\tilde{V}_2}{\tilde{V}_{Lr}} = \left| \frac{R_{EQ}}{A \cdot R_{EQ} + B} \right| \quad (8)$$

$$V_o = \frac{2 \sin D\pi}{(1-D)\pi^2} \left| \frac{R_{EQ}}{A \cdot R_{EQ} + B} \right| V_{in} \quad (9)$$

그림 4는 제안한 압전 변압기의 등가회로이며, 이 회로를 근거로 하여 PSPICE로 라이브러리화 하였다.

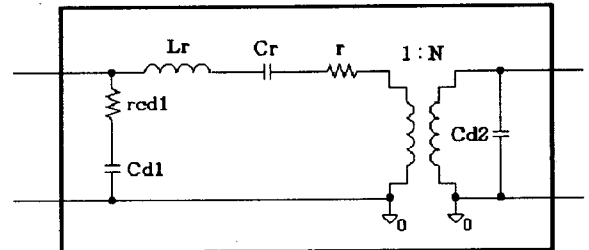


그림 4 압전 변압기 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of Piezoelectric Transformer

3. CCFL의 PSPICE 모델

CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)은 구조가 간단하여 소형화에 적합하며 형광체의 종류, 혼합비를 변화시키는 것에 의해 임의의 형광색이 얻어지고 열 음극 형광 램프보다 수명이 길며 점등회로가 간단하다. CCFL은 부성저항 특성을 가지고 있어 부성 전류를 제한하기 위해 안정기가 꼭 필요하게 된다. 안정한 상태에서 이 램프는 저항과 유사한 특성을 보인다.

본 논문에서 제시한 CCFL의 실효전압과 전류의 특성은 감광 레벨에서 형광 램프는 부성 임피던스 특성을 가지며, 램프는 2가지 서로 다른 감광 특성을 식 (10)으로 표현할 수 있다.

$$V_{rms} = 60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \times I_{ms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \times I_{ms}} \quad (10)$$

식 (10)의 파라미터는 최소 제공근으로부터 유도된다.

고주파수에서 동작하는 저항으로써의 램프를 고려하면 등가 임피던스는 식 (11)과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)로부터 식 (12)를 구할 수 있다.

$$R_{LAMP} = \frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \cdot I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \cdot I_{rms}}}{I_{rms}} \quad (12)$$

이 때 식 (13)과 같이 순시 램프 전류 I_t 를 사용하여 순시 램프 전압 V_t 에 대한 식을 구할 수 있다.

$$V_t = R_{LAMP} \times I_t \quad (13)$$

$$= \frac{60.966 + 110.45 \cdot e^{-1.9404 \cdot I_{rms}} - 48.578 \times e^{-60.182 \cdot I_{rms}}}{I_{rms}} \times I_t$$

식 (13)에 의해 CCFL을 모델링 하였으며, 순시전압 V_t 는 순시램프전류 I_t 와 실효전류 I_{rms} 의 함수로써 구할 수 있다.

PSPICE 모델에서 램프 전류의 실효값은 RC 적분회로를 사용하여 구하며, 이 때 입력 전류원 I_s 는 순시램프전류 I_t 의 제공으로써 정의되며, 출력전압 V_A 는 식 (14)와 같이 시간 T동안의 함수로써 계산할 수 있다.

$$V_A = \int_0^T I_t^2 \frac{dt}{T} = I_{rms}^2 \quad (14)$$

그러므로 전압 V_A 의 제공근은 전류 I_t 의 실효값이 된다. 실효램프전류를 계산하기 위해 이러한 RC 적분 회로를 사용함으로써 램프 모델 방정식인 식 (13)은 그림 5와 같이 PSPICE 모델로 만들 수 있다. 그림 5에서 H1은 이득=1을 갖는 전류제어 전압원으로 순시램프전류를 검출하며, G2는 전압제어 전류원, E2는 식 (12)와 같은 전원을 가지는 전압제어 전압원, E3는 이득=1을 갖는 전압제어 전압원으로 순시램프전압을 발생한다.

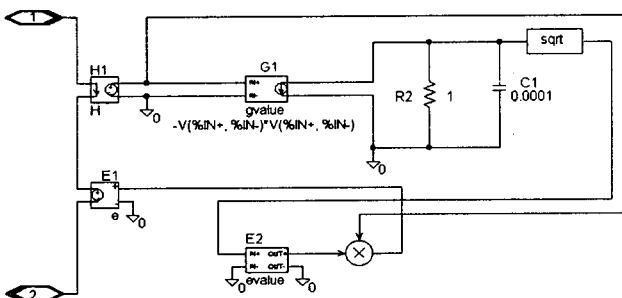


그림 5 램프의 PSPICE 모델
Fig. 5 PSPICE Model of Lamp

그림 6은 그림 5에서 0~4[ms]동안은 75[kHz]의 입력주파수, 4~8[ms]동안은 30[kHz], 8~12[ms]동안은 75[kHz]로 가변했을 때의 CCFL의 시뮬레이션 결과이다. 또한

그림 7은 0~5[ms]까지는 저항을 15[kΩ]으로 하고, 5[ms]~10[ms]까지는 저항을 5[kΩ]으로 가변했을 때의 램프 전압 및 전류 파형을 제한한 CCFL 모델을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 그림 8은 램프의 전압과 전류의 특성 곡선을 나타냈다.

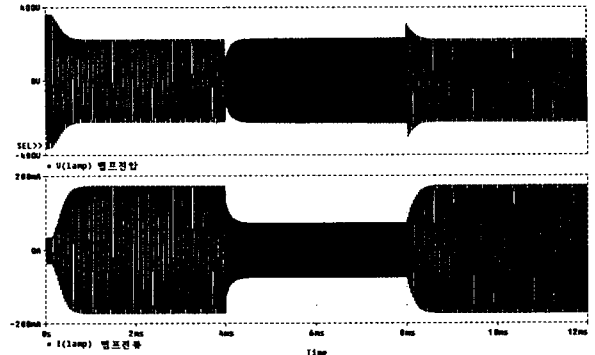


그림 6 입력 주파수 가변시 램프 전압 및 전류의 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation Waveforms of Lamp Voltage and Current with Input Frequency

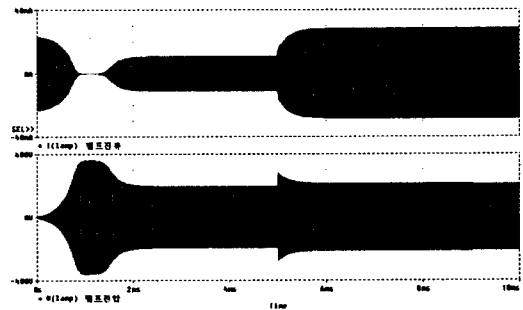


그림 7 저항 가변시의 램프 전압 및 전류의 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation Waveforms of Lamp Voltage and Current with Resistor Variation

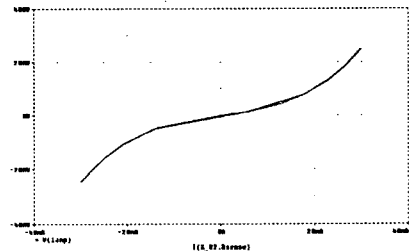


그림 8 램프의 V-I 특성곡선
Fig. 8 V-I Characteristics of CCFL

압전 변압기의 모델링을 확장하기 위해 그림9의 Push-pull 인버터를 이용했다. 이에 대한 시뮬레이션 파형을 그림 10에 나타냈다. 또한 그림 11은 부하저항을 200[kΩ], 150[kΩ], 100[kΩ], 50[kΩ] 가변시에 출력전압의 파형이며, 그림 12는 구동 주파수에 따른 압전 변압기의 출력전압을 나타냈다. 그림 13은 인덕턴스 L_1 과 L_2 를 50[μH], 100[μH], 150[μH]으로 가변했을 때의 각 단의 파형을 시뮬레이션 했다.

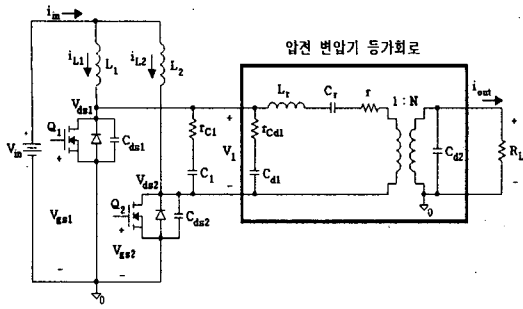


그림 9 압전 변압기를 이용한 Push-pull 인버터
Fig. 9 Push-pull Inverter using Piezoelectric Transformer

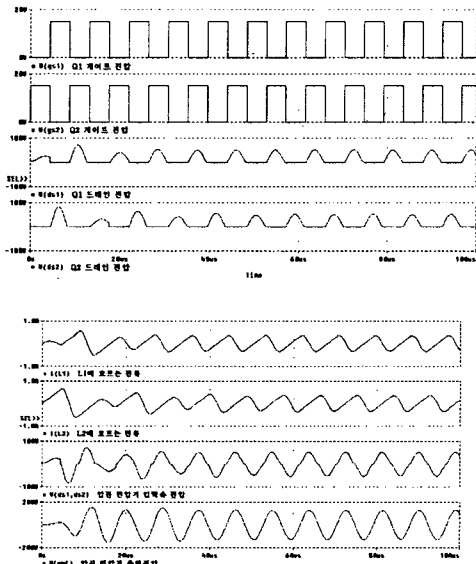


그림 10 Push-pull 인버터의 시뮬레이션 파형
Fig. 10 Simulation Waveforms of Push-pull Inverter

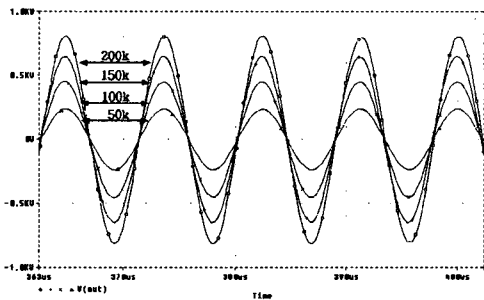


그림 11 부하저항 가변시 출력전압 파형
Fig. 11 Output Voltage Waveforms with Load Resistor Variation

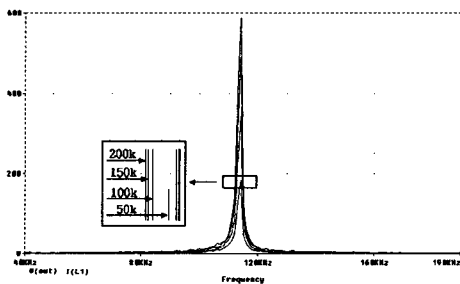


그림 12 구동 주파수에 따른 압전 변압기의 출력전압
Fig. 12 Output Voltage of Piezoelectric Transformer as a function of driving frequency

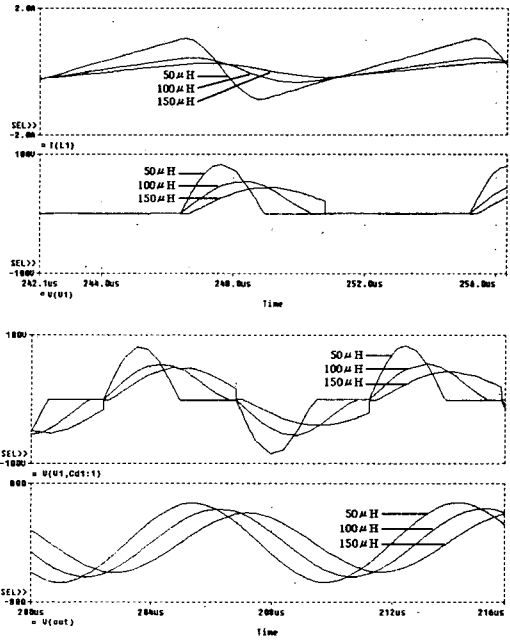


그림 13 L_1, L_2 가변시 인버터 각 단의 시뮬레이션 파형
Fig. 13 Simulation Waveforms with Inductance L_1, L_2 Variation

4. 결 론

본 논문에서는 형광램프와 압전 변압기의 PSpice 모델을 제시했다. 램프모델은 최소 제공근을 이용하여 모델의 파라미터들을 유도하였으며 시동모드에서 상승모드까지 시뮬레이션이 가능했다. 또한 입력전류에 따른 기계적 공진 특성의 변화를 고려하고 3차 길이방향진동모드에서 동작하는 압전 변압기는 여러 가지 부하조건과 입력 전류에 따른 기계적인 공진 특성의 변화를 알 수 있었으며, 형광램프 안정기의 응용회로에도 적합하다.

앞으로의 과제는 저·고주파용 형광램프의 안정기 설계 및 고출력용 램프의 모델링과 고출력용 압전 변압기의 모델링이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] U.Mader and P.Hom, "A Dynamic Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps" IEEE IAS Annual Meeting Proceeding, 1992, pp. 1928~1934.
- [2] C.S.Moo, Y.C.Chuang, Y.H.Huand and H.N.Chen, "Modeling of Fluorescent Lamps for Dimmable Electronic Ballast" IEEE IAS Annual Meeting Proceeding, 1996, pp. 2231~2236.
- [3] N.Sun and B.Hesterman, "Pspice High Frequency Dynamic Fluorescent Lamps Model" IEEE APEC Conference Record, 1997, pp. 641~647.
- [4] T.Zaitsu, T.Shigehisa, M.Shoyama, and T.Ninomiya, "piezoelectric Transformer Converter with PWM Control," IEEE APEC'96 Proc., pp. 279~283, March 1996.
- [5] T.Zaitsu, Y.Fuda, Y.Okabe, T.Ninomiya, S.Hamamura, and M.Katsuno. "New piezoelectric Transformer Converter for AC-adaptor." IEEE APEC'97 Proc., pp. 568~572, March 1997.
- [11] T.Zaitsu, T.Ninomiya, and M.Shoyama, "Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control," IEICE Transactions on Communications, Vol. E80-B, No. 7